ISSN 2788-7995 (Print)
ISSN 3006-0524 (Online)

ШӘКӘРІМ УНИВЕРСИТЕТІНІҢ ХАБАРШЫСЫ ТЕХНИКАЛЫҚ ҒЫЛЫМДАР

ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛ

ВЕСТНИК УНИВЕРСИТЕТА ШАКАРИМА ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

BULLETIN OF SHAKARIM UNIVERSITY TECHNICAL SCIENCES

SCIENTIFIC JOURNAL

№3 (23)
2026

https://vestnik.tech.shakarim.kz

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ МИНИСТРЛІГІ
МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

SHAKARIM UNIVERSITY
1934

ШӘКӘРІМ УНИВЕРСИТЕТІНІҢ Х А Б А Р Ш Ы С Ы ТЕХНИКА ҒЫЛЫМДАР

ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛ

В Е С Т Н И К УНИВЕРСИТЕТА ШАКАРИМА ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

B U L L E T I N OF SHAKARIM UNIVERSITY TECHNICAL SCIENCES

SCIENTIFIC JOURNAL

№ 3 (23) 2026

Семей, 2026

Ғылыми журнал
«Шәкәрім Университетінің Хабаршысы.
Техникалық ғылымдар сериясы»

№ 3 (23) 2026

Меншік иесі:
«Шәкәрім университеті» Коммерциялық емес акционерлік қоғамы

1997 жылдан бастап шығарылады
Кезеңділігі: тоқсан сайын (жылына 4 рет)

Журнал Қазақстан Республикасы Ақпарат және қоғамдық даму министрлігінің
Ақпарат комитетінде тіркелген
Есепке қою туралы куәлік № KZ93VPY00033663 19.03.2021 ж.

РЕДАКЦИЯЛЫҚ АЛҚА

Бас редактор – **Амирханов Кумарбек Жунусбекович** – техника ғылымдарының докторы, «Шәкәрім университеті» КЕАҚ профессоры (Қазақстан, Семей қ.)

Виелеба Войтек – техника ғылымдарының докторы, Вроцлав ғылым және технология университетінің профессоры (Польша, Вроцлав қ.)
Дворцевой Александр Игоревич – техника ғылымдарының кандидаты, Новосібір мемлекеттік техникалық университетінің доценті (Ресей, Новосібір қ.)
Какимов Айтбек Калиевич – техника ғылымдарының докторы, «Шәкәрім университеті» КЕАҚ профессоры (Қазақстан, Семей қ.)
Лобасенко Борис Анатольевич – техника ғылымдарының докторы, «Кемерово мемлекеттік университетінің» профессоры, Жоғары білім берудің федералды мемлекеттік бюджеттік білім беру мекемесі (Ресей, Кемерово қ.)
Майоров Александр Альбертович – техника ғылымдарының докторы, федералдық Алтай агробиотехнологиялық ғылыми орталығының профессоры (Сібір ірімшік өндіру саласындағы ғылыми зерттеу институты) (Ресей, Барнаул қ.)
Ребезов Максим Борисович – ауыл шаруашылығы ғылымдарының докторы, Оңтүстік-Орал мемлекеттік университетінің профессоры (Ресей, Челябі қ.)
Узаков Ясин Маликович – техника ғылымдарының докторы, Алматы технологиялық университетінің профессоры, (Қазақстан, Алматы қ.)
Хуторянский Виталий Викторович – профессор, Рединг университеті (Ұлыбритания, Рединг қ.)
Чоманов Уришбай Чоманович – техника ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, Қазақ қайта өңдеу және тамақ өнеркәсібі ҒЗИ (Қазақстан, Алматы қ.)
Драгоев Стефан Георгиев – техника ғылымдарының докторы, Тағамдық технологиялар университетінің профессоры, Болгар Ғылым академиясының корреспондент-мүшес (Болгария, Пловдив қ.)
Налок Дута – PhD, Вашингтон Университеті (АҚШ, Вашингтон)
Оразбаев Батыр Бидайбекович – техника ғылымдарының докторы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің профессоры (Қазақстан, Астана қ.)
Григорьева Светлана Владимировна – PhD, «Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университетінің» КЕАҚ, қауымдастырылған профессоры (Қазақстан, Өскемен қ.)
Чектыбаев Бауржан Жамбулович – PhD, ҚР ҰЯО «Атом Энергиясы Институты» филиалының Термоядролық зерттеулер бөлімінің басшысы (Қазақстан, Курчатов қ.)
Витюк Владимир Анатольевич – ф/м.ғ.к., қауымдастырылған профессор, PhD, ҚР ҰЯО РМК бас директорының ғылым жөніндегі орынбасары (Қазақстан, Курчатов қ.)
Нұғман Ерік Зейнелұлы – PhD, Ә. Бүркітбаев атындағы Энергетика және машина жасау институты, Satbayev University (Қазақстан, Алматы қ.)
Ибрагимова Зауре Асилбековна – PhD, М. Әуезова атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, доценті (Қазақстан, Шымкент қ.)

Жазылу индексі: 76172

Редакция құрамы:
Евлампиева Е.П. – редактор
Семейская З.Т. – редактор

Редакцияның мекен-жайы:
071412, Абай облысы, Семей қ., Глинки к-сі, 20а, каб. 506
Байланыс телефоны: 8(7222)31-32-49
Электрондық пошта: rio@shakarim.kz
Шәкәрім Университетінің Хабаршысы. Техникалық ғылымдар сериясы, 2026

Қолжазбалар қайтарылмайды. Авторлардың пікірлері редакцияның көзқарасымен сәйкес келмеуі мүмкін. Материалдарды басқа басылымдарда пайдалануға редакцияның жазбаша келісімімен ғана рұқсат етіледі. Ұсынылған материалдардың дұрыстығына автор жауапты болады. Журналға сілтеме міндетті.

©Басылымның макетін ресімдеу: «Шәкәрім университеті» коммерциялық емес акционерлік қоғам, 2026

Научный журнал
«Вестник Университета Шакарима. Серия технические науки»

№ 3 (23) 2026

Собственник:
Некоммерческое акционерное общество «Шәкәрім университет»

Издается с 1997 года
Периодичность: ежеквартально (4 раза в год)

Журнал зарегистрирован в Комитете информации Министерства информации
и общественного развития Республики Казахстан
Свидетельство о постановке на учет № KZ93VPY00033663 от 19.03.2021 г.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор – **Амирханов Кумарбек Жунусбекович** – доктор технических наук, профессор, НАО «Шәкәрім университет» (Казахстан, г. Семей)

Виелеба Войтек – доктор технических наук, профессор, Вроцлавский университет науки и технологии (Польша, г. Вроцлав)
Дворцевой Александр Игоревич – кандидат технических наук, доцент, Новосибирский государственный технический университет (Россия, г. Новосибирск)
Какимов Айтбек Калиевич – доктор технических наук, профессор, НАО «Шәкәрім университет» (Казахстан, г. Семей)
Лобасенко Борис Анатольевич – доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кемеровский государственный университет» (Россия, г. Кемерово)
Майоров Александр Альбертович – доктор технических наук, профессор, Федеральный Алтайский научный центр агробиотехнологий (отдел Сибирского научно-исследовательскиого института сыроделия) (Россия, г. Барнаул)
Ребезов Максим Борисович – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Южно-Уральский государственный университет (Россия, г. Челябинск)
Узаков Ясин Маликович – доктор технических наук, профессор, Алматинский технологический университет (Казахстан, г. Алматы)
Хуторянский Виталий Викторович – профессор, Университет Рединга (Великобритания, г. Рединг)
Чоманов Уришбай Чоманович – доктор технических наук, профессор, академик НАН РК, Казахский НИИ перерабатывающей и пищевой промышленности (Казахстан, г. Алматы)
Драгоев Стефан Георгиев – доктор технических наук, профессор, Университет пищевых технологий, член-корреспондент Болгарской Академии наук (Болгария, г. Пловдив)
Налок Дута – PhD, Университет штата Вашингтон (США, Вашингтон)
Оразбаев Батыр Бидайбекович – доктор технических наук, профессор Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева (Казахстан, г. Астана)
Григорьева Светлана Владимировна – PhD, ассоциированный профессор НАО «Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева» (Казахстан, г. Усть-Каменогорск)
Чектыбаев Бауржан Жамбулович – PhD, Филиал Института атомной энергии РГП «Национальный ядерный центр Республики Казахстан (Казахстан, г. Курчатов)
Витюк Владимир Анатольевич – кандидат физико-математических наук, PhD, ассоциированный профессор, РГП «Национальный ядерный центр Республики Казахстан» (Казахстан, г. Курчатов)
Нұғман Ерік Зейнелұлы – PhD, Институт энергетики и машиностроения им. А. Буркитбаева, Satbayev University (Казахстан, г. Алматы)
Ибрагимова Зауре Асилбековна –PhD, доцент Южно-Казахстанского университета им. М. Ауэзова (Казахстан, г. Шымкент)

Подписной индекс: 76172

Технические редакторы:
Евлампиева Е.П.
Семейская З.Т.

Адрес редакции:
071412, область Абай, г. Семей, ул. Глинки, 20А, каб. 506
Контакты: телефон: 8(7222)31-32-49
Электронная почта: rio@ shakarim.kz
Вестник Университета Шакарима. Серия технические науки, 2026

Рукописи не возвращаются. Мнения авторов могут не совпадать с точкой зрения редакции. Использование материалов в других изданиях допускается только с письменного согласия редакции. За достоверность представленных материалов ответственность несет автор. Ссылка на журнал обязательна.

©Оформление макета: Некоммерческое акционерное общество «Шәкәрім университет», 2026

Scientific journal
«Bulletin of Shakarim University. Technical Sciences»

№ 3 (23) 2026

Owner:
Non-profit Joint Stock Company «Shakarim University»

Published since 1997
Frequency: quarterly (4 times a year)

The journal is registered with the Information Committee of the Ministry of Information and Public Development of the Republic of Kazakhstan
Certificate of registration no. KZ93VPY00033663 dated 03.19.2021

EDITORIAL BOARD

Editor-in-chief – Amirkhanov Kumarbek – Doctor of Technical Sciences, Professor of the NJC «Shakarim University» (Kazakhstan, Semey)

Wieleba Wojciech – Doctor of Technical Sciences, Professor at the Wroclaw University of Science and Technology (Poland, Wroclaw)
Dvortsevoy Alexander Igorevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Novosibirsk State Technical University (Russia, Novosibirsk)
Kakimov Aitbek – Doctor of Technical Sciences, Professor of the NJC «Shakarim University», (Kazakhstan, Semey)
Lobasenko Boris – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kemerovo State University» (Russia, Kemerovo)
Mayorov Alexander – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Federal Altai Scientific Center of Agrobiotechnologies (Department of the Siberian Research Institute of Cheese Making) (Russia, Barnaul)
Rebezov Maxim – Doctor of Agricultural Sciences, Professor of South Ural State University (Russia, Chelyabinsk)
Uzakov Yassin – Doctor of Technical Sciences, Professor of Almaty Technological University (Kazakhstan, Almaty)
Khutoryanskiy Vitaly – Professor at the University of Reading (Great Britain, Reading)
Chomanov Urishbai – Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Head of the Department of the Kazakh Research Institute of Processing and Food Industry (Kazakhstan, Almaty)
Dragoev Stefan – Doctor of Technical Sciences, Professor of Engineering at the University of Food Technologies, Corresponding Member of the Bulgarian Academy of Sciences (Bulgaria, Plovdiv)
Nalok Dutta – PhD, Washington State University (USA, Washington)
Orazbayev Batyr – Doctor of Technical Sciences, Professor of L.N. Gumilyov Eurasian National University (Kazakhstan, Astana)
Grigorieva Svetlana – PhD, Associate Professor, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University (Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk)
Chektybayev Baurzhan – PhD, Head of Thermonuclear Research Department Branch of Atomic Energy Institute RSE NNC RK (Kazakhstan, Kurchatov)
Vityuk Vladimir – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, PhD, Associate Professor, Deputy Director General for Science, RSE NNC RK (Kazakhstan, Kurchatov)
Nugman Yerik – PhD, A. Burkitbayev Institute of Energy and Mechanical Engineering, Satbayev University (Kazakhstan, Almaty)
Ibrahimova Zaure – PhD, Associate Professor, M. Auezov South Kazakhstan University (Kazakhstan, Shymkent)

Subscription index: 76172

Editorial staff:
Yevlampiyeva Y. – editor
Semeyskaya Z. – editor

Editorial Office address:
071412, Abai region, Semey,
Glinka str., 20A, room 506
Contacts: phone: +7 (7222) 31-32-49
Email address: rio@ shakarim.kz
Bulletin of Shakarim University.
Technical Sciences, 2026

Manuscripts are not returned. The opinions of the authors may not coincide with the point of view of the editors. The use of materials in other publications is allowed only with the written consent of the editorial board. The author is responsible for the accuracy of the submitted materials. A link to the journal is required.

©Layout design: Non-profit Joint Stock Company «Shakarim University», 2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-1

МРНТИ: 28.15.27

M.A. Beisenbi[1], A.A. Auyelbayeva[1,2]*, V.V. Nikulin[3], S.Sh. Beisembina[4]
[1]L.N. Gumilyov Eurasian National University,
010008, Republic of Kazakhstan, Astana, Satpayev str. 2.
[2]Astana IT University,
010000, Republic of Kazakhstan, Astana, Mangilik El ave. C1
[3]State University of New York at Binghamton,
Binghamton, NY 13902, United States of America
[4]Nazarbayev University,
010000, Republic of Kazakhstan, Astana, Kabanbay Batyr ave. 53.
*e-mail: aauelbayeva@gmail.com

GRADIENT-VELOCITY METHOD FOR APERIODIC ROBUST STABILITY OF LINEAR CONTROL SYSTEMS

Abstract: *This study develops a gradient-velocity method for analyzing the aperiodic robust stability of linear control systems under parametric uncertainty. The proposed approach extends classical Lyapunov-based stability theory by incorporating velocity characteristics of state variables into the analysis, which enables a more detailed description of system dynamics. Unlike traditional matrix Lyapunov methods and linear matrix inequality (LMI) techniques, the method formulates stability conditions in the form of explicit systems of inequalities derived from vector Lyapunov functions, thereby reducing conservatism and improving interpretability.The developed approach makes it possible to determine admissible parameter regions that guarantee monotonic convergence of state trajectories to the equilibrium point without oscillatory behavior or overshoot. Stability criteria are established for both single-input single-output (SISO) and multi-input multi-output (MIMO) systems, ensuring applicability to a wide class of control problems. The obtained conditions define a class of linear control systems characterized by robust performance and strictly aperiodic transient processes across the entire domain of parameter uncertainty.*

Numerical simulations of second – and third-order systems confirm the theoretical findings and demonstrate the effectiveness of the proposed method. The results show consistent monotonic decay of state variables and improved transient response characteristics. Overall, the method provides a practical analytical tool for robust control design and expands the geometric interpretation of Lyapunov's direct method.

Key words: *aperiodic robust stability; gradient-velocity method; vector Lyapunov functions; linear control systems; parametric uncertainty.*

Introduction

Robust stability analysis remains one of the fundamental problems of modern control theory, particularly for systems operating under conditions of parametric uncertainty and external disturbances. In many practical engineering applications such as aerospace systems, robotics, and automated technological processes, control systems must maintain stable performance despite variations in system parameters and environmental influences. Therefore, the development of reliable analytical approaches for stability analysis continues to be an important research direction in modern control engineering [1-3].

Classical approaches to stability analysis include the Routh-Hurwitz criterion, Lyapunov's direct method, and modern techniques based on linear matrix inequalities (LMI). These approaches provide effective tools for determining asymptotic stability of dynamic systems and have been widely applied in engineering practice [5-7]. However, most classical methods mainly guarantee

©M.A. Beisenbi, A.A. Auyelbayeva, V.V. Nikulin, S.Sh. Beisembina, 2026

convergence of system trajectories without explicitly ensuring qualitative properties of transient processes, such as monotonic convergence and absence of oscillatory behavior.

In many practical control problems, it is important not only to ensure asymptotic stability but also to obtain aperiodic transient responses, in which the state trajectories converge to equilibrium monotonically without oscillations or overshoot. Such behavior is particularly desirable in high-precision control systems and systems operating under uncertainty, where oscillatory transient processes may degrade performance or reduce system robustness.

Recent studies in robust control theory have explored various analytical and computational approaches for stability analysis of uncertain systems, including optimization-based methods and matrix-inequality techniques [2, 8, 11]. At the same time, several researchers have investigated the use of vector Lyapunov functions and gradient-based methods for the analysis and synthesis of control systems with uncertain parameters [9, 15, 16]. These approaches allow a more flexible representation of system dynamics and facilitate the analysis of stability properties in complex multidimensional systems.

Despite significant progress in robust control theory, many existing approaches mainly focus on formal stability conditions and do not directly address the qualitative behavior of transient processes. In particular, ensuring aperiodic behavior and monotonic convergence of system trajectories under parameter uncertainty remains an important research problem.

One of the promising approaches for addressing this problem is the gradient-velocity method based on vector Lyapunov functions, which provides a geometric extension of Lyapunov's direct method and allows stability conditions to be formulated in the form of explicit analytical inequalities [15-17]. Unlike purely matrix-based approaches, this method enables a more transparent interpretation of stability regions and allows the analysis of transient process properties in control systems.

The purpose of this paper is to develop analytical conditions for aperiodic robust stability of linear control systems with parametric uncertainty using the gradient-velocity method. The proposed approach derives explicit inequality-based stability criteria defining admissible parameter regions that ensure monotonic convergence of state trajectories without oscillatory components.

The obtained theoretical results are supported by numerical simulations confirming the validity of the derived analytical conditions. The developed method extends the analytical capabilities of Lyapunov-based stability analysis and may be applied in the design of robust control systems requiring guaranteed aperiodic transient behavior.

Related work

Stability analysis of dynamic systems represents one of the central topics of classical control theory. One of the fundamental approaches is Lyapunov's second method, which provides a general framework for establishing sufficient conditions for stability through the construction of Lyapunov functions [5,6]. These ideas have been further developed for interconnected and multidimensional systems, where stability must be ensured under parametric uncertainty and external disturbances. Classical results in robust control theory also include multivariable feedback analysis and stability criteria for systems with uncertain parameters, which form the theoretical basis for many modern control methods [7, 12].

Recent studies have investigated computational and optimization-oriented techniques for robust stability analysis of uncertain systems. In particular, methods based on linear matrix inequalities (LMI) and Lyapunov-Krasovskii functionals have been widely used for analyzing stability of systems with delays and parameter variations [2, 8, 11]. At the same time, several studies have proposed gradient-based and vector Lyapunov approaches for the synthesis and analysis of control systems with improved transient performance [9, 15, 16]. Such approaches provide a more flexible mathematical representation of system dynamics and facilitate the analysis of stability properties in multidimensional control systems.

However, many existing approaches mainly focus on ensuring asymptotic stability without explicitly addressing qualitative properties of transient processes. In particular, guaranteeing aperiodic behavior and monotonic convergence of state trajectories under parametric uncertainty remains a challenging problem. Therefore, the development of analytical approaches based on the gradient-velocity concept and vector Lyapunov functions represents a promising direction for improving the analysis of robust stability of linear control systems.

Conditions and research methods

The analysis of aperiodic robust stability of linear control systems is performed under conditions of parametric uncertainty. It is assumed that the system parameters vary within a bounded admissible domain, which reflects real operating conditions of engineering control systems subject to disturbances and uncertainties.

Consider a linear time-invariant control system described in state-space form. The system dynamics are influenced by an uncertain parameter belonging to a bounded set. The control law is implemented using state feedback, ensuring closed-loop system behavior.

The research method is based on the gradient-velocity approach using vector Lyapunov functions. The methodology includes the following stages:

– formulation of the mathematical model of the control system;
– construction of a vector Lyapunov function using the gradient-velocity concept;
– derivation of stability conditions based on the Lyapunov derivative;
– transformation of matrix inequalities into analytical parameter inequalities;
– determination of admissible parameter regions ensuring aperiodic stability;
– numerical verification of the obtained theoretical results.

The proposed approach allows deriving explicit analytical conditions defining admissible parameter regions and guaranteeing monotonic convergence of system trajectories without oscillatory behavior.

The general procedure of the proposed gradient-velocity stability analysis method is illustrated in Figure 1.

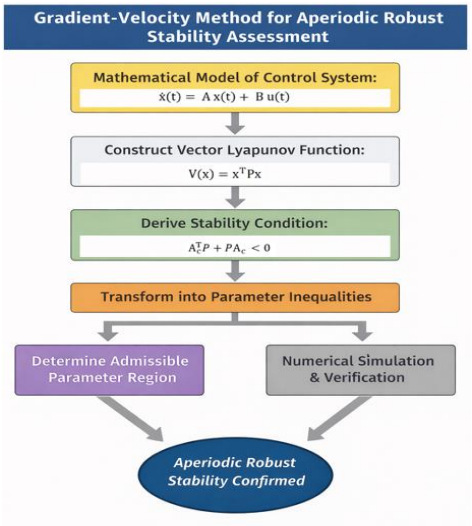


Figure 1 – Flowchart of the gradient-velocity method for aperiodic robust stability analysis

As shown in Figure 1, the proposed approach consists of several sequential stages, including the formulation of the mathematical model of the control system, construction of the vector Lyapunov function, derivation of stability conditions, transformation into analytical parameter inequalities, and numerical verification of the obtained results.

Mathematical model of the control system

Consider a linear time-invariant control system described in state-space form

$$\dot{\mathbf{x}}(\mathbf{t}) = \mathbf{A}\,\mathbf{x}(\mathbf{t}) + \mathbf{B}\,\mathbf{u}(\mathbf{t}) \qquad (1)$$

To provide a concrete numerical verification of the proposed approach, a representative second-order linear control system with parametric uncertainty is considered. Such a model may describe a simplified electromechanical actuator or a satellite attitude stabilization subsystem, where the uncertain parameter reflects variations in damping, stiffness, or inertia characteristics.The uncertain system matrix is defined as

$$\mathrm{A(u)} = [0 \quad 1 - (2 + \mathrm{u}) \quad -(3 + 0.5\mathrm{u})]\,,$$

and the input matrix is given by

$$\mathrm{B} = [0 \quad 1].$$

Here, $x_1(t)$ denotes the generalized position or angular deviation of the controlled object, while $x_2(t)$ denotes the corresponding velocity. The parameter (\mu) represents bounded parametric uncertainty and is assumed to vary within the interval

$$u \in [0.2, 0.8].$$

The lower and upper bounds of this interval correspond to boundary operating conditions of the control object, while the value $u = 0.5$ is considered as the nominal case. Therefore, numerical simulations are performed for $u = 0.2$, $u = 0.5$, and $u = 0.8$, which allows verification of the proposed stability conditions both at the nominal value and at the boundaries of the uncertainty domain.

This example is used to demonstrate that the proposed gradient-velocity method ensures monotonic convergence of state trajectories without oscillations and overshoot for all admissible values of the uncertain parameter.

Where $x(t)$ is the state vector;

$u(t)$ is the control vector;

A and B are constant matrices.

The system operates under conditions of parametric uncertainty. It is assumed that the system matrix depends on an uncertain parameter

$$A = A(\mu)$$

where (μ) belongs to a bounded admissible domain.

The state-feedback control law is defined as

$$\mathbf{u(t)} = \mathbf{Kx(t)}, \tag{2}$$

where K is the feedback gain matrix.

Substituting (2) into (1) yields the closed-loop system

$$\dot{\mathbf{x}}\mathbf{(t)} = (\mathbf{A}\,(\mu) + \mathbf{BK})\mathbf{x(t)} \tag{3}$$

Gradient-Velocity Formulation

The analysis of aperiodic robust stability is performed using a vector Lyapunov function constructed according to the gradient-velocity method.

Let the Lyapunov function be defined as

$$\mathbf{V(x)} = \mathbf{x^T P x} \tag{4}$$

where $P = P^T > 0$ is a positive definite matrix.

The gradient of the Lyapunov function with respect to the state vector is

$$\boldsymbol{\nabla V(x)} = \mathbf{2P\,x} \tag{5}$$

The time derivative of $V(x)$along the trajectories of system (3) is

$$\dot{\mathbf{V}}(x) = \boldsymbol{\nabla V(x)^T \dot{x}} \tag{6}$$

Substituting (3) into (6) yields

$$\dot{\mathbf{V}}\mathbf{(x)} = \mathbf{x^T}(\mathbf{A_c^T}\boldsymbol{P} + \mathbf{A_c}\,)\mathbf{x} \tag{7}$$

For aperiodic stability, it is required not only that the system be asymptotically stable, but also that the norm of the state vector monotonically decreases over time. This requires the Lyapunov derivative to be strictly negative for all admissible parameter variations:

$$\dot{\mathbf{V}} < \mathbf{0}, \quad \forall \mathbf{x} \neq \mathbf{0}, \qquad \forall \boldsymbol{\mu} \in \Omega \tag{8}$$

Expanding expression (7), the time derivative can be rewritten in symmetric form as

$$\dot{\mathbf{V}}\mathbf{(x)} = \tfrac{\mathbf{1}}{\mathbf{2}}\mathbf{x^T}\big(\,\mathbf{P}\,\mathbf{A_c}\,(\boldsymbol{\mu}) + \,\mathbf{A_c^T}\,(\boldsymbol{\mu})\mathbf{P}\big)\mathbf{x} \tag{9}$$

where

$$\mathbf{A_c}\,(\boldsymbol{\mu}) = \,\mathbf{A}(\boldsymbol{\mu}) + \,\mathbf{BK} \tag{10}$$

denotes the closed-loop system matrix.

A sufficient condition for robust aperiodic stability is

$$\mathbf{A_c^T}\boldsymbol{P} + \boldsymbol{P}\mathbf{A_c} < \mathbf{0} \quad (11)$$

The inequality condition (11) defines a parameter-dependent stability region. In order to obtain explicit admissible parameter domains ensuring aperiodic robust stability, the derived matrix inequality is analyzed component-wise.

This allows transforming the Lyapunov stability condition into a system of analytical inequalities with respect to the uncertain parameter μ.

Based on the obtained inequalities, admissible parameter regions are determined for both single-input single-output (SISO) and multi-input multi-output (MIMO) systems.

The analytical results are confirmed by numerical simulation.

For the SISO configuration, the closed-loop matrix

$$\mathrm{A_c}(\mu) = \mathrm{A}(\mu) + \mathrm{BK}$$

depends explicitly on the uncertain parameter.

Substituting $\mathrm{A_c}(\mu)$ into inequality (11) yields the following admissible parameter condition:

$$\mathrm{f}(\mu) < 0 \quad (12)$$

where $\mathrm{f}(\mu)$ is a quadratic function derived from the symmetric part of the closed-loop system matrix. The inequality (12) determines the admissible interval

$$\mu \in [\mu_{\min}, \mu_{\max}], \quad (13)$$

within which the system exhibits robust aperiodic stability.

To verify the obtained analytical results, numerical simulations are performed for representative values of the uncertain parameter. The simulations allow evaluating the transient response of the system and confirming the absence of oscillatory behavior within the derived stability region.

The numerical results confirm that the proposed gradient-velocity approach provides a reliable analytical tool for analyzing aperiodic robust stability of linear control systems.

The proposed gradient-velocity formulation extends classical Lyapunov stability analysis by providing explicit analytical inequalities defining admissible parameter regions ensuring aperiodic transient behavior.

Results

The analytical conditions derived in the previous section allow determining admissible parameter regions ensuring aperiodic robust stability of the considered control system. In order to evaluate the effectiveness of the proposed approach, numerical verification of the obtained stability criteria was performed.

Numerical simulation setup

To verify the proposed gradient-velocity stability conditions, numerical simulations were carried out in MATLAB R2024a for the uncertain second-order control system introduced in the previous section.

The simulations were performed for three representative values of the uncertain parameter:

$$\mathrm{u} = 0.2, \quad \mathrm{u} = 0.5, \quad \mathrm{u} = 0.8.$$

These values correspond to the lower boundary, nominal operating condition, and upper boundary of the admissible uncertainty interval, respectively.

For numerical verification, the admissible interval $\mu \in [0.2, 0.8]$ was selected as a representative uncertainty domain satisfying the derived analytical inequalities.

The transient responses of the state variables $\mathrm{x}_1(t)$ and $\mathrm{x}_2(t)$ were analyzed in order to evaluate the qualitative properties of the system dynamics. Particular attention was given to the monotonicity of convergence, overshoot magnitude, and the presence of oscillatory behavior.

The initial state vector was selected as $\mathrm{x}(0) = [1\ 0]$ which corresponds to an initial deviation from the equilibrium state.

The obtained simulation results demonstrate that the proposed gradient-velocity method ensures stable and monotonic convergence of system trajectories throughout the entire admissible uncertainty domain. In all considered cases, the transient responses remain aperiodic and converge to the equilibrium state without sustained oscillations.

Figure 2 illustrates the transient responses of the considered uncertain control system for three representative values of the uncertain parameter within the admissible interval.

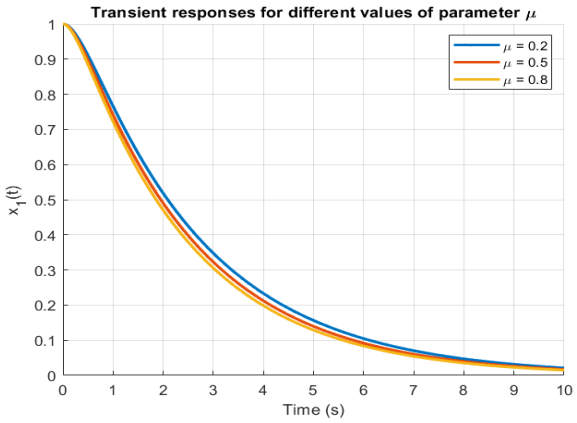


Figure 2 – Transient responses of the uncertain control system for different values of the parameter μ

The obtained trajectories demonstrate monotonic convergence toward the equilibrium point for all considered values of μ. No oscillatory behavior or overshoot is observed throughout the entire uncertainty domain, confirming the aperiodic nature of the transient processes.

It can also be observed that variations of the uncertain parameter influence the convergence rate of the system. Higher values of μ lead to faster attenuation of the state trajectory, whereas lower values result in slower convergence while preserving stability.

The simulation results are fully consistent with the derived analytical conditions and confirm that the proposed gradient-velocity method guarantees robust aperiodic stability within the admissible parameter region.

The analysis was carried out for representative values of the uncertain parameter μ within the admissible parameter interval determined by inequality (12). The verification was performed by analyzing the behavior of system trajectories and evaluating the sign of the Lyapunov function derivative. According to the theoretical stability condition, the derivative of the Lyapunov function must remain strictly negative for all admissible parameter values, which guarantees monotonic convergence of system states [5, 6].

In addition, the obtained results demonstrate the absence of oscillatory components in the transient response. This property confirms the aperiodic character of the system dynamics and distinguishes the proposed approach from classical stability criteria that only guarantee asymptotic convergence without controlling transient process properties [2, 8].

The numerical verification also confirms the consistency between theoretical analytical inequalities and practical system behavior. The derived stability conditions therefore provide a reliable analytical tool for evaluating robust stability of linear control systems under parametric uncertainty.

The obtained results are consistent with recent studies on robust stability analysis of uncertain control systems and demonstrate the effectiveness of Lyapunov-based approaches for stability verification [11, 17]. At the same time, the proposed gradient-velocity framework provides a clearer interpretation of admissible parameter regions compared with traditional matrix-based stability criteria.

Discussion

The analytical results obtained in this study demonstrate that the proposed gradient-velocity method provides improved interpretation of stability properties compared with classical Lyapunov-based approaches. In particular, the developed method allows the derivation of explicit analytical conditions defining admissible parameter regions and ensuring monotonic transient behavior.

The simulation results presented in Figure 2 additionally demonstrate that the proposed analytical conditions remain valid throughout the entire uncertainty interval and accurately predict the qualitative behavior of transient responses.

To highlight the methodological advantages of the proposed approach, a comparison with classical Lyapunov stability analysis is presented in Table 1.

Table 1 – Comparative characteristics of classical and gradient-velocity stability approaches

Criterion	Classical Lyapunov approach	Gradient-velocity method
Type of stability	Asymptotic	Aperiodic robust
Oscillation elimination	Not guaranteed	Structurally guaranteed
Overshoot control	Possible	Eliminated under derived conditions
Stability region representation	Implicit (matrix inequality)	Explicit analytical interval
Behavior near uncertainty boundary	Possible degradation	Qualitative monotonicity preserved

The comparative characteristics summarized in Table 1 indicate that, unlike classical asymptotic stability criteria, the gradient-velocity method explicitly guarantees aperiodic behavior of system trajectories. While traditional Lyapunov approaches ensure convergence of system states, they do not eliminate oscillatory modes in a structural manner.

In contrast, the proposed method enforces strict negativity of the Lyapunov function derivative within the admissible parameter region, which leads to monotonic convergence of state trajectories without overshoot. This property is particularly important for control systems operating under parametric uncertainty, where oscillatory transient processes may reduce robustness and system performance [5-7].

Conclusion and outcomes

A gradient-velocity method for analyzing aperiodic robust stability of linear control systems under parametric uncertainty has been developed.

An explicit inequality-based condition defining the admissible parameter interval was derived. The obtained analytical results ensure strict negativity of the Lyapunov function derivative and guarantee monotonic decay of state trajectories without oscillations or overshoot.

Numerical verification confirmed the consistency between theoretical inequalities and system behavior within the admissible parameter domain.

The comparative analysis demonstrated that the proposed approach provides improved analytical transparency and enhanced transient performance compared to classical asymptotic stability criteria.

The developed method may be applied in robust control design problems requiring guaranteed aperiodic behavior under parameter uncertainty.

These results complement existing studies on robust control and stability analysis of uncertain systems [2, 11].

References

1. Klapp S.H.L. Introduction to focus issue: Control of self-organizing nonlinear systems / S.H.L. Klapp, A. Zakharova, I. Schneider // Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science. – 2024. – Vol. 34, № 1. – Art. 010402. https://doi.org/10.1063/5.0195548.
2. Novel robust stability criteria for Lur'e systems with time-varying delay / W. Wang et al // Mathematics. – 2024. – Vol. 12, № 4. – Art. 583. https://doi.org/10.3390/math12040583.
3. Zhou X.-Z. Robust stability analysis for uncertain systems with time-varying delay via variable augmentation approach / X.-Z. Zhou, J. An, Y. He // International Journal of Robust and Nonlinear Control. – 2024. – Vol. 34, № 9. – P. 5590-5604. https://doi.org/10.1002/rnc.7535.
4. Bernstein D.S. Robust stability and performance analysis for state-space systems via quadratic Lyapunov bounds / D.S. Bernstein, W.M. Haddad // SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications. – 1990. – Vol. 11, № 2. – P. 239-271.
5. Khalil H.K. Nonlinear Systems / H.K. Khalil. – 3rd ed. – Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002. – 750 p.
6. Skogestad S. Multivariable Feedback Control: Analysis and Design / S. Skogestad, I. Postlethwaite. – 2nd ed. – Chichester: John Wiley & Sons, 2005. – 592 p.
7. Seuret A. Stability of linear systems with time-varying delays using Bessel-Legendre inequalities / A. Seuret, F. Gouaisbaut // IEEE Transactions on Automatic Control. – 2018. – Vol. 63, № 1. – P. 225-232. https://doi.org/10.1109/TAC.2017.2724509.
8. Overview of recent advances in stability of linear systems with time-varying delays / X.M. Zhang et al // IET Control Theory & Applications. – 2019. – Vol. 13, № 1. – P. 1-16. https://doi.org/10.1049/iet-cta.2018.5003.

9. Park J.M. Finite-interval quadratic polynomial inequalities and their application to time-delay systems / J.M. Park, P.G. Park // Journal of the Franklin Institute. – 2020. – Vol. 357. – P. 4316-4327. https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2020.02.021.
10. Tian Y. Stability and stabilisation for time-varying delay systems based on flexible augmented Lyapunov–Krasovskii functional / Y. Tian, Z. Wang, C. Wang // International Journal of Control. – 2024. – Vol. 97, № 4. – P. 714-727. https://doi.org/10.1080/00207179.2023.2183456.
11. Zeng H.B. Hierarchical stability conditions of systems with time-varying delay / H.B. Zeng, Z.L. Zhai, W. Wang // Applied Mathematics and Computation. – 2021. – Vol. 404. – Art. 126226. https://doi.org/10.1016/j.amc.2021.126226.
12. Xue H. Robust stability of switched interconnected systems with multiple time delays and switching uncertainties / H. Xue, X. Yang // AIMS Mathematics. – 2025. – Vol. 10, № 8. – P. 18356-18380.
13. Leader-to-formation stability of multi-agent systems: An adaptive optimal control approach / W. Gao et al // IEEE Transactions on Automatic Control. – 2018. – Vol. 63, № 10. – P. 3581-587. https://doi.org/10.1109/TAC.2018.2798807.
14. A new approach for synthesis of the control system by gradient-velocity method of Lyapunov vector functions / M. Beisenbi et al // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. – 2021. – Vol. 99, № 2. – P. 381-392.
15. Beisenbi M. Approach to the synthesis of an aperiodic robust automatic control system based on the gradient-speed method / M. Beisenbi, S. Kaliyeva // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2023. – Vol. 1, № 3(121). – P. 6-14. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.274512.
16. Self-organizing control systems for nonlinear spacecraft in the class of structurally stable mappings / O. Abdiramanov et al // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. – 2023. – Vol. 14, № 11. https://doi.org/10.14569/IJACSA.2023.0141108.
17. Erulanova A. Study of robust stability and quality of the two-channel control system / A. Erulanova, G. Shadrin, N. Arinova // Proceedings of the IEEE International Conference on Application of Information and Communication Technologies. – 2016.

М.Ә. Бейсенби[1], А.Ә. Әуелбаева[1,2]*, В.В. Никулин[3], С.Ш. Бейсембина[4]
[1]Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
010008, Қазақстан Республикасы, Астана қ., Сәтбаев к-сі, 2
[2]Astana IT University,
010000, Қазақстан Республикасы, Астана, Мәңгілік Ел даңғылы. С1
[3]Нью-Йорк штатының Бингемтон мемлекеттік университеті,
Бингемтон, Нью-Йорк, 13902, Америка Құрама Штаттары
[4]Nazarbayev University,
010000, Қазақстан Республикасы, Астана қ., Қабанбай батыр даңғылы, 53
*e-mail: aauelbayeva@gmail.com

СЫЗЫҚТЫ БАСҚАРУ ЖҮЙЕЛЕРІНІҢ АПЕРИОДТЫ РОБУСТТЫ ТҰРАҚТЫЛЫҒЫН ТАЛДАУҒА АРНАЛҒАН ГРАДИЕНТТІК ЖЫЛДАМДЫҚ ӘДІСІ

Бұл жұмыста параметрлік белгісіздік жағдайында сызықты басқару жүйелерінің апериодты робусты тұрақтылығын талдауға арналған градиенттік жылдамдық әдісі ұсынылған. Ұсынылған тәсіл Ляпунов тұрақтылық теориясын кеңейтіп, күй векторының жылдамдық сипаттамаларын ескеруге мүмкіндік береді. Бұл жүйе динамикасын неғұрлым дәл сипаттауға жағдай жасайды.

Классикалық матрицалық Ляпунов әдістері мен сызықтық матрицалық теңсіздіктерге негізделген тәсілдерден айырмашылығы, ұсынылған әдіс тұрақтылық шарттарын векторлық Ляпунов функциялары негізінде алынған айқын аналитикалық теңсіздіктер түрінде береді.

Алынған нәтижелер параметрлердің рұқсат етілген аймақтарын анықтауға мүмкіндік береді, бұл күй траекторияларының тербеліссіз және артық реттелусіз монотонды түрде жинақталуын қамтамасыз етеді.

Ұсынылған әдіс робусты басқару жүйелерін жобалауда тиімді қолданылуы мүмкін және Ляпуновтың тікелей әдісінің геометриялық түсіндірмесін кеңейтеді.

Түйін сөздер: *апериодты тұрақтылық; робусты тұрақтылық; градиенттік жылдамдық әдісі; Ляпунов функциялары; сызықты жүйелер; параметрлік белгісіздік.*

М.А. Бейсенби[1], А.А. Ауелбаева[1,2]*, В.В. Никулин[3], С.Ш. Бейсембина[4]
[1]Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева,
010008, Республика Казахстан, г. Астана, ул. Сатпаева, 2
[2]Astana IT University,
010000, Республика Казахстан, Астана, проспект Мәңгілік Ел. С1
[3]Государственный университет Нью-Йорка в Бингемтоне,
Бингемтон, Нью-Йорк, 13902, Соединенные Штаты Америки
[4]Nazarbayev University,
010000, Республика Казахстан, г. Астана, пр. Кабанбай батыра, 53
*e-mail: aauelbayeva@gmail.com

МЕТОД ГРАДИЕНТНОЙ СКОРОСТИ ДЛЯ АНАЛИЗА АПЕРИОДИЧЕСКОЙ РОБУСТНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

В работе разработан метод градиентной скорости для анализа апериодической робастной устойчивости линейных систем управления в условиях параметрической неопределенности. Предложенный подход расширяет классическую теорию устойчивости Ляпунова за счет учета скоростных характеристик вектора состояния, что позволяет более детально описывать динамику системы. В отличие от традиционных матричных методов Ляпунова и методов линейных матричных неравенств (LMI), предложенный метод формулирует условия устойчивости в виде явных аналитических неравенств, полученных на основе векторных функций Ляпунова.

Полученные условия позволяют определить допустимые области параметров, обеспечивающие монотонную сходимость траекторий состояния к равновесию без колебаний и перерегулирования. Критерии устойчивости получены для систем с одним входом и одним выходом, а также для многомерных систем. Численное моделирование подтверждает теоретические результаты и демонстрирует эффективность предложенного метода.

Разработанный подход расширяет геометрическую интерпретацию прямого метода Ляпунова и может быть использован при проектировании робастных систем управления с гарантированным апериодическим характером переходных процессов.

Ключевые слова: *апериодическая устойчивость; робастная устойчивость; метод градиентной скорости; функции Ляпунова; линейные системы управления; параметрическая неопределенность.*

Information about the authors

Mamyrbek Aukebayuly Beisenbi – Professor, Doctor of Technical Sciences, Department of Systems Analysis and Control, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; e-mail: beisenbi_ma@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2109-4512.

Akerke Adilkhanovna Auyelbayeva* – PhD Doctoral Student in the educational program «Automation and Control», Department of Systems Analysis and Control, L.N. Gumilyov Eurasian National University; Lecturer, Higher School of Intelligent Systems, Astana IT University, Astana, Kazakhstan; e-mail: aauelbayeva@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-0433-1075.

Vladimir Vladimirovich Nikulin — PhD, Professor, State University of New York at Binghamton, United States of America, Binghamton, NY 13902. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6504-8270.

Saltanat Shamshiyevna Beisembina – Registrar and General Director for Academic Affairs, Nazarbayev University, Astana, Kazakhstan; e-mail: Saltanat.Shamshiyeva@nu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4482-8531.

Авторлар туралы мәлімет

Мамырбек Әукебайұлы Бейсенби – техника ғылымдарының докторы, профессор, «Жүйелік талдау және басқару» кафедрасы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: beisenbi_ma@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2109-4512.

Акерке Әділханқызы Әуелбаева* – «Автоматтандыру және басқару» білім беру бағдарламасы бойынша докторант PhD, «Жүйелік талдау және басқару» кафедрасы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті; «Astana IT University» Зияткерлік жүйелер жоғары мектебінің оқытушысы, Қазақстан Республикасы; e-mail: aauelbayeva@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-0433-1075.

Владимир Владимирович Никулин – PhD, профессор, Нью-Йорк штатының Бингемтон мемлекеттік университеті (State University of New York at Binghamton), Америка Құрама Штаттары, Binghamton, NY 13902. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6504-8270.

Салтанат Шамшиевна Бейсембина – академиялық істер жөніндегі тіркеуші және бас директор, Назарбаев Университеті, Астана, Қазақстан Республикасы; e-mail: Saltanat.Shamshiyeva@nu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4482-8531.

Сведения об авторах

Мамырбек Аукебайулы Бейсенби – профессор, доктор технических наук кафедры «Системного анализа и управления», Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Республика Казахстан; e-mail: beisenbi_ma@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2109-4512.

Акерке Адилхановна Ауелбаева* – докторант PhD по образовательной программе «Автоматизация и управление» кафедры «Системного анализа и управления», Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева; преподаватель Высшей школы интеллектуальных систем, Astana IT University, Республика Казахстан. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-0433-1075.

Владимир Владимирович Никулин – PhD, профессор Государственного университета штата Нью-Йорк в Бингемтоне (State University of New York at Binghamton), Соединенные Штаты Америки, Binghamton, NY 13902. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6504-8270.

Салтанат Шамшиевна Бейсембина – регистратор и генеральный директор по академическим делам, Назарбаев Университет, Астана, Республика Казахстан; e-mail: Saltanat.Shamshiyeva@nu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4482-8531.

Received 30.03.2026
Revised 29.05.2026
Accepted 02.06.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-2

BY 4.0
Check for updates

ҒТАХР: 10.23.01

Н.А. Модовов[1], Н.О. Мекебаев[1,2*], А.Б.Тлеубаева[3], Ө.М.Белғожа[2], І.Садықжан[2]
[1]әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,
050040, Қазақстан, Алматы қ., әл-Фараби даңғылы, 71
[2]Қазақ ұлттық қыздар педагогикалық университеті,
050000, Қазақстан, Алматы қ., Гоголь көшесі, 114
[3]Шәкәрім университеті,
071412, Қазақстан, Семей қ., Глинка көшесі 20 А
*e-mail: nurbapa80@gmail.com

КРИПТОГРАФИЯЛЫҚ ХАТТАМА: ИНТЕРАКТИВТІ ЕМЕС НӨЛДІК ЖАРИЯ ЕТІЛГЕН ДӘЛЕЛДЕМЕЛЕРДІҢ ЕСЕПТЕУ КҮРДЕЛІЛІГІН ТАЛДАУ

Аңдатпа: *Бұл мақалада интерактивті емес нөлдік жария етілген дәлелдемелердің есептеу күрделілігін ресми тұрғыдан және асимптоталық талдау қарастырылады. Интерактивті емес нөлдік жария етілген дәлелдемелер дәлелдеушіге белгілі бір хабарламаның дұрыстығын, осы хабарламаны тексерушіге қосымша ақпараттарды жасырын дәлелдеуге мүмкіндік береді. Үйлестірілген жүйелерде жиі пайдаланылады. Зерттеуімізде интерактивті емес нөлдік жария етілген дәлелдемелердің сұлбаларының алғашқы базалық мәндер CRS моделында қарастырылады. Есептеу күрделілігін бағалауда негізігі базалық мәндер есебінде дәлелдеу және тексеру куәгердің өлшемі, дәлелдеу көлемі және алгоритмнің уақыт күрделілігі есептелінеді. Көпмүшелік есептеу моделі арқылы алгоритмдердің тиімділігі талданады. Тексеруші алгоритм күрделілігі және дәлелденушінің есептеу күрделілігі дәлдеменеің ұзындығымен анықталады. Дәлелдемелердің асимптоталық көрсеткіштер олардың қолданбалы нәтижелерге әсері зерттеледі. Нәтижелер негізінде интерактивті емес нөлдік жария етілген дәлелдемелердің айырмашылықтары мен ұқсастықтарын талдаудың әдіснамалық негізін және жоғары есептеу өнімділігі бар криптографиялық хаттамаларды жасауды қамтамасыз етеді.*

Талдау нәтижелері көрсеткендей алгоритмдердің есептеу күрделілігі куәгердің көрсеткішіне елеулі түрде тәуелдікті, ал дәлелдеудің ұзындығы тексеру алгоритмінің күрделілігін айқындайды. Бұға қоса, дәлелдеменің асимптоталық көлемдері олардың мәліметтер шығынына тигізетін ықпалы талданды. Осы алынған нәтижелер интерактивті емес нөлдік жария етілген дәлелдемелерді айырмашылықтары мен ұқсастықтарын талдау мен есептеу қолайлы криптографиялық хаттамаларды жасау үшін әдіснамалық негіз ретінде қолданылуы мүмкін.

©Н.А. Модовов, Н.О. Мекебаев, А.Б.Тлеубаева, Ө.М.Белғожа, І.Садықжан, 2026

Түйін сөздер: *Дәлдеуші алгоритм, тексеруші алгоритм, интерактивті емес нөлдік жария етілген дәлелдемелер, криптография, есептеу күрделілігі.*

Кіріспе

Қазіргі цифрлық ортада ақпараттарды сақтау және қорғап тұру, қауіпсіздік деңгейін, құпиялықты мүмкіндігінше қамтамасыз ету криптография саласындағы негізгі зерттеу бағыттарының бірі болып қалыптасты. Бұлттық сервистерде, ашық немесе үлестірілген жүйелерде сенімді өзара байланыс орнату барысында қолданушының жеке базалық мәліметтерін, жеке кілттерін немесе өңдеу көрсеткіштерін ашпай-ақ белгілі бір нәтижені растау қажеттілігі туындайды. Осы тұрғыда нөлдік жария етілген дәлелдер криптография саласындағы аса маңызды әрі болашағы айқын құралының бірі болып есептеледі [1].

Нөлдік жарияланатын дәлелдердің басты мәні – дәлелдеуші тексерушіні белгілі бір тұжырымның шынайылығына иландырады, алайда тексеруші дәлелденген тұжырым жайлы қосымша мәліметке ие болмайды. Бұл әдіс стандартты сәйкестендіру тәсілдері мен тексеру тәсілдерінен түбегейлі өзгеше болып келеді және құпиялылықтың жоғары деңгейін сақтауға мүмкіндік береді [2].

Нөлдік жария етілетін дәлелдер көпшілікке ашық және бастапқы айғақтар екіжақты байланысқа негізделген түрде беріледі. Нөлдік жария етілген дәлелдемелер растаушы тараппен тексеруші тарап арасындағы өзара іс-қимылдың бірнеше кезеңдерін қамтиды. Бұл типтегі хаттамалар ғылыми тұжырым тұрғысынан тиімді көрінгенімен,практикада бірқатар шектеулер байқалады. Нақтырақ айтқанда, өзара әрекеттесуші хаттамалар желідегі кідірістерге байланысты, бір мезгілдегі байланысты қажет етеді және кейбір жағдайларда ауқымдылығы жағынан әлсіз болып келеді [3].

Бұл проблемаларды еңсеру мақсатында интерактивті емес нөлдік жарияланатын дәлелдер ұғымы ұсынылды. Интерактивті емес үлгіде дәлелдеуші дәлелдемені бір рет жасайды және оны тексерушіге жібереді, ал тексеруші оны оны тексеретін тарапқа жолдайды, ал тексеретін тарап оны қосымша сұраусыз-ақ тексере береді. Осы әдіс блокчейн технологияларында, цифрлық дауыс беру жүйелерінде, жасырын сәйкестендіруде және құпия операцияларда кең түрде пайдаланылады [4].

Интерактивті емес нөлдік жария етілмейтін дәлелдердің қолданбалы маңызы олардың есептеу және байланыс тиімділігімен тікелей байланысты. Дегенмен оларды құрастыру мен жүзеге асыру барысында зерттеудің басты нысанына айналатын мәселе – тиімділік болып табылады Өйткені интерактивті емес нөлдік жария етілетін дәлелдер хаттамалары негізінен күрделі математикалық құрылымдарға, криптографиялық хэш алгоритмдеріне, эллиптикалық қисықтарға және көпмүшелік уақыттағы есептеулерге негізделеді. Сол себепті мұндай дәлелдердің есептеу қиындығын талдау олардың қауіпсіздік деңгейін, орындалу жылдамдығын және масштабталуын бағалаудың маңызды құрамдас бөлігі болып саналады [5].

Нөлдік жария етілген дәлелдемелер – бұл дегеніміз бір қатысушыға, яғни дәлелдеушіге, екінші қатысушыға, яғни тексерушіге қандай да бір тұжырымның не себепті ақиқат екенін немесе оны қандай деректер дәлелдейтінін ашпай-ақ оның шын екенін растауға мүмкіндік беретін криптографиялық тәсіл. Нөлдік жария етілген дәлелдемелерді қолдану идеясын 1987 жылы алғаш рет Уриэль Фейг, Амос Фиат және Ади Шамир ұсынған. Бұл жағдайда пайдаланушы өзінің жеке кілтін білетінін көрсетеді, ол құпия күйінде сақталады және жария етілмейді. Осылайша олар өз тұлғасын растауға мүмкіндік алады.

Нөлдік жария етілген дәлелдемелердің басты екі категориясы бар: интерактивті және интерактивті емес.

Нөлдік жария етілген дәлелдемелерге тән негізгі үш қасиет міндетті түрде сақталуы тиіс. Бұл қасиеттер жүйенің сенімділігі мен қауіпсіздігін қамтамасыз етуде шешуші рөл атқарады:

Толықтық**:** Егер пайымдау ақиқат болса, дәлелдеуші тексерушіні оның дұрыстығына толықтай сендіре алады.

Дұрыстық: Егер пайымдау жалған болса, тіпті адал емес дәлелдеуші де тексерушіні тек өте төмен ықтималдық жағдайында ғана иландыра алады.

Нөлдік білім: Егер пайымдау рас болса, тіпті сенімсіз тексеруші де оның шын екендігі туралы қосымша ақпарат ала алмайды.

Интерактивті емес нөлдік жария етілген дәлелдемелер (NIZKP) интерактивті нөлдік жария етілген дәлелдемелерден басты айырмашылығы ретінде дәлел ұсынушы мен тексеру жүргізуші тарап арасында өзара байланыс әрекетінің болмауымен сипатталады. Дәлел ұсынушы дербес дәлелді қалыптастырады, оны тексеру жүргізуші тарап кейіннен қосымша байланыссыз-ақ өз бетінше тексере алады. Бұл процесс көбіне өзара әрекеттесетін нөлдік жария етілетін дәлелдерге қарағанда әлдеқайда ұтымды әрі қолайлы болып келеді, себебі бір мезгілде желіге қосылып тұруды немесе бірнеше рет хабарлама алмасуды талап етпейді. Нөлдік жария етілетін дәлелдерге қол жеткізудің кеңінен қолданылатын тәсілдерінің бірі – цифрлық қолтаңбаларға сүйенетін Fiat–Shamir әдісі болып табылады.

Зерттеу әдістері

Аталмыш зерттеу zk-SNAR·K хаттамаларындағы қазіргі алгоритмдерде жиі пайдаланылатын ортақ алғашқы параметрлерге негізделген үлгідегі интерактивті емес нөлдік жария етілген дәлелдемелерді зерттейді [6]. Сондай-ақ, салыстырмалы зерттеу мақсатында сенімді орнатуды талап етпейтін заманауи zk-SNAR·K хаттамалары қарастырылады [7].

Дәлелдеме көлемі мен бақылаудың күрделілік деңгейін талдау кезінде Bulletproofs жүйесінің дәлелдеме ұзындығының логарифмдік тәуелдігі негізделеді [8]. Басым бөлігі zk-SNARK құрылымдарының методологиялық базасы тұрғысынан арифметикалық схмеалар мен квадраттық магистральды бағдарлама модельдері пайдаланылады [9].

Интерактивті емес нөлдік жария етілген дәлелдемелер қауіпсіздік қасиеттері есептеу жағынан сенімді дәлелдемелер тұжырымдамасына негізделген [10]. Ықшам интерактивті емес дәлелдердің ресми сипаттамасы және олардың қауіпсіздік қасиеттерін негіздеу қазіргі криптографиялық зерттеу жұмыстарында маңызды рөл атқарады [11].

Зерттеу қорытындыларын саралауда ықшам интерактивті емес дәлелдерді верификациялаудың нәтижелілігі олардың тәжірибелік маңыздылығы ретінде қаралды [12]. Қауіпсіздік сипаттамаларын беру үшін интерактивті және интерактивті емес дәлелдеу құрылымдарына ресми қауіпсіздік үлгілері қолданылады [13].

Қарастырылып отырған зерттеуде пайдаланылатын есептеу қиындығына қатысты негізгі анықтамалар мен ұғымдар заманауи криптография оқу құралдарында берілген классикалық түсініктерге сүйенген [14]. Бұған қоса, криптографиялық ережелердің өнімділігін бағалаудың стандартты үлгісі ретінде көпмүшелік есептеу моделі алынды [15].

Интерактивті емес нөлдік жария етілген дәлелдемелер және олардың алгоритмдік қиындығы қарастырылып отырған зерттеудің басты нысаны ретінде есептеледі. Аталған зерттеу шеңберінде интерактивті емес нөлдік жария етілген дәлелдемелер схемасы криптографиялық хаттамалар негізінде зерттеліп, олардың тексеруші және дәлел ұсынушы тараптарындағы есептеу шығындары формальды түрде талданады.

Интерактивті емес нөлдік жария етілген дәлелдемелер схемасы келесі үш алгоритм тұратын жиынтығы ретінде формальді түрде анықталады:

$$NIZK = (\cdot Setup \cdot, \cdot Verify \cdot, \cdot Prove \cdot)$$

мұндағы: $Prove$ – куәгердің негізінде дәлелдеу құратын алгоритм; $Setup$ – жалпы бастапқы параметрлерді генерациялау алгоритмі; $Verify$ – тексеруші дәлелдеменің дұрыстығы мен жарамдылығын тексеруді жүзеге асыратын алгоритм.

Осы зерттеуімізде жоғарыдағы алгоритмдердің тиімділіктің көпмүшелік тиімді есептеу моделі ауқымында қарасытырлады. Яғни, нөлдік қосындысы бар интерактивті емес дәлелдеу және тесеру алгоритмдерінің орындалу уақыты есептің кіріс деректерінің өлшемінен көпмүшелік функциямен шектеледі. Мұндай модель криптографиялық хаттамалардың практикалық іске асырылуын қамтамасыз ететін стандартты есептеу моделі болып табылады. Формальді түрде төмендегідей жазылады:

$$P(m) \in Q(poly(n))$$

Есептеу күрделілігін бағалау әдісі

Бұл зерттеу жұмысында дәлелдеу механизмнің уақыттық $|m|$ тапсырмасының өлшеміне және $|w|$ куәгерінің өлшеміне тәуелді ретінде қарастырылады, ал тексеру механизмінің күрделілігі $|\pi|$ дәлелінің ұзындығымен сипатталады. Интерактивті емес нөлдік жария етілген дәлелдемелер схемамсы үшін $|w|$ және $|\pi|$ ұпайлары есептің өлшеміне қатысты көпмүшеліктермен шектелуі керек.

Классикалық түрде дәлелдеуші алгоритмнің уақыты келесідей есептеледі:

$$P_T = P_T(m, |w|)$$

дәлелденушінің уақыттық күрделілігі есептің өлшеміне m, куәгердің өлшеміне $|w|$ тәелді. Осыны ескере отырып келесідей жазамыз:

$$P_T(m, |w|) \in Q(poly(m, +|w|))$$

мұндағы $|w|$ дәлелдеушіге түсетін негізгі жүктемені сипаттайды.

Дәлелдеме өлшемдері мен куәгерге қойылатын талаптар келсідей. Интерактивті емес нөлдік жария етілген дәлелдемелер, NP – класына жататын есептеулер үшін құрылады.

$$y \in K \leftrightarrow \exists w : R(y, w) = 1$$

мұндағы R – көпмүшелік уақытта тексерілетін қатынас. Осы анықтамаға сәйкес куәгердің өлшемі есептің өлшеміне қатысты көпмүшелікпен шектелуыі тиіс:

$$|w| \leq poly\ (m)$$

Сол сияқты дәлелдеменің ұзындығы да есептің өлшеміне қатысты көпмүшелікпен шектеледі:

$$|\pi| \leq poly\ (m)$$

Келесіде біздер зерттеуде дәлелдеушінің есептеу күрделілігі мен тексерушінің есептеу күрделілігін, дәлелдеме өлшемінің асимптоталық бағалауды қарастыратын боламыз.

Дәлелдеушінің есептеу күрделілігі осы схеманың нақты құрылымына байланыстыда өзгереді. Көпмүшелік міндеттемелер мен арифметикалық схемаларға негізделген интерактивті емес нөлдік жария етілген дәлелдемелер жүйелерінде дәлелдеуші көпмүшелікті интерполяциялайды, хэш функциялары есептеулер мен топтық операцияларды орындайды (Кесте 1). 1 – ші формулада дәлелдеушіге түсетін жүктеменің негізгі шектеуші фактор екенін көрсетеді.

$$P_T(m) = \begin{cases} Q(m^2), & zk - SNARK \\ Q(m\ logm), & zk - SNARK, Bulletpoofs \end{cases}$$

Тексеру алгоритмі есептеу күрделілігі, тексеру алгоритмі әдетте ықшам және жылдам болады.

$$P_V(m) = \begin{cases} Q(1), & zk - SHARK, \quad Grotth16 \\ Q(logm), & zk - STARK \\ Q(m), & Bulletpoofs \end{cases}$$

Дәлелдеме өлшемінің асимптотикалық бағалауы келесідей сипатталады.

$$|\pi| = \begin{cases} Q(1), & \text{қысқа дәлелдемелер} \\ Q(logm), & \text{орташа} \\ Q(m), & \text{үлкен дәлелдемелер} \end{cases}$$

Дәлелдемелер көлемінің ұлғаюы байланыс шығындарының өсуіне әкеледі.

Кесте 1 – Интерактивті емес нөлдік жария етілген дәлелдемелердің түрлері бойынша салыстырмалы кесте

Дәледемелердің түрлері	Setup моделі	$P_T(m)$	$P_V(m)$	Дәлелдеме өлшемі
$zk - SHARK$	CRS (сенімді)	$Q(m^2)$	$Q(1)$	Өте қысқа
$Grotth16$	CRS (сенімді)	$Q(m)$	$Q(1)$	Қысқа
$zk - STARK$	Орнатусыз	$Q(m\ logm)$	$Q(logm)$	Үлкен
$Bulletpoofs$	Орнатусыз	$Q(m\ logm)$	$Q(m)$	Орташа

Осы бөлімде теориялық асимтоталық бағалауларға сүйене отырып есептеу күрделілігі талданып, нәтиже көрсетеді.

Тізбектелген өңдеу платформасы параллелді есептеу мүмкіндіктері және іс жүзінде қолдануда тиімді әдістері ескеріліп қарастырылмаған. Соған қарамастан ұсынылған интерактивті емес нөлдік жария етілген дәлелдемелердің үлгілерінің өнімділігін салыстырмалы талдау үшін айтарлықтай теориялық базасын қамтамасыз етеді.

Нәтижелер мен талқылаулар

Зерттеуде интерактивті емес нөлдік дәлелдердің есептеуіш күрделілігі формальді түрде талданып, негізделген теориялық тұжырымдарға қол жеткізілді. Зерттеу әдістемесінде ұсынылған модель негізінде тексеру және дәлелдеу алгоритмдерінің есептеу күрделілігі асимтоталық түрде бағаланып, олардың арасындағы айырмашылық негізделді.

Зерттеу аясында интерактивті емес нөлдік жария етілген дәлелдемелердің есептеуіш күрделілігі полиномиалды уақыт моделінде формальді түрде талданып, бағаланды. Зерттеу барысында дәлелдеуші және тексеруші алгоритмдердің есептегіш күрделілігіне әсер ететін негізгі айнымалылар факторлық талдау арқылы анықталды.

Дәлдеушінің яғни дәлелдеуші алгоритмінің уақытша күрделілігі кіріс мәліметтерінің өлшемі (m) мен куәгердің ұзындығының $(|w|)$ көпмүшелік функциясымен шектелген, яғни интерактивті емес нөлдік жария етілген дәлелдеме жүйесінің дәлелдеуші алгоритмі полиномиалды уақытта жұмыс істейді.

$$\mathrm{C}_{\text{дәлелдеуші}} = poly\,(m) \cdot poly\,(|w|)$$

Дәлелдеушінің есептеуіш күрделілігі (m) мен $(|w|)$ параметрлеріне қатысты көпмүшелік шектеуде, атап айтқанда $poly\,(m), (|w|)$ функциясымен бағаланады. Бұл дәлелдеме құрастыру процесінің теориялық тұрғыдан тиімділігін және кіріс деректерінің көлеміне тәуелділіктің экспоненциалды түрде өспейтіндігін айқындайды.

Интерактивті емес нөлдік жария етілген дәлелдемелер NP толық есептер үшін анықталады, мұндағы куәгер $|w|$ кіріс өлшемі n – нен көпмүшелік тәелділікте шектелген.

$$|w| \leq \cdot poly\,(n\cdot)$$

Осы шарт дәлелдеуші алгоритмінің полиномалды уақыттық күрделілігінің *n*-ге тәуелді көпмүшелілік функциясымен шектелуіне жеткілікті.

$$\mathrm{C}_{\text{дәлелдеуші}} = poly\,(n\cdot)$$

Кіріс өлшемі m және дәлелдеме ұзындығы $|\pi|$ арқылы тексеру алгоритмінің күрделілігі өрнектеп жазуға болады.

$$\mathrm{C}_{\text{тексеруші}} = \cdot poly\,(m|\pi|)$$

Қолданбалы интерактивті емес нөлдік жария етілген дәлелдемелер хаттамаларында есептеу күрделілігі көбінесе логорифмдік немесе сызықтық өсу қарқынмен сипатталады.

π дәлелдеме үшін осы шартты орындауға болады.

$$|\pi| = \cdot \mathrm{O}\left(m^k\right),\ \ k \in N$$

Көпмүшелік шектеулілік қасиетін сақтайды, дәлелдеме ұзындығы кіріс деректерінің өлшеміне байланысты болғанда. Осы нәтиже кіріс өлшемі артқан сайын экспонециалды өсімнің болмауы коммуникативті күрделіліктің теориялық тұрғыдан тиімділігін айғақтайды.

Алынған нәтижелер тексеру және дәлелдеу алгоритмдерінің есептеу күрделілігі басқаша екенін көрсетеді. Дәлелдеу алгоритмнің есептеу жүктемесі салыстырмалы түрде жоғары, өйткені ол куәгердің мөлшеріне байланысты, ал алгортимді тексерушінің алгоритмі тек дәлелдеу мөлшеріне байланысты және айтарлықтай жеңіл болып табылады:

$$P_{Prove} \gg P_{Verify}$$

Бұл қасиет интерактивті емес нөлдік жария етілген дәлелдерді көп тексеруші жүйелер үшін пайдалы етеді.

Ресми талдау нәтижесінде өзара әрекеттесуге қатысты қатысы жоқ нөлдік жария етілген дәлелдемелердің барлық негізгі параметрлері көпмүшелік шегінде қалатыны анықталды:

$$P_{Prove}, P_{Verify}, |w|, |\pi| \leq poly\,(m)$$

Бұл нәтиже интерактивті емес нөлдік жария етілген дәлелдемелердің теориялық тұрғыдан тиімді және іс жүзінде қолданылатын криптографиялық механизмдер екенін көрсетеді.

Нәтижелер интерактивті емес нөлдік дәлелдемелерде дәлелдеуші мен тексеруші арасында есептеу жүктемесінің асимметриясы бар екенін көрсетті және бұл асимметрия жүйелерді масштабтау кезіндң маңызды артықшылық береді.

Қорытынды

Бұл мақалада көпмүшелік моделі аясында нөлдік қосындысы бар инерактивті емес нөлдік жария етілген дәлелдемелердің есептеу күрделілігі жан-жақты талданды. Зерттеу аясында инерактивті емес нөлдік жария етілген дәлелдемелердің схемаларының ресми моделі қарастырылып, дәлелденуші мен тексерушінің алгоритмдерінің есептеу шығындарына әсер ететін негізгі параметрлерді анықтайды.

Нәтижелер дәлелдеу алгоритмінің есептеу күрделілігі есептің өлшеміне және куәгердің өлшеміне байланысты екенін көрсетеді. Егер куәгердің мөлшері тапсырманың көлеміне қатысты көпмүшемен шектелсе, дәлелдемелерді құру процесі теориялық тұрғыдан тиімді. Бұл интерактивті емес нөлдік жария етілген дәлелдемелердің NP-класына қиын тапсырмалар үшін қолайлы екенін растайды.

Тексеруші алгоритмінің есептеу күрделілігі дәлелдеменің ұзындығына байланысты және көп жағдайда сызықтық немесе логарифмдік сипатта болатындығы анықталды. Бұл қасиет интерактивті емес нөлдік жария етілген дәлелдемелердің схемаларын көп тексерушісі бар бөлінген жүйелерде қолданысқа жарамдылығы, өнімділікті төмендетпей көлемді ұлғайтуды қолдану.

Талдау нәтижелері дәлелдеуші мен тексеру алгортимдерінің есептеуіш күрделілігінде айтарлықтай ассиметриялы екені анықталды. Дәлелдеушіге сәйкесінше жоғары есептеуіш күрделілікті арттырып, тексеру алгоритмі үйлесімді жүйенің жалпы өнімділігін арттыруға мүмкіндік береді. Бұл мүмкіндік электронды дауыс беру, аноноимді аутентификация құралдарында, блокчейн экожүйелерінде интерактивті емес нөлдік жария етілген дәлелдемелерін қолдануға негіз бола алады.

Жалпы алғанда жүргізілген ресми талдау интерактивті емес нөлдік қосынды дәлелдемелердің есептеу күрделілігі негізгі параметрлер бойынша көпмүшелік шегінде қалатынын көрсетті. Алынған нәтижелер қауіпсіз және масштабталатын криптографиялық хаттамаларды әзірлеудің теориялық негізі ретінде пайдалануы мүмкін. Нақты бағдарламалық жасақтаманы, аппараттық жеделдету әдістерін және эмпирикалық өнімдік көрсеткіштерін зерттеу болашық зерттеулердің өзекті бағыты болып табылады.

Әдебиеттер тізімі

1. How to Prove All NP Statements in Zero-Knowledge and a Methodology of Cryptographic Protocol Design – Oded Goldreich, Silvio Micali & Avi Wigderson. Advances in Cryptology. – CRYPTO’86, Lecture Notes in Computer Science. – 1987. – Vol. 263. – P. 171-185. https://doi.org/10.1007/3-540-47721-7_11.
2. Fiat A. How to Prove Yourself: Practical Solutions to Identification and Signature Problems / A. Fiat, A. Shamir // Advances in Cryptology - CRYPTO’86, LNCS 263, Springer. – 1987. https://doi.org/10.1007/3-540-47721-7_12.
3. Goldwasser S. The Knowledge Complexity of Interactive Proof Systems / S. Goldwasser, S. Micali, C. Rackoff // SIAM Journal on Computing. – 1989. – № 18(1). https://doi.org/10.1137/0218012.
4. Manuel B. Non-Interactive Zero-Knowledge and Its Applications / B. Manuel, P. Feldman, S. Micali // STOC ’88, ACM. – 1988. https://doi.org/10.1145/62212.62222.
5. Bellare M. Random Oracles Are Practical: A Paradigm for Designing Efficient Protocols / M. Bellare, P. Rogaway // ACM CCS. – 1993. https://doi.org/10.1145/168588.168596.
6. Groth J. On the Size of Pairing-Based Non-interactive Arguments. Advances in Cryptology / J. Groth // EUROCRYPT. – 2016, LNCS 9665. https://doi.org/10.1007/978-3-662-49896-5_11.
7. Scalable, Transparent, and Post-Quantum Secure Computational Integrity / E. Ben-Sasson et al // IACR Cryptology ePrint Archive. – 2018. https://eprint.iacr.org/2018/046.
8. Bulletproofs: Short Proofs for Confidential Transactions and More / Benedikt Bünz et al // IEEE Symposium on Security and Privacy. – 2018. https://doi.org/10.1109/SP.2018.00020.
9. Quadratic Span Programs and Succinct NIZKs without PCPs / R. Gennaro et al // Advances in Cryptology – EUROCRYPT. – 2013. https://doi.org/10.1007/978-3-642-38348-9_35.

10. Micali S. Computationally Sound Proofs / S. Micali // SIAM Journal on Computing. – 2000. – № 30(4). https://doi.org/10.1137/S0097539795284959.
11. From Extractable Collision Resistance to Succinct Non-Interactive Arguments of Knowledge / N. Bitansky et al // ITCS. – 2012. https://doi.org/10.1145/2090236.2090263.
12. Succinct Non-Interactive Arguments / A. Chiesa et al // IACR Cryptology ePrint Archive. – 2012. https://doi.org/10.1007/978-3-642-40041-4_9.
13. Adaptive Security for Interactive Proofs / R. Canetti et al // TCC. – 2002. https://doi.org/10.1007/978-3-642-40041-4_9.
14. Katz J. Introduction to Modern Cryptography / J. Katz, Y. Lindell // Chapman and Hall/CRC. – 2014. https://doi.org/10.1201/9781351133036.
15. Boneh D. A Graduate Course in Applied Cryptography / D. Boneh, V. Shoup // Draft textbook. – 2020. https://crypto.stanford.edu/~dabo/cryptobook/BonehShoup_0_6.pdf.

Н.А. Модовов[1], Н.О. Мекебаев[1,2*], А.Б. Тлеубаева[3], О.М. Белгожа[2], І. Садыққан[2]
[1]Казахский национальный университет имени аль-Фараби,
050040, Казахстан, г. Алматы, пр. аль-Фараби, 71
[2]Казахский национальный женский педагогический университет,
050000, г. Алматы, Казахстан, ул. Гоголь 114 к1
[3]Шәкәрім университет,
071412, Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А
*e-mail: nurbapa@gmail.com

АНАЛИЗ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СЛОЖНОСТИ НЕИНТЕРАКТИВНЫХ ДОКАЗАТЕЛЬСТВ С НУЛЕВЫМ РАЗГЛАШЕНИЕМ

Настоящая статья посвящена асимптотическому и формальному анализу вычислительной сложности не интерактивных доказательств с нулевым разглашением. Не интерактивные доказательства с нулевым разглашением позволяют доказывающей стороне подтвердить корректность некоторого утверждения проверяющей стороне без раскрытия какой-либо дополнительной информации и широко применяются в распределённых информационных системах. В ходе исследования схемы не интерактивных доказательств с нулевым разглашением рассматривались в модели общих исходных параметров (Common Reference String, CRS). При оценке вычислительной сложности в качестве основных параметров принимались временная сложность алгоритмов доказательства и проверки, размер свидетеля и длина доказательства. Эффективность алгоритмов анализировалась в рамках полиномиальной модели вычислений.
Показано, что вычислительная сложность алгоритма доказательства существенно зависит от размера свидетеля, тогда как сложность алгоритма проверки в основном определяется длиной доказательства. Кроме того, рассмотрены асимптотические оценки размера доказательств и их влияние на коммуникационные издержки. Полученные результаты могут быть использованы в качестве теоретической основы для сравнительного анализа не интерактивных доказательств с нулевым разглашением и разработки криптографических протоколов с высокой вычислительной эффективностью.

Ключевые слова: *не интерактивные доказательства с нулевым разглашением, криптография, алгоритмы доказательства и проверки, полиномиальное время, вычислительная сложность.*

N. Modovov[1], N. Mekebayev[1,2*], A. Tleubayeva[3], O. Belgozha[2], I. Sydykzhan[2]
[1]Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan,
050040, 71 Al-Farabi Ave., Almaty, Kazakhstan
[2]Kazakh National Women's Teacher Training University,
050000, 114 Gogol St., Almaty, Kazakhstan
[3]Shakarim University,
071412, 20A Glinka St., Semey, Kazakhstan
*e-mail: nurbapa@gmail.com

This paper is devoted to the asymptotic and formal analysis of the computational complexity of Non-Interactive Zero-Knowledge Proofs (NIZK). Non-interactive zero-knowledge proofs enable a prover to convince a verifier of the validity of a given statement without revealing any additional information and are widely applied in distributed information systems.

In this study, NIZK schemes are considered within the Common Reference String (CRS) model. The evaluation of computational complexity is based on the time complexity of the proving and verification algorithms, the witness size, and the proof length. Algorithmic efficiency is analyzed within the framework of the polynomial-time computational model.

The analysis shows that the computational complexity of the proving algorithm significantly depends on the witness size, whereas the complexity of the verification algorithm is mainly determined by the proof length. Additionally, asymptotic bounds on proof size and their impact on communication costs are examined. The obtained results provide a theoretical foundation for the comparative analysis of non-interactive zero-knowledge proofs and for the development of computationally efficient cryptographic protocols.

Key words: *non-interactive zero-knowledge proofs, cryptography, proving and verification algorithms, polynomial time, computational complexity.*

Авторлар туралы мәліметтер

Нурбол Алимбаевич Модовов – Ақпараттық қауіпсіздік жүйелері білім беру бағдарламасының 1 курс докторанты, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің Алматы, Қазақстан; e-mail: modovov@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-1642-9834.

Нурбапа Отанович Мекебаев* – PhD, Информатика кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Қазақ ұлттық қыздар педагогикалық университеті, Алматы, Қазақстан; e-mail: nurbapa80@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9117-4369.

Аксауле Болатовна Тлеубаева – магистр, Шәкәрім универвитеті, Семей; e-mail: a.tleybaeva@shakarim.kz. ORCID: https://orchid.org/0000-0002-5121-5867.

Өркен Мұратханұлы Белгожа – магистр, Информатика кафедрасының оқытушысы, Қазақ ұлттық қыздар педагогикалық университеті, Алматы Қазақстан; e-mail: orkenbelkoja@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-3231-1413.

Інжу Айдарқызы Сыдықжан – магистр, Қазақ ұлттық қыздар педагогикалық университеті, Алматы; e-mail: inzhusydykzhan@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-8681-8835.

Сведения об авторах

Нурбол Алимбаевич Модовов – докторант 1 курса образовательной программы «Системы информационной безопасности», Al-Farabi Kazakh National University, Алматы, Казахстан; e-mail: modovov@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-1642-9834.

Нурбапа Отанович Мекебаев* – PhD, ассоциированный профессор кафедры информатики, Казахский национальный женский педагогический университет, Алматы, Казахстан; e-mail: nurbapa80@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9117-4369.

Аксауле Болатовна Тлеубаева – магистр, Шәкәрім университет, Семей; e-mail: a.tleybaeva@shakarim.kz. ORCID: https://orchid.org/0000-0002-5121-5867.

Оркен Муратханович Белгожа – магистр, Казахский национальный женский педагогический университет, Алматы; e-mail: orkenbelkoja@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-3231-1413.

Інжу Айдарқызы Сыдықжан – магистр, Казахский национальный женский педагогический университет, Алматы; e-mail: inzhusydykzhan@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-8681-8835.

Information about the authors

Nurbol Modovov – 1st-year PhD doctoral student of the Information Security Systems educational program, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: modovov@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-1642-9834.

Nurbapa Mekebayev* – PhD, Associate Professor, Department of Informatics, Kazakh National Women's Teacher Training University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: nurbapa80@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9117-4369.

Aksaule Tleubayeva – Master's degree holder, Shakarim University, Semey; e-mail: a.tleybaeva@shakarim.kz. ORCID: https://orchid.org/0000-0002-5121-5867.

Orken Belgozha – Master's degree holder, Lecturer of the Department of Computer Science, Kazakh National Women's Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: orkenbelkoja@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-3231-1413.

Inzhu Sydykzhan – Master's degree holder, Kazakh National Women's Teacher Training University, Almaty; e-mail: inzhusydykzhan@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-8681-8835.

Редакцияға енуі 01.06.2026
Өңдеуден кейін түсуі 08.06.2026
Жариялауға қабылданды 17.06.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-3

BY 4.0
Check for updates

МРНТИ: 28.23.37

Р.Б. Абдрахманов[1], Ә.С. Төлеп[2], Д.Р. Сұлтан[3], А.С. Касымбеков[1], А.Б. Нуржанова[4]*
[1]Международный университет туризма и гостеприимства,
161200, Республика Казахстан, г. Туркестан, ул. Рабига Султан Бегим, 14А
[2]Международный казахско-турецкий университет им.Х.А.Ясави,
161200, Республика Казахстан, г. Туркестан, проспект Бекзата Саттарханова, 29
[3]Университет Нархоз,
050035, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Жандосова, 55
[4]Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева,
010008, Республика Казахстан, г. Астана, ул. Сатпаева, 2
*e-mail: nurzhanova_ab@enu.kz

ПОДХОДЫ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ К ОБНАРУЖЕНИЮ КИБЕРБУЛЛИНГА В МНОГОЯЗЫЧНОМ ОНЛАЙН-ТЕКСТОВОМ КОНТЕНТЕ

Аннотация: *В настоящем исследовании проведён системный сравнительный анализ эффективности классических алгоритмов машинного обучения и современных архитектур глубокого обучения для автоматического выявления кибербуллинга в многоязычных онлайн-текстах (русский и казахский языки). Особое внимание уделено сопоставлению методов на основе традиционных признаков (TF-IDF, n-граммы) и моделей, использующих контекстные представления текста. Для казахоязычного корпуса разработана и вручную аннотирована специализированная база данных, обеспечивающая высокую достоверность разметки в условиях низкой ресурсной обеспеченности языка и ограниченного объёма обучающих выборок.*

Экспериментальные результаты показали, что на русскоязычном корпусе наилучшие показатели продемонстрировала модель с механизмом внимания (Attention-based model), достигнув Accuracy 92,1%, F1-score 92,9% и ROC-AUC 0,95. На казахоязычном корпусе данная архитектура также показала лучшие результаты: Accuracy 91,5%, F1-score 92,9% и ROC-AUC 0,94. Рекуррентные модели LSTM и BiLSTM продемонстрировали стабильные показатели в диапазоне 90–91%, тогда как классические алгоритмы машинного обучения уступали по всем основным метрикам качества. Полученные результаты подтверждают эффективность глубокого обучения для выявления кибербуллинга в многоязычных текстах.

Работа подчёркивает важность интеграции мультимодальных и интерпретируемых подходов, расширения языковых ресурсов, а также применения transfer learning и предобученных языковых моделей для повышения устойчивости и точности классификации. Полученные результаты имеют практическую значимость для систем интеллектуальной модерации контента, обеспечения цифровой безопасности и раннего выявления рисков психологического состояния пользователей в онлайн-среде.

Ключевые слова: *кибербуллинг, многоязычный текст, глубокое обучение, рекуррентные нейронные сети, механизм внимания.*

Введение

Современная цифровая среда характеризуется быстрым ростом пользовательского контента в социальных медиа, что, наряду с расширением коммуникационных возможностей, способствует распространению кибербуллинга. Автоматическое выявление таких проявлений осложняется высокой лингвистической вариативностью (сленг, эмодзи, сарказм, код-свитчинг) и морфологической сложностью языков, особенно в условиях низкоресурсности казахского языка и ограниченности размеченных данных.

В этих условиях ключевую роль играют методы машинного и глубокого обучения. Классические алгоритмы обеспечивают базовую классификацию, однако ограничены в учёте контекста, тогда как современные нейросетевые архитектуры (RNN, CNN, Attention) эффективно выявляют сложные семантические зависимости в эмоционально окрашенных текстах.

©Р.Б. Абдрахманов, Ә.С. Төлеп, Д.Р. Сұлтан, А.С. Касымбеков, А.Б. Нуржанова, 2026

Целью работы является разработка и сравнительный анализ таких методов для выявления кибербуллинга в русскоязычных и казахоязычных текстах с использованием процедур предобработки и метрик оценки (accuracy, recall, F1-score, ROC-AUC). Исследование направлено на создание устойчивого и переносимого подхода для задач автоматической модерации и цифровой безопасности.

В ряде исследований подтверждается высокая эффективность методов глубокого обучения для обнаружения кибербуллинга в многоязычных текстах. Так, применение CNN и гибридных моделей CNN+LSTM позволило достигать точности до 0,82 на бенгальском и читтагонском языках, демонстрируя их применимость к морфологически сложным и низкоресурсным языкам [1].

В другом исследовании предложена мультимодальная модель HueID для языка урду, сочетающая Bi-LSTM для текстовых признаков и CNN для обработки эмодзи, что обеспечивает высокую точность классификации [2]. Отмечается также необходимость расширения многоязычной поддержки, поскольку большинство существующих решений ориентировано на английский язык [3].

Гибридные ансамблевые архитектуры (Bi-LSTM, Bi-GRU, CNN, LSTM) с использованием эмбеддингов GloVe демонстрируют высокую эффективность при обработке многоязычных данных, подтверждая потенциал комплексных моделей [4]. При этом дальнейшие исследования направлены на развитие многоязычных и мультимодальных подходов для повышения качества распознавания [5].

Несмотря на наличие работ, ориентированных на английские корпуса, вопросы многоязычной обработки остаются недостаточно изученными [6]. Аналогично, крупномасштабные системы на основе глубокого обучения не всегда учитывают специфику многоязычного контента [7].

Современные подходы фокусируются на интеграции мультимодальных данных и учёте морфологических особенностей языков [8]. Наряду с этим, гибридные методы машинного обучения (например, LinearSVC с TF-IDF) демонстрируют высокую точность (до 92,1%) и пригодность для реального времени [9].

В заключение, исследования с использованием моделей Bi-LSTM и BERT подтверждают эффективность глубокого обучения, однако подчеркивают необходимость дальнейшего развития многоязычных и мультимодальных решений для повышения качества выявления кибербуллинга [10].

Материалы и методы исследования

Сбор и подготовка данных: в рамках исследования разработан специализированный программный модуль (парсер), обеспечивающий автоматизированный сбор текстовых данных из социальных сетей и открытых медиаресурсов с учётом их тематической релевантности и лингвистического разнообразия. В результате сформированы два корпуса: русскоязычный, полученный преимущественно автоматизированным способом с последующей частичной верификацией, и казахоязычный, собранный и аннотированный вручную с привлечением экспертов-лингвистов, что позволило обеспечить высокую достоверность разметки в условиях низкоресурсности языка.

Практическая реализация исследования включала несколько последовательных этапов. На первом этапе был разработан программный парсер для автоматизированного сбора текстовых сообщений из открытых интернет-источников, включая социальные сети, комментарии пользователей и публичные обсуждения. При сборе данных учитывались тематическая релевантность сообщений, наличие агрессивной или оценочной лексики, а также языковая принадлежность текста. После первичного сбора выполнялась фильтрация данных: удалялись дубликаты, рекламные сообщения, нерелевантные фрагменты и тексты с недостаточным содержательным объёмом.

На втором этапе были сформированы русскоязычный и казахоязычный корпуса. Казахоязычный корпус был дополнительно проверен и аннотирован вручную, поскольку казахский язык относится к низкоресурсным языкам и имеет ограниченное количество доступных размеченных наборов данных. Разметка выполнялась по бинарной схеме: сообщения с признаками кибербуллинга и сообщения без признаков кибербуллинга. Для повышения достоверности использовалось межэкспертное согласование, что позволило снизить субъективность при определении спорных случаев.

На третьем этапе была проведена предобработка текстов. Она включала приведение текста к нижнему регистру, удаление лишних символов, ссылок, повторяющихся пробелов, токенизацию, удаление стоп-слов, лемматизацию и обработку эмодзи. Для классических моделей тексты были преобразованы в числовой вид с использованием Bag-of-Words и TF-IDF. Для нейросетевых моделей использовались последовательностные представления текста, позволяющие учитывать порядок слов и контекстные зависимости.

На четвёртом этапе корпуса были разделены на обучающую и тестовую выборки. На обучающей выборке проводилось обучение моделей, а на тестовой – оценка их качества. В качестве классических алгоритмов использовались Logistic Regression, Naive Bayes, SVM, KNN, Decision Tree и Random Forest. В качестве моделей глубокого обучения были реализованы LSTM, BiLSTM, CNN и модель с механизмом внимания. Реализация экспериментов выполнялась в среде Python с использованием библиотек Scikit-learn, TensorFlow/Keras, NumPy и Pandas.

Оценка качества моделей проводилась по метрикам Accuracy, Precision, Recall, F1-score и ROC-AUC. Дополнительно использовались матрицы ошибок и ROC-кривые, что позволило более подробно проанализировать характер ошибок классификации. Сравнение результатов показало, что нейросетевые модели лучше справляются с контекстно зависимыми сообщениями, а модель с механизмом внимания наиболее эффективно выделяет семантически значимые фрагменты текста.

Практическая значимость проведённой работы заключается в том, что предложенный подход может быть использован при разработке интеллектуальных систем автоматической модерации онлайн-контента. Такая система способна выявлять потенциально агрессивные сообщения, передавать их на дополнительную проверку модератору и тем самым снижать риски распространения кибербуллинга в цифровой среде.

Реализованные модели: в исследовании реализован и сопоставлен широкий спектр моделей, охватывающий как классические алгоритмы машинного обучения, так и современные нейросетевые архитектуры. В качестве базовых моделей использовались Logistic Regression, Naïve Bayes, Support Vector Machine, K-Nearest Neighbors, Decision Tree и Random Forest. Для них применялись методы векторизации текста (Bag-of-Words, TF-IDF), обеспечивающие переход к числовому признаковому пространству с последующим обучением классификаторов.

Глубокие модели включали RNN, LSTM, BiLSTM, CNN, а также многослойный персептрон. Эти архитектуры позволяют учитывать последовательностную природу текста и извлекать скрытые семантические зависимости. Ключевое внимание уделено модели с механизмом внимания (Attention), которая реализует адаптивное взвешивание скрытых представлений входной последовательности. Формально механизм внимания вычисляется как нормализованная (например, с использованием softmax) функция сходства между скрытыми состояниями, что позволяет модели акцентировать наиболее информативные элементы текста. Это особенно эффективно при анализе кибербуллинга, где семантически значимые признаки могут быть распределены неравномерно по последовательности.

Метрики оценки: оценка эффективности моделей проводилась на основе совокупности стандартных метрик классификации: Accuracy, Precision, Recall, F1-score и ROC-AUC. Использование нескольких метрик обусловлено необходимостью комплексного анализа качества моделей, особенно в условиях возможного дисбаланса классов. Дополнительно применялись матрицы ошибок (confusion matrix) для детализированного анализа распределения ошибок классификации, а также ROC-кривые для оценки дискриминационной способности моделей при различных порогах принятия решений.

Сравнительный анализ проводился отдельно для русскоязычного и казахоязычного корпусов, что позволило выявить влияние морфологических, синтаксических и ресурсных особенностей языков на эффективность алгоритмов. Такой подход обеспечивает воспроизводимость результатов и позволяет обоснованно оценить применимость разработанных моделей в задачах многоязычной автоматической модерации контента.

Характеристика русскоязычного и казахоязычного корпусов. Для проведения исследования были сформированы два специализированных корпуса текстовых сообщений: русскоязычный и казахоязычный. Источниками данных послужили открытые интернет-

ресурсы, включая социальные сети, форумы, комментарии пользователей и публичные дискуссионные площадки. На этапе подготовки данных были удалены дубликаты, рекламные сообщения, спам и тексты, не относящиеся к тематике исследования.

Оба корпуса были аннотированы вручную по схеме бинарной классификации: сообщения с признаками кибербуллинга и сообщения без признаков агрессивного поведения. Для повышения качества разметки привлекались несколько экспертов, а окончательное решение принималось на основе процедуры межэкспертного согласования. Такой подход позволил минимизировать субъективность оценки и обеспечить высокую достоверность обучающих данных.

Русскоязычный корпус включает сообщения, содержащие различные формы агрессивного поведения, такие как оскорбления, унижение, угрозы и дискриминационные высказывания, а также нейтральные сообщения, использованные для формирования контрольного класса. Казахоязычный корпус формировался по аналогичному принципу и содержит тексты, отражающие особенности казахского языка, включая его агглютинативную структуру и разнообразие морфологических форм.

Созданный казахоязычный корпус представляет особую научную ценность, поскольку количество доступных размеченных наборов данных для казахского языка остается ограниченным. Использование двух корпусов позволило провести сравнительный анализ эффективности алгоритмов машинного и глубокого обучения в условиях различной языковой структуры и оценить их способность выявлять признаки кибербуллинга в многоязычной среде.

Результаты исследования

Русскоязычный корпус: экспериментальные результаты на русскоязычном корпусе демонстрируют выраженное преимущество моделей глубокого обучения над классическими алгоритмами машинного обучения (табл. 1).

Таблица 1 – Сравнение моделей (русский корпус)

Модель	Accuracy (%)	Precision (%)	Recall (%)	F1-score (%)	ROC-AUC
Naive Bayes	60.2	58.7	61.3	59.9	0.65
Logistic Regression	84.5	83.9	85.2	84.5	0.88
SVM	87.3	86.8	87.9	87.3	0.90
KNN	79.1	78.5	80.2	79.3	0.82
Decision Tree	81.4	80.9	82.1	81.5	0.84
Random Forest	88.2	87.6	88.9	88.2	0.91
LSTM	90.8	90.1	91.5	90.8	0.93
BiLSTM	91.2	90.7	91.8	91.2	0.94
CNN	89.7	89.0	90.3	89.6	0.92
Attention-based model	92.1	92.5	93.3	92.9	0.95

Лучшие результаты показала модель с механизмом внимания (Attention-based neural network): Accuracy – 92.1%, F1-score – 92.9%, ROC-AUC – 0.95, что свидетельствует о высокой обобщающей способности и устойчивости к вариативности текстов. Рекуррентные архитектуры (LSTM, BiLSTM) также продемонстрировали конкурентоспособные показатели (~90-91%), при этом BiLSTM показала небольшое улучшение за счёт учета двунаправленного контекста.

Классические методы машинного обучения оказались менее эффективными: Naïve Bayes показал наименьшую точность (~60%) из-за предположения условной независимости признаков, а ансамблевые и линейные модели (Random Forest, Logistic Regression, SVM) обеспечили умеренные результаты, уступая нейросетям в учёте сложных семантических и синтаксических зависимостей.

Казахоязычный корпус: результаты, полученные на казахоязычном корпусе, в целом согласуются с наблюдениями для русского языка, несмотря на более ограниченный объем данных и низкую ресурсность языка (табл. 2).

Лучшей моделью на казахоязычном корпусе стала архитектура с механизмом внимания: Accuracy – 91.5%, F1-score – 92.9%, ROC-AUC – 0.94, что подтверждает её высокую переносимость и эффективность для морфологически богатого языка. Рекуррентные модели (LSTM, BiLSTM) показали стабильные результаты, но их эффективность зависела от объема и качества обучающих данных, проявляясь большей вариативностью метрик при

ограниченных корпусах. Классические алгоритмы вновь уступили по всем показателям, что указывает на ограничения подходов с поверхностными признаками (TF-IDF, Bag-of-Words) для агглютинативного казахского языка.

Таблица 2 – Сравнение моделей (казахский корпус)

Модель	Accuracy (%)	Precision (%)	Recall (%)	F1-score (%)	ROC-AUC
Naïve Bayes	58.4	57.9	59.2	58.5	0.63
Logistic Regression	83.1	82.4	84.0	83.2	0.87
SVM	85.6	85.1	86.2	85.6	0.89
KNN	77.8	77.0	78.6	77.8	0.80
Decision Tree	80.2	79.6	81.0	80.3	0.83
Random Forest	86.7	86.0	87.5	86.7	0.90
LSTM	90.2	89.6	91.0	90.3	0.93
BiLSTM	90.9	90.3	91.6	90.9	0.93
CNN	89.1	88.5	89.9	89.2	0.91
Attention-based model	91.5	92.1	93.7	92.9	0.94

Сравнительный анализ и интерпретация результатов. Сравнительный анализ показал, что модели глубокого обучения превосходят классические алгоритмы благодаря способности извлекать высокоуровневые признаки и моделировать сложные нелинейные зависимости. Существенное повышение качества классификации достигается при использовании механизма внимания, обеспечивающего адаптивное выделение наиболее информативных элементов текста. Например, сообщение «Сен тағы да келдің бе? Әдеттегідей ештеңе түсінбейсің екен» не содержит прямых оскорбительных слов, однако в контексте общения может выражать унижение и насмешку над собеседником. Классические методы на основе TF-IDF и Bag-of-Words ориентируются преимущественно на частотные характеристики отдельных слов и часто не выявляют подобные случаи. В отличие от них модели BiLSTM и Attention способны учитывать контекст всей последовательности и корректно классифицировать такие сообщения как потенциальное проявление кибербуллинга.

Дополнительно установлено, что двунаправленные архитектуры (BiLSTM) повышают точность за счёт более полного учета контекста. Полученные результаты также подтверждают межъязыковую устойчивость моделей, демонстрируя их эффективность при обработке языков с различной морфологической структурой.

Обсуждение результатов и перспективы дальнейших исследований

Полученные результаты подтверждают высокую эффективность рекуррентных и гибридных нейросетевых архитектур в задачах текстовой классификации, особенно при анализе эмоционально и поведенчески окрашенного контента. Существенным научным вкладом является формирование и ручная аннотация казахоязычного корпуса, обладающего высокой ценностью в условиях ограниченности ресурсов для казахского языка и способного служить базой для дальнейших исследований в области NLP.

Вместе с тем выявлены ограничения, влияющие на интерпретацию результатов. К ним относятся зависимость глубоких моделей от объема размеченных данных, высокая вычислительная сложность их обучения, а также ограниченность анализа исключительно текстовой модальностью. Отсутствие учета мультимодальных и паралингвистических признаков (например, мимики, интонации) может снижать полноту выявления эмоционального состояния.

Таким образом, несмотря на достигнутые результаты, задача автоматического обнаружения кибербуллинга требует дальнейшего развития, включая расширение корпусов данных, интеграцию мультимодальных подходов и оптимизацию архитектур моделей.

Перспективные направления дальнейших исследований включают интеграцию трансформерных архитектур (например, BERT-подобных моделей), обеспечивающих более качественные контекстуализированные представления текста. Существенный потенциал также связан с разработкой мультимодальных систем, объединяющих текстовые, визуальные и аудиоданные, что позволяет более точно моделировать эмоциональное и психологическое состояние пользователей.

Важным направлением является применение transfer learning для переноса знаний с высокоресурсных языков на низкоресурсные, в частности казахский, что снижает зависимость от объема размеченных данных. Дополнительно, внедрение методов Explainable AI (XAI) способствует повышению интерпретируемости моделей и их применимости в социально значимых областях.

Практическую значимость представляет разработка систем раннего предупреждения для мониторинга психологического состояния пользователей, особенно в образовательной среде. При этом ключевым условием повышения эффективности моделей остается дальнейшее расширение и диверсификация казахоязычного корпуса, что формирует основу для перехода от экспериментальных решений к прикладным интеллектуальным системам.

Заключение

В настоящей работе выполнен сравнительный анализ классических алгоритмов машинного обучения и современных нейросетевых архитектур в задаче автоматического выявления кибербуллинга на русскоязычных и казахоязычных текстах. Это позволило оценить применимость и переносимость методов в условиях как высокоресурсного, так и низкоресурсного языка.

Экспериментальные результаты показывают, что модели глубокого обучения стабильно превосходят классические подходы, особенно при работе с морфологически сложными и контекстно насыщенными текстами. Наилучшие показатели достигнуты моделями с механизмом внимания, способными эффективно выделять значимые элементы последовательности, учитывать дальние контекстные зависимости и обеспечивать устойчивость к лингвистической вариативности.

Сформированный казахоязычный корпус представляет самостоятельную научную ценность и расширяет возможности исследований в области NLP для низкоресурсных языков. Практическая значимость созданного корпуса заключается в возможности его использования для обучения и тестирования интеллектуальных систем автоматической модерации контента, мониторинга цифровой безопасности и раннего выявления признаков агрессивного поведения в онлайн-среде. Кроме того, корпус может служить основой для дальнейших исследований в области обработки естественного языка и разработки специализированных языковых моделей для казахского языка.

Список литературы

1. Mahmud T.S.D.A. Exhaustive Study into Machine Learning and Deep Learning Methods for Multilingual Cyberbullying Detection in Bangla and Chittagonian Texts / T.S.D.A. Mahmud, M. Ptaszynski, F. Masui // Electronics. – 2024. https://doi.org/10.3390/electronics13091677.

2. Tahir S. HuEID: Hybrid Deep Learning for Cyberbullying Detection using Multi-Modal Urdu Text and Emojis / S. Tahir, A. Nawaz. – 2025. https://doi.org/10.1145/3769294.

3. Khafajeh H. Cyberbullying Detection in Social Networks Using Deep Learning / H. Khafajeh // The International Arab Journal of Information Technology. – 2024. – № 21(6). https://doi.org/10.34028/iajit/21/6/9.

4. Mahajan E. EnsMulHateCyb: Multilingual hate speech and cyberbully detection in online social media / E. Mahajan, H. Mahajan, S. Kumar // Expert Systems With Applications. – 2023. – № 236. – P. 121228. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.121228.

5. Begum A. Cyberbullying Detection on Social Media using AI / A. Begum // International Journal For Science Technology And Engineering. – 2025. – № 13(4). – P. 7003-7010. https://doi.org/10.22214/ijraset.2025.70045.

6. Musyoka I. Multimodal Cyberbullying Detection Using Deep Learning Techniques: A Review / I. Musyoka, J. Wandeto, B. Kituku. – 2023. – P. 187-192. https://doi.org/10.1109/ict4da59526.2023.10302244.

7. Deep Learning for Multi-Labeled Cyberbully Detection / N. Islam et al // Enhancing Online Safety. – 2023. – P. 1-6. https://doi.org/10.1109/icdsns58469.2023.10245135.

8. Vijayakumar H.P.D.D. A study on deep learning algorithms for multimodal and multilingual cyberbullying detection / H.P.D.D. Vijayakumar // International Journal of Scientific Research. – 2021. – P. 50-54. https://doi.org/10.36106/IJAR/4620274.

9. Horate O. Cyber-Bullying and Harassment Detection using ML / O. Horate // International Journal for Science Technology and Engineering. – 2025. – № 13(4). – P. 5761-5766. https://doi.org/10.22214/ijraset.2025.69732.
10. AI-Powered Frameworks for the Detection and Prevention of Cyberbullying Across Social Media Ecosystems / M.A.M. Mondol et al // Techcomp Innovations. – 2025. – № 2(1). – P. 1-15. https://doi.org/10.70063/techcompinnovations.v2i1.59.

Благодарность

Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP23488900 – Автоматическое обнаружение кибербуллинга среди молодежи в социальных сетях с использованием искусственного интеллекта)».

Р.Б. Абдрахманов[1], Ә.С. Төлеп[2], Д.Р. Сұлтан[3], А.С. Касымбеков[1], А.Б. Нуржанова[4]*

[1]Халықаралық туризм және меймандостық университеті,
161200, Қазақстан Республикасы, Түркістан қ., Рабиға Сұлтан Бегім көшесі, 14А
[2]Қ.А.Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті,
161200, Қазақстан Республикасы, Түркістан қ., Бекзат Саттарханов даңғылы, 29
[3]Нархоз университеті,
050035, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Жандосов көшесі, 55
[4]Л.Н.Гумилев атындағы ЕҰУ,
010008, Қазақстан Республикасы, Астана қ., Сәтбаев көшесі, 2
*e-mail: nurzhanova_ab@enu.kz

КӨПТІЛДІ ОНЛАЙН МӘТІНДЕРДЕ КИБЕРБУЛЛИНГТІ АНЫҚТАУДЫҢ ТЕРЕҢ ОҚЫТУ ТӘСІЛДЕРІ

Бұл зерттеуде көптілді онлайн мәтіндерде (орыс және қазақ тілдері) кибербуллингті автоматты түрде анықтау үшін классикалық машиналық оқыту алгоритмдері мен заманауи терең оқыту архитектураларының тиімділігіне жүйелі салыстырмалы талдау жүргізілді. Дәстүрлі белгілерге (TF-IDF, n-граммалар) негізделген әдістер мен мәтіннің контекстік көріністерін пайдаланатын модельдерді салыстыруға ерекше назар аударылды. Қазақ тіліндегі корпус үшін тілдік ресурстардың шектеулілігі және оқыту деректерінің аз көлемі жағдайында жоғары сапалы таңбалануды қамтамасыз ететін арнайы деректер қоры әзірленіп, қолмен аннотацияланды.

Эксперименттік нәтижелер орыс тіліндегі корпуста ең жоғары көрсеткіштерді назар механизміне негізделген модельдің (Attention-based model) көрсеткенін анықтады: Accuracy – 92,1%, F1-score – 92,9% және ROC-AUC – 0,95. Қазақ тіліндегі корпуста да аталған архитектура ең жақсы нәтижелерге қол жеткізді: Accuracy – 91,5%, F1-score – 92,9% және ROC-AUC – 0,94. LSTM және BiLSTM рекуррентті модельдері 90-91% аралығында тұрақты көрсеткіштер көрсетті, ал классикалық машиналық оқыту алгоритмдері негізгі сапа метрикалары бойынша төмен нәтижелер көрсетті. Алынған нәтижелер көптілді мәтіндердегі кибербуллингті анықтауда терең оқыту әдістерінің жоғары тиімділігін дәлелдейді.

Зерттеу мультимодальды және интерпретацияланатын тәсілдерді біріктірудің, тілдік ресурстарды кеңейтудің, сондай-ақ transfer learning және алдын ала үйретілген тілдік модельдерді қолданудың маңыздылығын көрсетеді. Алынған нәтижелер контентті интеллектуалды модерациялау жүйелерінде, цифрлық қауіпсіздікті қамтамасыз етуде және онлайн ортадағы пайдаланушылардың психологиялық тәуекелдерін ерте анықтауда практикалық маңызға ие.

Түйінді сөздер: *кибербуллинг, көптілді мәтін, терең оқыту, рекуррентті нейрондық желілер, назар механизмі.*

R.B. Abdrakhmanov[1], A.S. Tolep[2], D.R. Sultan[3], A.S. Kasymbekov[1], A.B. Nurzhanova[4]*

[1]International University of Tourism and Hospitality,
161200, Republic of Kazakhstan, Turkestan, 14A Rabiga Sultan Begim Street
[2]Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University,
161200, Republic of Kazakhstan, Turkestan, 29 Bekzat Sattarkhanov Avenue
[3]Narxoz University, 050035, Republic of Kazakhstan, Almaty, 55 Zhandosov Street
[4]L.N. Gumlyov Eurasian National University, 010008, Republic of Kazakhstan, Astana, 2 Satpayev Street
*e-mail: nurzhanova_ab@enu.kz

DEEP LEARNING APPROACHES FOR CYBERBULLYING DETECTION IN MULTILINGUAL ONLINE TEXTS

This study presents a systematic comparative analysis of the effectiveness of classical machine learning algorithms and modern deep learning architectures for automatic cyberbullying detection in multilingual online texts (Russian and Kazakh). Particular attention is given to the comparison of traditional feature-based approaches (TF-IDF, n-grams) and models utilizing contextual text representations. For the Kazakh-language corpus, a specialized dataset was developed and manually annotated to ensure high-quality labeling under low-resource language conditions and limited training data availability.

Experimental results showed that the attention-based model achieved the best performance on the Russian-language corpus, reaching an Accuracy of 92.1%, an F1-score of 92.9%, and a ROC-AUC of 0.95. The same architecture also demonstrated the highest results on the Kazakh-language corpus, achieving an Accuracy of 91.5%, an F1-score of 92.9%, and a ROC-AUC of 0.94. Recurrent neural network models, including LSTM and BiLSTM, showed stable performance within the range of 90-91%, whereas classical machine learning algorithms yielded lower results across all major evaluation metrics. These findings confirm the effectiveness of deep learning approaches for cyberbullying detection in multilingual textual environments.

The study highlights the importance of integrating multimodal and interpretable approaches, expanding linguistic resources, and applying transfer learning along with pre-trained language models to improve robustness and classification accuracy. The obtained results have practical significance for intelligent content moderation systems, digital safety applications, and the early detection of psychological risk factors among users in online environments.

Key words: *cyberbullying, multilingual text, deep learning, recurrent neural networks, attention mechanism.*

Сведения об авторах

Рустам Абдрахманов – кандидат технических наук, доцент, Международный университет туризма и гостеприимства, Туркестан, Казахстан; e-mail: abdrakhmanov.rustam@iuth.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5508-389X.

Абимухан Тулеп – кандидат технических наук, доцент, МКТУ им. Х.А. Ясави, Туркестан, Казахстан; e-mail: abdimuhan.tolep@ayu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0089-2446.

Данияр Султан – PhD, доцент факультета цифровых технологий Университета Нархоз, Алматы, Казахстан; e-mail:daniyar.sultan@narxoz.kz. ORCID:https://orcid.org/0000-0002-1611-1923.

Аббазбек Касымбеков – кандидат технических наук, доцент, Международный университет туризма и гостеприимства, Туркестан, Казахстан; e-mail: abbazbek@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8022-5637.

Айжан Нуржанова* – докторант, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан; e-mail: nurzhanova_ab@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-9871-9823.

Авторлар туралы мәліметтер

Рустам Абдрахманов – техника ғылымдарының кандидаты, Халықаралық туризм және меймандостық университетінің доценті, Түркістан қ., Қазақстан; e-mail: abdrakhmanov.rustam@iuth.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5508-389X.

Әбдімухан Төлеп – техника ғылымдарының кандидаты, Қ.А. Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті доценті, Түркістан қ., Қазақстан; e-mail: abdimuhan.tolep@ayu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0089-2446.

Данияр Султан – Нархоз университетінің Цифрлық технологиялар мектебінің доценті, Алматы, Қазақстан; e-mail: daniyar.sultan@narxoz.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1611-1923.

Аббазбек Касымбеков – техника ғылымдарының кандидаты, Халықаралық туризм және меймандостық университетінің доценті, Түркістан қ., Қазақстан; e-mail: abbazbek@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8022-5637.

Айжан Нуржанова* – докторант, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., Қазақстан; e-mail: nurzhanova_ab@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-9871-9823.

Information about the authors

Rustam Abdrakhmanov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Humanities school, International University of Tourism and Hospitality, Turkistan, Kazakhstan; e-mail: abdrakhmanov.rustam@iuth.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5508-389X.

Abdimukhan Tolep – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University, Turkistan, Kazakhstan; e-mail: abdimuhan.tolep@ayu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0089-2446.

Daniyar Sultan – PhD, Ac. Associate Professor of the School of Digital Technologies, Narxoz University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: daniyar.sultan@narxoz.kz. ORCID:https://orcid.org/0000-0002-1611-1923.

Abbazzbek Kasymbekov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Humanities school, International University of Tourism and Hospitality; e-mail: abbazbek@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8022-5637.

Aizhan Nurzhanova – Doctoral student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; e-mail: nurzhanova_ab@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-9871-9823.

Поступила в редакцию 06.04.2026
Поступила после доработки 07.06.2026
Принята к публикации 11.06.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-4

CC BY 4.0
Check for updates

ҒТАХР: 47.49.31

Н.П. Сапарходжаев[1], А. Хабай[2*], М.Ж. Иген[2], Е.А. Тулешов[2,3], Ж.Н. Исабеков[2]
[1]Рудный индустриалық университеті,
Рудный қ., Қостанай облысы, 50 лет Октябрь көшесі, 38
[2]Satbayev University,
050013, Қазақстан, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22
[3]Академик Ө.А. Жолдасбеков атындағы Механика және машинатану институты,
Қазақстан, Алматы, Шевченко көш., 28
[*]e-mail: a.khabay@satbayev.university

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ НЕГІЗІНДЕ GNSS СИГНАЛДАРДЫҢ САПАСЫН ЖАҚСАРТУ ӘДІСТЕРІН ЖЕТІЛДІРУ

Аңдатпа: *Навигациялық спутниктік (GNSS) байланыс арнасында әлсіз сигнал жағдайында қабылдағыштың тасымалдаушы фазасы мен жиілігін дәл қадағалауы күрт нашарлап, навигациялық шешімнің тұрақтылығы мен сапасы төмендейді. Бұл жұмыстың мақсаты GNSS байланысындағы әлсіз сигналдың сапасын жақсарту, яғни төмен сападағы сигнал динамикалық әсерлер кезінде тасымалдаушыны автоматты реттеу жүйесінің сезімталдығын арттырып, фазалық/жиіліктік қателіктерді азайту. Зерттеу объектісі GNSS қабылдағышының коррелятор шығысындағы базалық жолақтағы I/Q сигнал және тасымалдаушыны қадағалау контур жұмысын зерттеу. Ұсынылған әдісте дәстүрлі ұзақ когерентті интеграцияның орнына блоктарға бөлінген когерентті интеграция (БКИ) қолданылады. жалпы интеграция уақыты T сақталып, сигнал B қысқа блокқа бөлінеді де, әр блок бойынша алынған I_b, Q_b нәтижелерінен матрицасы құрастырылады. Бұл матрица амплитуда-фаза өзгерістерін сақтап, жиілік сәйкессіздігі мен динамиканың әсерін дәлірек сипаттайды. Одан әрі Z[k] деректерін өңдейтін нейрондық желі дискриминаторы (CNN+MLP) фазалық қателікті бағалап, ол PI-тәрізді loop-filter арқылы сүзгіден өтіп, сандық басқарылатын генератор параметрлерін жабық кері байланыста жаңартады. Әдістің жаңалығы – БКИ ақпаратын 2D-матрица түрінде ұсынып, классикалық фазалық синхрондау кері байланыс дискриминаторын нейрондық дискриминатормен алмастыратын BCI-NPLL жабық құрылымы және сезімталдықты CRLB-фазалық джиттер байланысы арқылы сандық негіздеу. Модельдеу нәтижелері ұсынылған тәсілдің әлсіз сигнал аймағында қадағалау тұрақтылығын сақтайтынын, фазалық қателіктің нөл маңында шоғырланатынын және жиілікті бағалау дәлдігі жоғары екенін көрсетті (RMSE≈0.084Гц). Нәтижесінде әдіс GNSS байланысындағы әлсіз сигнал сапасын жақсартып, қабылдағыштың трекинг тұрақтылығын арттыруға мүмкіндік береді.*

Түйін сөздер: *GNSS, әлсіз сигнал, блоктық когерентті интеграция (БКИ), нейрондық PLL (NPLL), CNN дискриминатор, PI loop-filter, NCO, CRLB.*

Кіріспе

Жаһандық навигациялық жерсеріктік жүйелер (GNSS) көлік, авиация, робототехника, геодезия және смарт-құрылғылар сияқты көптеген салада негізгі позициялау технологиясына айналды [1-3]. Әлсіз GNSS сигналдарында тасымалдаушы ілмектің орнықтылығын арттыру үшін жиі Калман сүзгісі тәрізді бағалаушылармен күшейтілген құрылымдар ұсынылады [4]. Өйткені олар шу жағдайында күйді (фаза/жиілік) бірізді бағалауды жақсартады. Сонымен

©Н.П. Сапарходжаев, А. Хабай, М.Ж. Иген, Е.А. Тулешов, Ж.Н. Исабеков, 2026

қатар, әлсіз сигнал тек қуаттың азаюымен шектелмейді ионосфералық сцинтилляция сияқты құбылыстар амплитуда мен фазаның жылдам флуктуациясын тудырып [5]. Бұл өз кезегінде кері байланыс параметрлерін дұрыс баптамаған жағдайда құлыптан шығу ықтималдығын арттырады.

Сцинтилляцияның әсері күшті аймақтарда PLL-дің орнықтылығы оның жолақ еніне тікелей тәуелді [6]. Жолақ кең болса динамикаға жылдам жауап береді, бірақ шу көбірек өтеді. Соңғы жылдары сезімталдықты арттырудың бір бағыты өте тар ілмектерді қолдану [7-8]. бұл әлсіз сигналда фазалық шуды басып, құлыпты ұзағырақ сақтауға мүмкіндік береді, бірақ мұндай шешім динамика мен модель қателігі жағдайында мұқият жобалауды талап етеді. Осылайша, GNSS байланысындағы әлсіз сигнал сапасын жақсарту мәселесі сигнал сапасын жақсарту әлі де өзекті.

Әлсіз GNSS сигналын қадағалауды жақсарту үшін әдебиетте бірнеше негізгі бағыт қалыптасқан. Ілмек параметрлерін бейімдеу дәстүрлі тұрақты баптаулар әлсіз сигнал/динамика сценарийлерінде тиімді бола бермейді [9]. Мұндай әдістердің өнімділігі мен есептеу күрделілігі салыстырмалы түрде талданған.

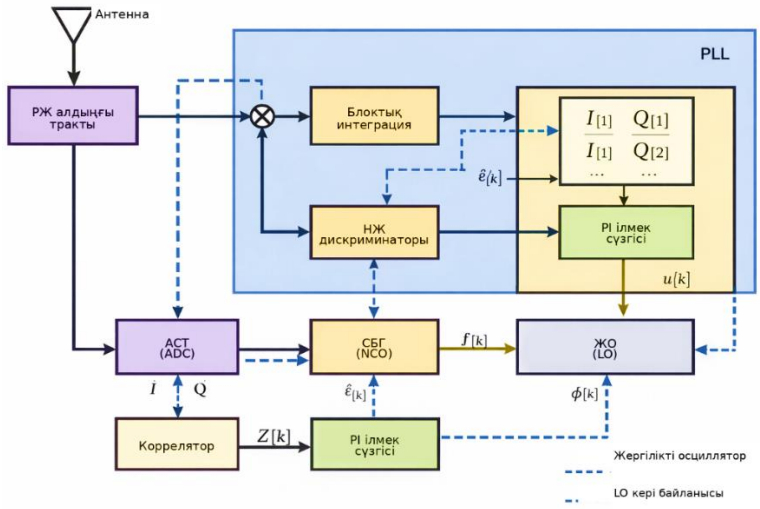
Әлсіз сигналда дискримианторды статистикалық тұрғыдан күшейту (MLE/KF). Фаза/жиілікті бағалауда тәсілдері теориялық тұрғыдан оңтайлы қасиеттер береді, бірақ жиі үлкен есептеу жүктемесін талап етеді[10]. PLL өнімділігін өлшеу фазалық джиттер метрикалары [11]. Мысалы, дискриминатор шығысына негізделген PLL өнімділік метрикасы ұсынылып, ол арқылы нақты жұмыс режимінде қадағалау сапасын бағалау идеясы дамытылды. Векторлық қадағалау ілмектері скалярлық контурларға балама ретінде векторлық қадағалау тәсілдері бірнеше жерсеріктен келетін ақпаратты біріккен күй бағалауында қолданады [12]. Интеграция уақытын таңдау және сезімталдық-жаңарту жиілігі компромисі [13]. Осы trade-off-ты Калман-сүзгілік қадағалау контурлары үшін формальды зерттеп, оптимал когерентті интеграция уақытын таңдауға арналған әдістеме ұсынылған.

Нейрондық желіге негізделген дискриминатор және блоктық когерентті интеграция (BCI-NPLL). Соңғы басым бағыттардың бірі классикалық дискриминаторларының орнына ML/NN қолдану және ұзақ когерентті интеграцияның шектеулерін азайту үшін сигналды қысқа блоктарға бөліп өңдеу. Блоктық когерентті интеграция матрицасын құрып, оны нейрондық дискриминаторға беретін және жабық PLL контурына кіріктіретін әдіс әлсіз сигналда сезімталдықты арттыруға бағытталған тәсіл ретінде жарияланған.

Жалпы алғанда, әдебиетте әлсіз сигналда қадағалау сапасын арттыру үшін: loop параметрлерін бейімдеу, MLE/KF сияқты статистикалық бағалауыштар, өнімділікті джиттер арқылы өлшеу, VTL сияқты біріктірілген контурлар және интеграция уақытын дұрыс таңдау кеңінен қарастырылған. Дегенмен, төмен C/N0 және динамика жағдайында бір мезгілде сезімталдықты да, орнықтылықты да күшейту үшін дискриминация сатысын күшейтетін және жабық керібайланысты сақтайтын шешімдерге сұраныс жоғары болып отыр.

Әлсіз GNSS сигналын қадағалау үшін БКИ-негізді NPLL мен жақсарту әдістері

Бұл бөлімде әлсіз сигнал жағдайында фазаны/жиілікті орнықты қадағалауға арналған ұсынылған БКИ негізінде NPLL оқыту әдісінің құрылымы мен математикалық негізі сипатталады. Әдістің негізгі идеясы үздіксіз ұзақ когерентті интеграция орнына сигналды B қысқа блоктарға бөліп, әр блок бойынша когерентті жинақтау нәтижесінде $Z[k] \in RB \times 2$ матрицасын құрастыру. Қалыптасқан Z[k] құрылымы амплитуда–фаза өзгерістерін сақтай отырып, төмен C/N0 кезінде фазалық қателікті сенімді бағалауға мүмкіндік береді. Фазалық дискриминация классикалық тәсілмен емес, нейрондық желі дискриминаторы арқылы орындалып, алынған қате PI-тәрізді loop-filter арқылы сүзгіден өтіп, сандық басқарылатын генератор параметрлерін жаңартуға қолданылады. Ұсынылған өңдеу тізбегі мен модульдердің өзара байланысы төмендегі суретте 1 көрсетілген.



Сурет 1 – GNSS қабылдағышының құрылымы және тасымалдаушыны қадағалау ілмегі кері байланыс бар басқару жүйесі

Алдымен үздіксіз интеграция орнына қысқа блоктар бойынша алынған коррелятор нәтижелері I_b және Q_b ретінде есептеліп, олардан Z[k] матрицасы қалыптастырылады. бұл матрица блоктар арасындағы амплитуда–фаза өзгерістерін сақтап, жиілік сәйкессіздігінің әсерін жақсырақ сипаттайды. Бұдан кейін классикалық PLL-дегі дәстүрлі дискриминатордың орнына Z[k] матрицасын өңдейтін нейрондық желі енгізіліп, фазалық қателіктің бағасы $\hat{e}_{\varphi}[k]$ алынады. Алынған қате PI-тәрізді loop-filter арқылы сүзгіден өтіп, NCO-ның жиілігі мен фазасын жаңартуға беріледі, яғни құрылым толық жабық кері байланыс ретінде жұмыс істейді. Әдістің тиімділігін тексеру үшін сезімталдық пен дәлдік берілген шу жағдайында параметрді бағалаудың дисперсиясы үшін теориялық ең төмен шек ол CRLB арқылы теориялық бағаланып, ол жабық ілмектегі фазалық джиттермен байланыстырылады. Нәтижесінде БКИ негізінде NPLL-дің төмен CNR және динамикалық жағдайларда қадағалаудың тұрақтылығын арттыруға мүмкіндік беретіндігі әдістемелік тұрғыдан негізделеді.

Жаһандық навигациялық жерсеріктік жүйе қабылдағышының ішіндегі *негізгі есептегіш блок* коррелятордың шығысындағы кешенді I/Q сигналды көбіне тасымалдаушыны және кодты PRN салыстырлғаннан кейін қалған қалдық қателіктері бар базалық жолақтағы сигнал ретінде қарастырады. Қабылдағыш кірісіндегі цифрлық кешенді сигналдың үлгісі амплитуда A(t), код кідірісі τ(t), Doppler f_D және тасымалдаушы фаза ϕ(t) түрінде беріледі [14]. коррелятор шығысында сигнал келесі түрде жазылады

$$r(t) = Ae^{j(2\pi\Delta f\, t+\Delta\varphi)} + n(t), \tag{1}$$

Мұндағы A – пайдалы компоненттің *кешенді амплитудасы*. Δf толық жойылмай қалған тасымалдаушы жиіліктің қателігі, Δφ қалдық фазалық қате, n(t) – кешенді ақ Гаусс шуы. Когерентті интеграция (КИ) және оныы төмендегідей сипатаймыз

$$y = Ae^{j\Delta\varphi}\int_0^T e^{j2\pi\Delta f\, t}\, dt + \int_0^T n(t)dt. \tag{2}$$

Ал ақ шуды интегралдағанда ол әлі де кешенді Гаусс болып қалады, тек дисперсиясы T-ға пропорционал өседі (интуитивті түрде: «шу энергиясы» терезе ұлғайған сайын жиналады). Сондықтан идеалда когерентті интеграция SNR-ды шамамен T есеге арттырады (дБ-де $10\log_{10}T$).

Егер Δf≠0 болса, пайдалы сигналдың интеграциядан кейінгі амплитудасы sinc-тәрізді әлсірейді (жиілік қателігі артқан сайын төмендейді). Бұл құбылыс ұзақ T кезінде күшті болады

және дәл осы себептен дәстүрлі КИ ұзартылған сайын әрқашан ұтады деп айтуға болмайды. Динамика жиілік қателігі бар жағдайда кері әсер байқалады [15].

Блоктарға бөлінген когерентті интеграция тәсілінде жалпы үздіксіз интеграция уақыты T өзгермей сақталады, бірақ ол B қысқа блокқа бөлінеді $T_b=T/B$ мұның артықшылығы әр блоктың қысқа болуы себепті Δf_{Tb} азайып, классикалық ұзақ КИ-де байқалатын sinc-тәрізді когерентті әлсіреу төмендейді, сондай-ақ осцилляторлық фазалық дрейфке, динамикаға және навигациялық бит ауысуына бейімделу жеңілдейді (блоктарда жиілік/фазаны бағалап, кейін туралап қосуға болады) әрі есептеулерді параллель орындау ыңғайлы. Әр блок үшін теңдеу төмендегідей жазылады

$$y_b = \int_{(b-1)T_b}^{bT_b} r(t)dt, \qquad b = 1,2,\ldots,B \tag{3}$$

Мұндаңы T_b бір блоктың интеграция ұзақтығы. Жиілік сәйкессіздігі әсері әр блокта азаяды, себебі интеграция терезесі қысқарады. Нәтижесінде y_b мәндерінің пайдалы компоненті толық КИ-ға қарағанда азырақ әлсірейді. Бұл БКИ-дың сезімталдықты жақсартудағы негізгі физикалық-математикалық артықшылығы болып табылады.

БКИ әдісінде жалпы когерентті интеграция уақыты T өзгертілмейді, бірақ ол B бірдей қысқа интервалдарға бөлінеді. Әр интервалда қабылдағышта әдеттегі корреляция орындалып, интеграция нәтижесінде кешенді мән алынады. I синфазалық құраушы және Q квадратуралық құраушы. Осылайша, әрбір b-блок үшін келесі жұп анықталады: I_b-блоктағы синфазалық интеграция нәтижесі, Q_b b-блоктағы квадратуралық интеграция нәтижесі болады. БКИ дың басты ерекшелігі толық T уақыт ішінде алынатын бір ғана (I,Q) жұбының орнына, B қысқа блок бойынша алынған (I_b,Q_b) жұптарының тізбегі қалыптасады. Сондықтан блоктық мәліметтер фазалық қатені сенімді бағалау үшін көбірек пайдалы ақпарат береді. Алынған блоктық мәліметтерді нейрондық желіге беруді жеңілдету үшін олар екі өлшемді массив (матрица) түрінде рәсімделеді. Яғни, матрица келесі түрде беріледі:

$$\mathbf{Z} \in \ddot{Y}^{B\times 2}, \qquad \mathbf{Z} = \begin{bmatrix} I_1 & Q_1 \\ I_2 & Q_2 \\ \text{M} & \text{M} \\ I_B & Q_B \end{bmatrix} \tag{4}$$

Мұндағы Z БКИ бойынша жиналған мәліметтердің ықшам 2D көрінісі. Осы матрица БКИ –кескі ретінде қарастырылады, әрі қарай нейрондық желі дискриминаторына кіріс ретінде беріледі. Нейрондық желі блоктар арасындағы өзгеріс заңдылығын (I/Q тербелісі, амплитуданың өзгеруі, фазаның ауысуы) үйреніп, фазалық қателіктің бағасын шығарады.

Нейрондық желі дискриминаторы фазасын кіріс сигналдың фазасына сәйкестендіру (PLL), дискриминатордың мақсаты әр дискрет уақыт қадамында фазалық қателікті бағалау. Блоктарға бөлінген когерентті интеграцияға негізделген нейрондық PLL тәсілінде бұл функцияны блоктық когерентті интеграция нәтижелерінен құрастырылған Z[k] матрицасын қабылдайтын нейрондық желі орындайды. Мұнда Z[k] k қадамдағы B блок бойынша алынған (I_b,Q_b) жұптарының 2D-көрінісі.

$$\hat{e}_{\varphi}[k] = g_{\theta}\big(\mathbf{Z}[k]\big), \tag{5}$$

мұнда $\hat{e}_{\varphi}[k]$ k – қадамдағы фазалық қателіктің бағасы, gθ(·) параметрлері θ болатын нейрондық желі, Z[k] БКИ матрицасы. БКИ матрицасы келесі түрде беріледі:

$$\mathbf{Z}[k] = \begin{bmatrix} I_1[k] & Q_1[k] \\ I_2[k] & Q_2[k] \\ \text{M} & \text{M} \\ I_B[k] & Q_B[k] \end{bmatrix}. \tag{6}$$

Практикалық іске асыруда Z[k] матрицасы 2D кескін ретінде қарастырылып, конволюциялық қабаттастырылған нейрондық блок(CNN) арқылы белгілер алынады, ал толық

байланысқан қабаттар (MLP) фазалық қателікті регрессиялайды. Шығыс бір скаляр $\hat{e}_{\varphi}[k]$ немесе тұрақты параметризация үшін cossin/cos жұбы болуы мүмкін:

$$\hat{\mathbf{s}}[k] = \begin{bmatrix} \hat{s}[k] \\ \hat{c}[k] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\left(\hat{e}_{\varphi}[k]\right) \\ \cos\left(\hat{e}_{\varphi}[k]\right) \end{bmatrix} \tag{7}$$

Нейрондық желі блоктардан алынған өлшемдерден мысалы БКИ матрицасы немесе I/Q векторлары фазалық қателікті дұрыс бағалай алатындай ету, яғни желінің шығысы $\hat{e}_{\varphi}[k]$ ақиқат мәнге барынша жақын болуын генерациялайды. Симуляция кезінде біз сигналды өзіміз құрамыз Δf, Δφ, SNR, динамика сияқты параметрлерді алдын ала беріп, соның нәтижесінде әр уақыт қадамындағы ақиқат фазалық қате $e_{\varphi}[k]$ дәл белгілі болады (нысана мән). Сондықтан оқыту қадағаланатын оқыту (supervised learning) түрінде жүргізіледі. Әр кіріс үлгісіне (БКИ нәтижесі) сәйкес дұрыс жауап (ақиқат $e_{\varphi}[k]$ беріледі, ал желі параметрлері шығыс қателігін азайтатындай жаңартылады.

Нейрондық желі берген $\hat{e}_{\varphi}[k]$ фазалық қатесі классикалық жабық кері байланыс сандық loop-filter арқылы өңделіп, сандық басқарылатын генератор) параметрлерінде жаңартылады[16]. PI-тәрізді екінші жабық кері байланыс үшін:

$$u[k] = K_p \hat{e}_{\varphi}[k] + K_i \sum_{m=0}^{k} \hat{e}_{\varphi}[m] \tag{8}$$

Нейрондық желіден келген $\hat{e}_{\varphi}[k]$ мәні одан әрі сандық loop-filter арқылы тазартылып (шуды басып, динамикаға жауап беретіндей қалыпқа келтіріліп), сандық басқарылатын генератордың басқаруына әсері ретінде беріледі. Екінші ретті PI-тәрізді жабық кері байланыс үшін бұл логика өте түсінікті болады. *P-арна* (пропорционал бөлік) фазалық қатеге тез жауап беріп, қысқа уақытта қателікті азайтады, ал *I-арна* (интеграл бөлік) қалдық жиілік қателігін (Δf) жойып, тұрақты ығысу қалдырмайды сондықтан PLL құлыпта тұруға қабілетті болады. Сандық басқарылатын генератордың жиілігін жаңарту мына түрде болаыд

$$\hat{f}[k+1] = \hat{f}[k] + u[k], \tag{9}$$

Фазаны жаңарту:

$$\hat{\varphi}[k+1] = \hat{\varphi}[k] + 2\pi \hat{f}[k] T_s \tag{10}$$

мұнда Ts – ілмек жаңарту периоды (әдетте жалпы интеграция уақытына T тең немесе соған жуық), Kp және Ki жабық кері байланыс коэффициенттері.

Ұсынылған бағалау әдістемесі жабық ілмектің сезімталдығын сандық анықтауға мүмкіндік береді және үш негізгі қадамнан тұрады.

Фазаны бағалау дәлдігі (дисперсиясы) аддитивті кешенді ақ Гаусс шуы бар жағдайда Крамер-Раоның төменгі шегімен (CRLB) шектеледі, яғни кез келген ығыспайтын бағалаушы үшін

$$\mathrm{Var}\left(\hat{\varphi}\right) \geq \mathrm{CRLB}_{\varphi} \tag{11}$$

БКИ режимінде ақпарат B блоктан жиналады, сондықтан Фишер ақпараты блоктар бойынша жинақталады:

$$\mathrm{I}_{\varphi}^{(\mathrm{BCI})} = \sum_{b=1}^{B} \mathrm{I}_{\varphi,b}, \qquad \mathrm{CRLB}_{\varphi}^{(\mathrm{BCI})} = \left(\mathrm{I}_{\varphi}^{(\mathrm{BCI})}\right)^{-1} \tag{12}$$

мұнда $I_{\varphi,b}$ – b-блоктан алынатын фаза жөніндегі Фишер ақпараты.

CRLB пен жабық кері байланыс контуры фазалық джиттері арасындағы байланыс жабық кері байланыс дискриминатор қателігінің дисперсиясы жабық кері байланыс динамикасымен сүзгіден өтеді. Жабық контурдағы қалдық фазалық қателіктің дисперсиясы:

$$\sigma_{\varphi}^{2} \approx \alpha\left(K_{p}, K_{i}, T_{s}\right)\mathrm{Var}\left(\hat{\varphi}\right) \tag{13}$$

$\mathrm{Var}\left(\hat{\varphi}\right)$ сол бағалаудың *дисперсиясы* (өлшеу/шудың салдарынан пайда болатын белгісіздік). $\alpha(K_p, K_i, T_s)$ жабық кері байланысқа тән эквивалент шу күшейтудың өткізу коэффициенті. Көбіне контурдың шу бойынша беру функциясына байланысты болады. Өлшеу шумы жабық контур арқылы қалай сүзілетінін бір санға жинақтап береді. Kp пропорционал күшейту (PI-регулятордың P бөлігі).Ki интегралдық күшейту (PI-регулятордың I бөлігі). Ts дискреттеу периоды (sample time), яғни алгоритмнің жаңару қадамы.

Бұл формула өлшеу/бағалау шумы $\mathrm{Var}\left(\hat{\varphi}\right)$ жабық контурда нақты *фазалық jitter*-ге қалай айналатынын көрсетеді. Яғни, контур параметрлерін (Kp, Ki, Ts) таңдағанда, шу деңгейі σ_{φ} қанша болатынын алдын ала бағалауға мүмкіндік береді. Бұлар сәйкесінше, CRLB қолданғанда:

$$\sigma_{\varphi}^{2} \text{‰} \alpha\left(K_{p}, K_{i}, T_{s}\right)\mathrm{CRLB}_{\varphi} \tag{14}$$

Мұнда α(·) жабық кері байланыс эквивалент коэффициенті (жартылай аналитикалық модельдеу арқылы анықталады). CRLB_{φ} фазаны бағалаудың теориялық ең төмен мүмкін дисперсия шегі. Бұл формула жүйенің ең жақсы (идеал) жағдайда қол жеткізе алатын *фазалық jitter* деңгейін төменнен шектейді. Яғни теориялық шек береді: қанша жерден алгоритмді жақсартсаңыз да, SNR/шулар берілгенде σ_{φ} белгілі бір шамадан төмен түсе алмайды (контур арқылы α көбейткішімен өтеді). Сондықтан сезімталдық шегін анықтау үшін жабық кері байланыс «lock» күйін жоғалтпау шарты ретінде фазалық джиттер белгілі бір шектен аспауы тиіс:

$$\sigma_{\varphi} \leq \sigma_{\mathrm{th}} \tag{15}$$

Мұндағы σ_{th} *lock жоғалтпау үшін рұқсат етілетін фазалық jitter шегі* (threshold). Бұл шек көбіне cycle slip ықтималдығы, детектор/демодулятордың жұмыс аймағы, сызықтандыру шарттары сияқты критерийлермен таңдалады. Себебі lock шарты егер RMS фазалық қате σ_{φ} осы шектен асып кетсе, контур *lock*-ты ұстай алмай, синхроннан шығып кетуі мүмкін. Демек (15) арқылы: сезімталдық шегін (ең төмен SNR) табады немесе K_p, K_i, T_sбаптауы дұрыс па тексереді. Сол негізде БКИ-NPLL әдісінің негізгі түйіндері жүйеленді.

Симулация және нәтижелерді талдау бөлімі

Бұл бөлімде ұсынылған нейрондық дискриминатор және оны қолданатын БКИ негізіндегі NPLL қадағалау кері байланыс жұмыс қабілеті модельдеу арқылы бағаланды. Нәтижелер екі кезеңде талданады: (1) нейрондық дискриминатордың фазаны бағалау дәлдігі, (2) нейрондық оқытуға қосылған БКИ негізіндегі NPLL кері байланыстық терең оқыту трекинг тұрақтылығы және жиілікті/фазаны бағалау қателігі анықталады.

I_b және Q_b мәндерінің масштабы әртүрлі болған жағдайда, нейрондық желіні оқытпас бұрын Z[k] матрицасын алдын ала нормалау ұсынылады. Коррелятордан алынған I_b және Q_b өлшемдерінің динамикалық диапазоны әртүрлі болуы мүмкін, бұл нейрондық желінің үйрену тұрақтылығына кері әсер етеді. Сондықтан Z[k] матрицасына нормалау енгізу ұсынылады. Амплитудалық нормалаудың:

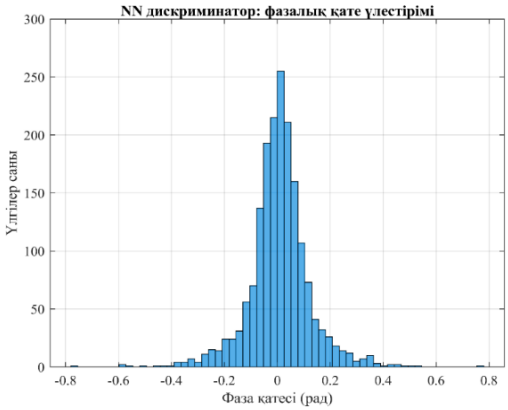
$$I_{b}^{(n)}[k] = \frac{I_{b}[k]}{\sqrt{I_{b}^{2}[k] + Q_{b}^{2}[k]} + \varepsilon}, \qquad Q_{b}^{(n)}[k] = \frac{Q_{b}[k]}{\sqrt{I_{b}^{2}[k] + Q_{b}^{2}[k]} + \varepsilon} \tag{16}$$

Мұнда ε нөлге бөлінуді болдырмайтын кіші тұрақты. Балама ретінде стандарттау қолданылуы мүмкін:

$$\mathbf{Z}^{(n)}[k] = \frac{\mathbf{Z}[k] - \mu}{\sigma} \quad (17)$$

Мұнда μ және σ оқыту жиынтығы бойынша есептелген орта мән және стандарттық ауытқу. Нормалау нейрондық дискриминатордың конвергенциясын жақсартып, төмен C/N0 аймағында бағалау дәлдігін тұрақтандыруға мүмкіндік береді.

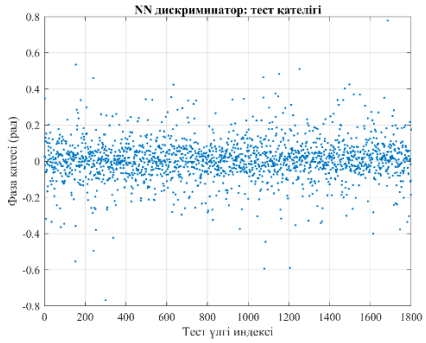
NN дискриминатордың фазаны бағалау дәлдігін тексеру үшін оның шығаратын фазалық қате сигналы e_φ[k]] (рад) талданды. Қателіктің таралуын көру мақсатында еφ[k] мәндерінің үлестірімі гистограмма 2-суретте көрсетілді.



Сурет 2 – NN дискриминатор: фазалық қате үлестірімі. $e\varphi[k]$ фазалық қатесінің (рад) гистограммасы, мұндағы Yүлгі саны

Гистограмма фазалық қатенің негізгі бөлігі 0 рад маңында шоғырланғанын көрсетеді, яғни NN дискриминатордың бағалауы орташа алғанда жүйелі ығысуды (bias) аз береді. Үлестірімнің салыстырмалы симметриялығы қателіктің «оң/теріс» бағытта теңгерімді екенін, ал шеткі құйрықтар сирек кездесетін үлкен қателердің бар екенін білдіреді. Бұл қателер кейін loop-filter арқылы өңделіп, сандық басқарылатын осциллятор параметрлерін жаңартуға түсетіндіктен, үлестірімнің ені (дисперсиясы) ілмектің фазалық джиттеріне және қадағалау тұрақтылығына тікелей әсер етеді.

Оқытылған нейрондық дискриминатордың жалпылау қабілетін бағалау үшін бөлек тест жиынында фазалық қате еφ[k] есептелді. Тест үлгілеріндегі қателіктің уақыт/индекс бойынша өзгерісі нүктелік диаграмма ретінде 3-суретте берілді.



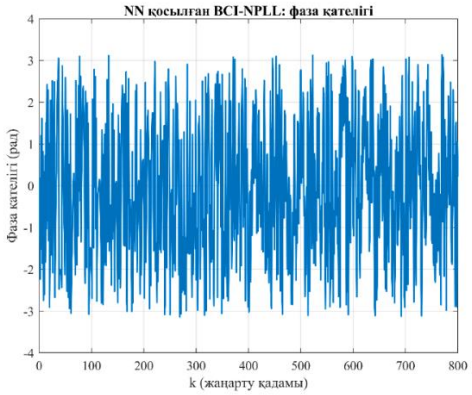
Сурет 3 – Нейрондық дискриминатор фазалық қатенің $e\varphi[k]$ (рад) мәндерінің үлгі индексіне тәуелді таралуы

Нүктелердің басым бөлігі 0 рад маңында орналасқан, бұл дискриминатордың орташа қателігінің аз екенін (bias-тың төмендігін) көрсетеді. Қателіктің үлгі индексі бойынша айқын тренд бермеуі модельдің тест деректерінде тұрақты жұмыс істейтінін білдіреді. Сирек кездесетін үлкен ауытқулар шуылдың/күрделі үлгілердің әсерінен пайда болуы мүмкін және олар ілмектегі loop-filter параметрлерін таңдауда ескеріледі.

NN-дискриминатор BCI-NPLL құрылымында фазалық дискриминатор ретінде қолданылады: ол блоктық когерентті интеграциядан алынған Z[k] матрицасы бойынша фазалық қатені e_φ[k] бағалайды. Бұл қате сигналы сандық PI кері байланыс қате сигналын фильтрі арқылы өңделіп, сандық басқарылатын осциллятор/генератор параметрлерін жаңартады. Нәтижесінде контурдың ішкі реплика сигналы кіріс сигналмен синхрондалып, $\hat{\varphi}[k]$ (фаза) және $\hat{f}[k]$ (жиілік) бағалары біртіндеп түзетіледі. Қадағалау сапасын сандық бағалау үшін фазалық қателіктің орташа квадраттық қателігі (RMSE) қолданылды.

$$RMSE_{tr} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}\left(\mathrm{wrap}\left(\varphi_{true}[k]-\hat{\varphi}[k]\right)\right)^2} \tag{18}$$

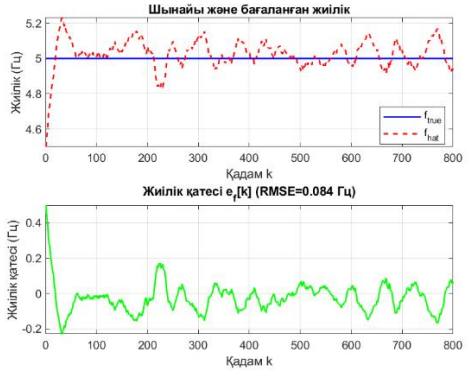
Мұнда N – жаңарту қадамдарының саны, φ_{true}[k] шынайы фаза, $\hat{\varphi}[k]$ контур бағалаған фаза, ал wrap(·) фаза айырмасын (−π,π] аралығына келтіреді себебі фазаның оралуын жою үшін. Нейрондық желі дискриминатордан алынған фазалық қате сигналы PI- кері байланыс сүзгісі арқылы өңделіп, сандық басқарылатын осциллятор параметрлері жаңартылды. Осы бөлімде нейрондық желі қосылған БКИ негізінде NPLL қадағалау контурының уақыт бойынша фазалық қателік динамикасы көрсетіледі.



Сурет 4 – Нейрондық желі қосылған БКИ негізіндегі NPLL қадағалау контурындағы фазалық қателік $\Delta\varphi[k]$ (рад) мәнінің k жаңарту қадамдары бойынша өзгеруі

Графиктен фазалық қателік Δφ[k] уақыт бойынша нөл маңында тербелетіні байқалады, яғни контур қадағалау режимін сақтайды. Қадағалау сапасы сандық түрде 18 формуллада келтірілген RMSEtr көрсеткіші арқылы бағаланды (төмен RMSEtr дәл қадағалау белгісі).

Фазалық қателікпен қатар, қадағалау контурының жиілік бойынша қаншалықты дұрыс түзетілетінін бағалау үшін жиілік қателігінің Δf[k] уақыт бойынша өзгерісі қарастырылады. Төмендегі график нейрондық желі қосылған БКИ негізінде NPLL жүйесіндегі жиілік қателігінің k жаңарту қадамдары бойынша динамикасын көрсетеді.



Сурет 5 – Нейрондық желі қосылған БКИ негізінде NPLL қадағалау контурындағы жиілік қателігі Δf[k] (Гц) мәнінің k жаңарту қадамдары бойынша өзгеруі

Суретте дискриминаторы қосылған БКИ негізінде NPLL ілмегінің жиілікті бағалау нәтижесін көрсетеді. Жоғарғы графикте шынайы жиілік f_{true} (көк) және ілмекпен бағаланған жиілік f_{hatf} (қызыл штрих) салыстырылған. Бастапқы өтпелі процестен кейін f_{hat} траекториясы f_{true} мәнін сенімді қадағалап, ұзақ уақыт аралығында тұрақты түрде ұстап тұрады, яғни ілмек тұрақты режимге (lock) кіреді.

$e_f[k]=f_{true}[k]-f_{hat}[k]$ берілген. Қате нөл маңында шоғырланып, шектеулі диапазонда тербеледі және айқын дрейф байқалмайды. Қателіктің орташа квадраттық қателігі RMSE=0.084Гц, бұл ұсынылған NN-BCI дискриминаторы мен NPLL кері байланыс тізбегі қалдық жиілік қателігін тиімді басатынын және бағалаудың дәлдігі шуылмен шектелетін деңгейге жеткенін көрсетеді. Қажет болған жағдайда тербелісті одан әрі азайту үшін ілмек жолағын (немесе Kp,Ki кішірейту және/немесе интеграция уақытын ұлғайту ұсынылады.

Қорытынды

Бұл жұмыста GNSS байланысындағы әлсіз сигнал жағдайында тасымалдаушыны (фаза/жиілік) қадағалау сапасын арттыру үшін блоктарға бөлінген когерентті интеграцияға негізделген нейрондық PLL (ББИ–NPLL) тәсілі ұсынылды. Ұзақ когерентті интеграцияда жиілік сәйкессіздігі мен динамика әсерінен пайдалы компоненттің әлсіреуі байқалатындықтан, сигналды қысқа блоктарға бөлу арқылы пайдалы ақпараттың сақталуы жақсарды және классикалық дискриминатордың орнына нейрондық желі дискриминаторы енгізіліп, фазалық қателікті бағалау жақсыртылды.

Модельдеу нәтижелері нейрондық дискриминатор қателігінің нөл маңында шоғырланатынын және жүйелі ығысуының төмен екенін көрсетті, ал нейрондық желі қосылған ББИ-NPLL контуры фазаны қадағалау режимін сақтап, фазалық қателіктің нөл маңында тербелуі арқылы lock күйін жоғалтпай жұмыс істейтінін дәлелдеді. Жиілік бойынша бастапқы өтпелі процестен кейін бағаланған жиілік шынайы жиілікті сенімді қадағалап, қалдық жиілік қатесі төмен деңгейде қалды (жиілік қателігінің орташа квадраттық қателігі шамамен 0.084 Гц), бұл ұсынылған құрылымның әлсіз сигналда да жиілік/фаза қателіктерін тиімді басатынын көрсетеді.

Ұсынылған тәсілді қалалық каньон, көлеңкелі аймақтар және ғимарат ішінде сияқты сигнал әлсірейтін ортада, сондай-ақ UAV/робот/автономды көлік тәрізді динамикасы жоғары платформаларда трекинг орнықтылығын арттыру үшін және бағдарламалық (SDR) GNSS қабылдағыштарында әлсіз сигналды қадағалау модулін күшейту бағытында қолдануға болады.

Әдебиеттер тізімі

1. Jing S. Weak and dynamic GNSS signal tracking strategies for flight missions in the space service volume / S. Jing et al // Sensors. – 2016. – Vol. 16, № 9. – Art. 1412. https://doi.org/10.3390/s16091412.
2. Scientific and methodological bases of GPS monitoring of intensive movements of the Earth's crust in the earthquake-prone regions of Kazakhstan / Zh.Sh. Zhantayev et al // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Physics and Mathematics. – 2020. – Vol. 3, № 331. – P. 177-182. https://doi.org/10.32014/2020.2518-1726.51.
3. A two-stage Kalman filter-based carrier tracking loop for weak GNSS signals / Y. Cheng et al // Sensors. – 2019. – Vol. 19, № 6. – Art. 1369. https://doi.org/10.3390/s19061369.
4. Guo K. Effects of GNSS receiver tuning on the PLL tracking jitter estimation in the presence of ionospheric scintillation / K. Guo, M. Aquino, S. Vadakke Veettil // Space Weather. – 2020. – Vol. 18, № 7. – Article e2019SW002362. https://doi.org/10.1029/2019SW002362.
5. Examining the tolerance of GNSS receiver phase tracking loop under the effects of severe ionospheric scintillation conditions based on its bandwidth / I.P. Portella et al // Radio Science. – 2021. – Vol. 56, № 6. – P. 1-11. https://doi.org/10.1029/2020RS007160.
6. Bochkati M. Use of ultra-low-bandwidth tracking loops for improved GNSS receiver phase tracking under thermal stress / M. Bochkati, J. Dampf, T. Pany // NAVIGATION: Journal of the Institute of Navigation. – 2026. – Vol. 73. – Article navi.744. https://doi.org/10.33012/navi.744.

7. Evaluation of adaptive loop-bandwidth tracking techniques in GNSS receivers / I. Cortés et al // Sensors. – 2021. – Vol. 21, № 2. – Art. 502. https://doi.org/10.3390/s21020502.
8. A carrier estimation method based on MLE and KF for weak GNSS signals / H. Zhang et al // Sensors. – 2017. – Vol. 17, № 7. – Art. 1468. https://doi.org/10.3390/s17071468.
9. Stevanovic S. A GPS phase-locked loop performance metric based on the phase discriminator output / S. Stevanovic, B. Pervan // Sensors. – 2018. – Vol. 18, № 1. – Art. 296. https://doi.org/10.3390/s18010296.
10. O'Driscoll C. Choosing the coherent integration time for Kalman filter-based carrier-phase tracking of GNSS signals / C. O'Driscoll, M.G. Petovello, G. Lachapelle // GPS Solutions. – 2011. – Vol. 15. – P. 345-356. https://doi.org/10.1007/s10291-010-0194-4.
11. Improved GNSS vector tracking loop to enhance the navigation performance of USV / W. Liu et al // Ocean Engineering. – 2022. – Vol. 258. – Art. 111865. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111865.
12. Weak GPS signal tracking using block coherent integration based on NN discriminator / Z. Gong et al // Research Square. – 2025. – Preprint. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-6350123/v1.
13. Borio D. A non-coherent architecture for GNSS digital tracking loops / D. Borio, G. Lachapelle // Annals of Telecommunications. – 2009. – Vol. 64, № 9-10. – P. 601-614. https://doi.org/10.1007/s12243-009-0114-1.
14. Zhao W. Adaptive multiple-model Kalman filter for GNSS carrier phase and frequency estimation through wideband interference / W. Zhao, S. Khanafseh, B. Pervan // NAVIGATION: Journal of the Institute of Navigation. – 2024. – Vol. 71, № 2. – Article navi.646. https://doi.org/10.33012/navi.646.
15. Guillard A. Using convolutional neural networks to detect GNSS multipath / A. Guillard, P. Thevenon, C. Milner // Frontiers in Robotics and AI. – 2023. – Vol. 10. – Art. 1106439. – https://doi.org/10.3389/frobt.2023.1106439.

Н.П. Сапарходжаев[1], А. Хабай[2]*, М.Ж. Иген[2], Е.А. Тулешов[2,3], Ж.Н. Исабеков[2]
[1]Рудненский индустриальный университет,
г. Рудный, Костанайская область, ул. 50 лет Октября, 38
[2]Satbayev University,
050013, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22
[3]Институт механики и машиноведения имени академика У.А. Джолдасбекова,
Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Шевченко, 28
*e-mail: a.khabay@satbayev.university

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА GNSS-СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

В канале GNSS при слабом сигнале точность слежения за фазой и частотой, несущей в приёмнике резко, ухудшается, что снижает устойчивость и качество навигационного решения. Целью данной работы является улучшение качества слабого GNSS-сигнала, то есть повышение чувствительности системы автоматической регулировки, несущей в условиях низкого качества сигнала и динамических воздействий, а также уменьшение фазовых/частотных ошибок. Объект исследования – базовый I/Q-сигнал на выходе коррелятора GNSS-приёмника и работа контура слежения за несущей. В предложенном методе вместо традиционной длительной когерентной интеграции используется блочно-когерентная интеграция (БКИ). Общее время интеграции T сохраняется, сигнал делится на BBB коротких блоков, и по результатам I_b,Q_b формируется матрица Z[k]. Эта матрица сохраняет изменения амплитуды и фазы и точнее описывает влияние частотного рассогласования и динамики. Далее нейросетевой дискриминатор (CNN+MLP), обрабатывающий данные, оценивает фазовую ошибку, которая затем фильтруется PI-подобным loop-filter и в замкнутой обратной связи обновляет параметры численно управляемого генератора (NCO). Научная новизна заключается в представлении информации БКИ в виде 2D-матрицы, замене классического дискриминатора контура фазовой синхронизации нейросетевым дискриминатором в замкнутой структуре BCI–NPLL, а также в численном обосновании чувствительности через связь CRLB и фазового джиттера. Результаты моделирования показали, что предложенный подход сохраняет устойчивость слежения в области слабых сигналов, фазовая ошибка концентрируется около нуля, а точность оценки частоты является высокой (RMSE≈0.084 Гц). В результате метод позволяет улучшить качество слабого GNSS-сигнала и повысить устойчивость трекинга приёмника.

Ключевые слова: *GNSS, слабый сигнал, блочно-когерентная интеграция (БКИ), нейронная PLL (NPLL), CNN-дискриминатор, PI loop-filter, NCO, CRLB*.

N.P. Saparhodzhaev[1], A. Khabay[2]*, M.Zh. Igen[2], E.A. Tuleshov[2,3], Zh.N.Issabekov[2]
[1]Rudny Industrial University,
Rudny, Kostanay Region, 50 Let Oktyabrya Street, 38
[2]Satbayev University,
050013, Republic of Kazakhstan, Almaty, Satpayev Street, 22
[3]Institute of Mechanics and Mechanical Engineering named after Academician U.A. Dzholdasbekov,
Republic of Kazakhstan, Almaty, Shevchenko Street, 28
*e-mail: a.khabay@satbayev.university

IMPROVING ARTIFICIAL INTELLIGENCE–BASED METHODS FOR ENHANCING GNSS SIGNAL QUALITY

In a Global Navigation Satellite System (GNSS) communication channel under weak-signal conditions, accurate tracking of the receiver carrier phase and frequency degrades sharply, reducing the stability and overall quality of the navigation solution. The purpose of this work is to improve weak GNSS signal quality, i.e., to increase the sensitivity of the carrier automatic control (tracking) system under low-quality signals and dynamic impacts and to reduce phase/frequency errors. The research object is the baseband I/Q signal at the output of the GNSS receiver correlator and the operation of the carrier tracking loop. The proposed method replaces conventional long coherent integration with block coherent integration (BCI). The total integration time T is preserved, the signal is divided into BBB short blocks, and a matrix Z[k] is formed from the block results I_b, Q_b. This matrix preserves amplitude-phase variations and more accurately characterizes the effects of frequency mismatch and dynamics. Next, a neural-network discriminator (CNN+MLP) that processes Z[k] estimates the phase error; the error is then filtered by a PI-type loop filter and, in closed feedback, updates the parameters of the numerically controlled oscillator (NCO). The novelty of the approach lies in representing BCI information as a 2D matrix, replacing the classical phase-locked loop discriminator with a neural discriminator in a closed BCI-NPLL architecture, and providing a quantitative sensitivity justification via the CRLB-phase jitter relationship. Simulation results show that the proposed approach maintains tracking stability in the weak-signal region, the phase error is concentrated around zero, and the frequency estimation accuracy is high (RMSE≈0.084 Hz). Consequently, the method improves weak GNSS signal quality and increases receiver tracking robustness.

Key words: *GNSS, weak signal, block coherent integration (BCI), neural PLL (NPLL), CNN discriminator, PI loop filter, NCO, CRLB.*

Авторлар туралы мәліметтер

Нурбек Пажарбекович Сапарходжаев – PhD, қауымдастырылған профессор, Басқарма Төрағасы-Ректор, Рудный индустриалық университеті, Рудный, Қазақстан; e-mail: nursp81@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9204-5374.

Анар Хабай* – PhD, қауымдастырылған профессор, Satbayev University, «Электротехника және ғарыштық техника телекоммуникациясы» кафедрасы, Алматы, Қазақстан; e-mail: a.khabay@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0409-1531.

Мағжан Жақсылықұлы Иген – магистрант Satbayev University, «Электротехника және ғарыштық техника телекоммуникациясы» кафедрасы, Алматы, Қазақстан; e-mail: 030303500411-m@stud.satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-7156-5182.

Еркебулан Амандыкович Тулешов – т.ғ.к., қауымдастырылған профессор, Роботты техника және автоматиканың техникалық құралдары кафедрасы, Satbayev University, Автоматика және ақпараттық технологиялар институты, Алматы, Қазақстан; e-mail: y.tuleshov@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9146-7137.

Жанібек Назарбекұлы Исабеков – PhD, қауымдастырылған профессор, Роботты техника және автоматиканың техникалық құралдары кафедрасы, Satbayev University, Автоматика және ақпараттық технологиялар институты, Алматы, Қазақстан; e-mail: z.issabekov@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2900-8025.

Сведения об авторах

Нурбек Пажарбекович Сапарходжаев – PhD, ассоциированный профессор, председатель правления-Ректор, Рудненский индустриальный университет, Рудный, Казахстан; e-mail: nursp81@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9204-5374.

Анар Хабай* – PhD, ассоциированный профессор, Satbayev University, кафедра «Электротехники и космической техники телекоммуникаций», Алматы, Казахстан; e-mail: a.khabay@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0409-1531.

Магжан Жаксылыкович Иген – магистрант Satbayev University, кафедра «Электротехника и космическая техника Телекоммуникации», Алматы, Казахстан; e-mail: 030303500411-m@stud.satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-7156-5182.

Еркебулан Амандыкович Тулешов – к. т. н., ассоциированный профессор, кафедра робототехники и технических средств автоматики, Satbayev University, Институт автоматики и информационных технологий, Алматы, Казахстан; e-mail: y.tuleshov@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9146-7137.

Жанибек Назарбекович Исабеков – PhD, ассоциированный профессор, кафедра робототехники и технических средств автоматики, Satbayev University, институт автоматики и информационных технологий, Алматы, Казахстан; e-mail: z.issabekov@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2900-8025.

References

Nurbek Pazharbekovich Saparkhodzhayev – PhD, associate professor, Chairman of the management board-Rector, Rudny industrial University, Rudny, Kazakhstan; e-mail: nursp81@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9204-5374.

Anar Khabay* – PhD, associate professor, Satbayev University, Department of Electrical Engineering and Telecommunications of space technology, Almaty, Kazakhstan; e-mail: a.khabay@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0409-1531.

Magzhan Zhaksylykovich Igen – master's student Satbayev University, Department of Electrical Engineering and Telecommunications of space technology, Almaty, Kazakhstan; e-mail: 030303500411-m@stud.satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-7156-5182.

Erkebulan Amandykovich Tuleshov – candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of robotics and technical means of automation, Satbayev University, Institute of automation and information technologies, Almaty, Kazakhstan; e-mail: y.tuleshov@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9146-7137.

Zhanibek Nazarbekovich Issabekov – PhD, Associate Professor, Department of robotics and technical means of automation, Satbayev University, Institute of automation and information technologies, Almaty, Kazakhstan; e-mail: z.issabekov@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2900-8025.

Редакцияға енуі 01.06.2026
Жариялауға қабылданды 17.06.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-5

IRSTI: 28.23.13

M.A. Sambetbayeva[1,3], V.B. Barakhnin[2], A.N. Sultangaziyeva[1,4,*], N.K. Mukazhanov[1,5], R.A. Begim[3]

[1]«Q» University, 050026, Republic of Kazakhstan, Almaty, str. Baizakov 125/185,
[2]Novosibirsk State Technical University,
Russia, Novosibirsk 630087, str. Nemirovicha-Danchenko 136.
[3]L.N. Gumilyov Eurasian National University,
010008, Republic of Kazakhstan, Astana, Satpayev str. 2.
[4]Astana International University,
010000, Republic of Kazakhstan, Astana, Qabanbay Batyr Avenue, 8
[5]Narxoz University, Kazakhstan, Almaty 050035, str. Zhandosov 55.
*e-mail: anar_sultangazieva@aiu.edu.kz

ONTOLOGY-AWARE FOR PHENOTYPE TERM NORMALIZATION AND GROUP ASSIGNMENT

Abstract: *This study addresses the problem of automating the processing of terminological data using ontology-oriented methods of natural language processing. Modern information systems increasingly operate with heterogeneous and poorly structured terms presented in the form of lists or textual descriptions, which complicates their normalization, comparison, and subsequent automatic classification. This problem is particularly relevant in biomedical informatics, where phenotypic descriptions of hereditary diseases require standardized representation for integration into intelligent information systems.*

©M.A. Sambetbayeva, V.B. Barakhnin, A.N. Sultangaziyeva, N.K. Mukazhanov, R.A. Begim, 2026

The paper proposes an ontology-aware NLP algorithm aimed at the normalization of terms and their automatic distribution into a fixed set of semantic groups based on an ontological model. The approach combines methods for entity extraction and normalization, ontological linking, and taxonomic classification, enabling the generation of a formalized and reproducible representation of terminological data. As the semantic basis, the specialized PNGO ontology (Phenotype-based Normalized Group Ontology) is used, implemented in OWL 2 format and defining a fixed set of 23 phenotypic groups anchored to the Human Phenotype Ontology (HPO) hierarchy.

The proposed approach provides a deterministic and interpretable alternative to machine and deep learning methods, ensuring reproducibility and semantic consistency of results without requiring a training stage on annotated data. The effectiveness of the solution is confirmed by experimental evaluation on five hereditary diseases comprising 53 phenotype terms, where the algorithm achieved a macro-average F1-score of 0.919. The resulting structured profile is suitable for integration into information systems, analytical modules, and reproducible computational pipelines.

Key words: *ontology-aware NLP; phenotype normalization; knowledge graphs; semantic grouping; SPARQL; biomedical informatics.*

Introduction

The development of information technologies and the increase in the volume of data is accompanied by an increase in the volume of terminological data used in information, analytical and intellectual systems. Such data is often presented in an unstructured or poorly formalized form, which significantly limits the ability to automatically process, compare and reuse them in computational pipelines. To solve this problem, methods of information search and extraction, natural language processing, machine learning and deep learning algorithms can be used [1-4]. However, the search for information and obtaining specific data related to a particular subject area requires individual research and the search for special approaches. This is because fields such as medicine, law, marketing, etc. have their own terminology, meaning of terms and relationship semantics, as well as specifics of presenting data in textual form. One of the ways to solve the problems of identification and extraction of semantic connections between text data is the ontological approach [5, 6].

One of the urgent tasks of ontology-aware NLP is to develop methods for normalization and semantic binding of terms with controlled dictionaries and ontologies. The use of ontological models allows for the consideration of hierarchical and semantic relationships between the terms, providing a more stable and interpretable classification compared to exclusively statistical approaches.

In this paper, an algorithm for automatic normalization of terms and their distribution on semantic groups based on the ontological model is proposed. Unlike traditional classification methods, the proposed approach uses the taxonomic structure of ontology as the basis for the formation of a reproducible and formalized representation of terminological data.

The goal of the paper is to develop and test the ontology-aware NLP algorithm, which provides automatic normalization of terms and their grouping within the reproducible computational pipelines, focused on the tasks of automation and information technology.

Methods

In modern research on processing phenotypic and biomedical information, machine learning, deep learning and clinical NLP methods are widely used, focused on extracting and normalizing terms from unstructured texts [7-9]. Such approaches, as a rule, use trained neural and transformer models and demonstrate high accuracy rates, but require significant volumes of marked data, stages of learning and post-learning, and are characterized by limited interpretability and difficulties of reproducibility of results [5, 10].

An alternative direction is ontology-aware and knowledge graph-oriented methods in which the ontological structure is used as a direct semantic basis for data processing [3-6]. Within the framework of this work, this approach is used: The proposed ontology-aware NLP method is implemented in the form of a deterministic algorithm and does not involve the use of trained models, providing interpretability, reproducibility and formalized distribution of phenotypic terms on a fixed set of phenotypic groups.

The paper proposes a deterministic method of automatic processing of phenotypic information, based on the use of ontologies and controlled dictionaries. The approach is focused on the normalization of phenotypic terms and their subsequent distribution on a predetermined set of phenotypic groups. The use of ontologies and knowledge graphs as a semantic basis corresponds to modern approaches in the field of knowledge processing and information technology [3, 6, 11].

The study is methodical and algorithmic in nature and does not involve the use of patient data or clinical histories. All operations are performed on open, standardized sources of knowledge, which ensures reproducibility of results and absence of ethical restrictions. As a semantic basis, the specialized applied ontology PNGO (Phenotype-based Normalized Group Ontology), developed for the problems of normalization and grouping of phenotypic features, is used.

The PNGO ontology (Phenotype-based Normalized Group Ontology) was developed specifically for the tasks of normalization and structured grouping of phenotypic features of hereditary diseases. The ontology is implemented in OWL 2 / Turtle format and comprises 9 classes, 8 object properties, and 15 data properties. The classes include: Disease, PhenotypeMention, NormalizedPhenotype, PhenotypeGroup, GroupAssignment, InheritanceStatement, ExtractionRun, SourceRecord, and MatchingMethod. The ontology supports four normalization strategies: dictionary match, fuzzy match, embedding similarity match, and rule-based match.

The ontology defines a fixed set of 23 phenotypic groups anchored to the top-level hierarchy of the Human Phenotype Ontology (HPO). Each group is linked to an anchor HPO identifier that defines its semantic scope. The 23 groups are: Head abnormalities (HP:0000235), Facial abnormalities (HP:0000272), Nervous system abnormalities (HP:0000708), Eye abnormalities (HP:0000479), Ear abnormalities (HP:0000599), Nose abnormalities (HP:0000368), Mouth abnormalities (HP:0000154), Neck abnormalities (HP:0000465), Cardiovascular abnormalities (HP:0001627), Respiratory abnormalities (HP:0002087), Digestive system abnormalities (HP:0025031), Metabolism or homeostasis abnormalities (HP:0001941), Endocrine abnormalities (HP:0000819), Genitourinary abnormalities (HP:0000121), Musculoskeletal abnormalities (HP:0033127), Skeletal abnormalities (HP:0000925), Blood and hematopoietic abnormalities (HP:0001872), Immune system abnormalities (HP:0002716), Integument abnormalities (HP:0001575), Growth abnormalities (HP:0001508), Prenatal development abnormalities (HP:0001199), Neoplasms (HP:0002665), and Mode of inheritance (HP:0000005).

The input data are standardized phenotypic descriptions presented in the form of ontological identifiers, text terms and their synonymous forms, as well as, if any, inheritance type attributes. Ontological sources are considered as immutable reference books and are used exclusively to extract the structure of knowledge and semantic connections. In contrast to the trained models, the ontologically based approach ensures the interpretability and predictability of the results.

PNGO ontology is task-oriented and optimized to distribute phenotypes at a fixed upper level, represented by a set of 23 phenotypic groups reflecting the main clinical-anatomical and functional categories. Ontology is implemented in the form of an OWL model and includes hierarchically organized classes of phenotypic features and properties that ensure their semantic binding with the corresponding groups. The hierarchical structure allows to determine the belonging of phenotypic features to groups based on their position in taxonomy, which ensures the interpretability and reproducibility of the grouping procedure.

Formally, the task is to construct a mapping of a set of phenotypic features

$$P = \{p_1, p_{2,\dots} p_n\} \quad (1)$$

into a set of phenotypic groups

$$G = \{g_1, g_{2,\dots} g_{23}\} \quad (2)$$

as a result, a structured phenotypic profile of the disease is automatically formed. Such a profile represents the distribution of phenotypic features into groups and allows you to move from an unstructured list of terms to a formalized representation suitable for computational processing.

Each phenotypic feature is pre-normalized and associated with the corresponding concept of ontology, which eliminates terminological ambiguity and allows the use of the hierarchy of ontology in analysis. Additionally, a normalized inheritance type attribute can be included in the profile as a separate element, ensuring the integrity of the representation. The quantitative characteristics of the ontology are shown in Figure 1 (see Figure 1).

The figure presents the main quantitative characteristics of the ontology, including the number of classes, axioms, object and annotation properties, as well as hierarchical relationships that reflect the scale and structural complexity of the model used.

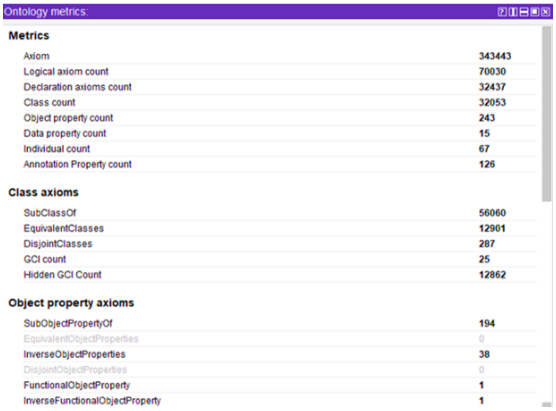


Figure 1 – Protégé Ontology Metrics

Architecture of Methodological Solution

The proposed method is implemented in the form of a sequential ontological-oriented pipeline, which includes the stages of preparation of input data, normalization of terms, ontological binding, distribution of phenotypes into groups and formation of a structured result. The steps are logically independent and can be reproduced separately, which increases the transparency and extensibility of the solution (see Figure 2).

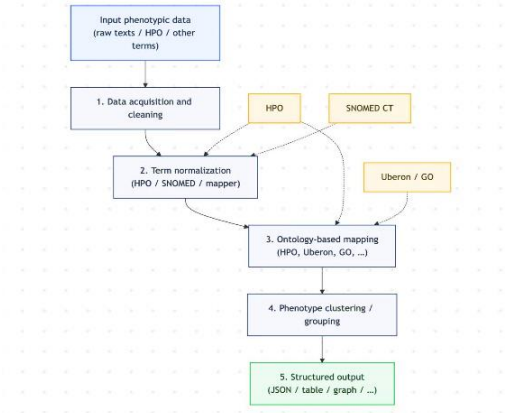


Figure 2 – Ontologically oriented pipeline of normalization and grouping of phenotypic data

Normalization and Ontological Binding

At the normalization stage, input phenotypic terms are brought to the canonical form by bringing the register, removing service symbols, matching synonyms and linking text forms to ontological identifiers. This eliminates terminological variability and ensures unambiguous alignment with the ontological representation.

Next, the ontological binding of phenotypes with classes of PNGO ontology is performed on the basis of coincidence of identifiers, normalized names and synonymous relationships, taking into account hierarchical consistency. In cases of ambiguity, a priority rule based on the level of specificity of the concept in taxonomy is applied.

Distribution by Phenotypic Groups

Distribution of phenotypic features by groups is carried out on the basis of the analysis of the hierarchy of ontology. For each normalized feature, its belonging to one or more phenotypic groups is determined in accordance with predetermined rules. Multiple ownership uses a controlled priority strategy.

Phenotypic groups are represented in PNGO ontology as upper-level classes, which ensures the interpretability and reproducibility of the grouping procedure.

Output View Generation and Reproducibility

The result of the method is a structured phenotypic profile of the disease, presented in machine-readable form (table or JSON), including a list of phenotypic groups, their corresponding signs and a normalized value of the type of inheritance.

The method is completely deterministic and does not contain stochastic components. All processing steps and distribution rules are formalized and can be reproduced using the same input data and ontology versions.

The proposed algorithm is based on the ontologically-based grouping of phenotypic features and the use of the knowledge graph-oriented representation of knowledge [3, 6, 12]. The algorithm is deterministic and is implemented in the form of sequential processing of input phenotypic data using an ontological structure and a fixed set of phenotypic groups.

In the first step, many phenotypic features are extracted from the source of standardized data, presented in the form of ontological identifiers or text terms. If available, information about the type of inheritance of the disease is also extracted (see Formula 1).

Next, the normalization of phenotypic features is performed, including the reduction of terms to canonical form, the elimination of variability and the comparison of text representations with ontological identifiers. As a result, each phenotypic feature is uniquely associated with the corresponding concept of ontology.

After normalization, phenotypes are ontologically linked to the nodes of PNGO ontology, taking into account their position in the hierarchy. In cases of ambiguous correspondence, a priority rule based on semantic specificity and depth of the concept in taxonomy is applied.

For each normalized phenotypic feature, its belonging to phenotypic groups from a fixed set is determined (see Formula 2).

The distribution is based on the analysis of the ontological hierarchy and predefined compliance rules. Multiple potential affiliation uses a fixed ambiguity resolution strategy that provides either unambiguous classification or controlled multi-group affiliation.

Unlike approaches based on learning models and large language models [7,10-13], the proposed algorithm does not require a learning stage and does not contain stochastic components.

The result of the algorithm is a structured phenotypic profile of the disease

$$Profil(D) = \{(G_k, P_k)\} \quad (3)$$

where each phenotypic group is compared a subset of phenotypic features, or an empty set in their absence. The normalized value of the inheritance type is included in the profile as a separate category.

The final view is formed in a machine-readable format (table or hierarchical structure) and can be used for analysis, visualization and integration into intelligent data processing systems. The algorithm provides determinism, interpretability, reproducibility, and extensibility.

Results

As a result of the application of the proposed algorithm for each disease, a structured phenotypic profile is formed, representing the distribution of normalized phenotypic features on a fixed set of phenotypic groups. The algorithm provides a transition from an unstructured list of phenotypes to a formalized and machine-readable representation suitable for subsequent analysis and integration into information systems.

The obtained results demonstrate that the use of the ontological structure allows to correctly take into account the semantic connections between phenotypes and ensure their coordinated distribution across clinical and anatomical groups.

As an illustrative example, disease D is considered, for which a list of phenotypic features in the form of ontological identifiers and text terms is presented in the source of standardized data. After normalization and ontological binding, each phenotypic feature was automatically assigned to the corresponding phenotypic group.

The result of the algorithm is a structured phenotypic profile of the disease, in which phenotypic features are grouped by clinical-anatomical systems. At the same time, for certain groups there may be a lack of phenotypes, which is also an informative result and reflects the specifics of the phenotypic description of a particular disease (see Figure 3).

The figure shows an individual of ontology corresponding to the disease, with automatically associated normalized phenotypic traits and an attribute of the type of inheritance, illustrating the result of the formation of a structured phenotypic profile.

Extraction and representation of the phenotypic profile was performed using requests to the ontological model in the Protégé environment. The distribution of phenotypic features across groups is presented in Table 1. (see Table 1).

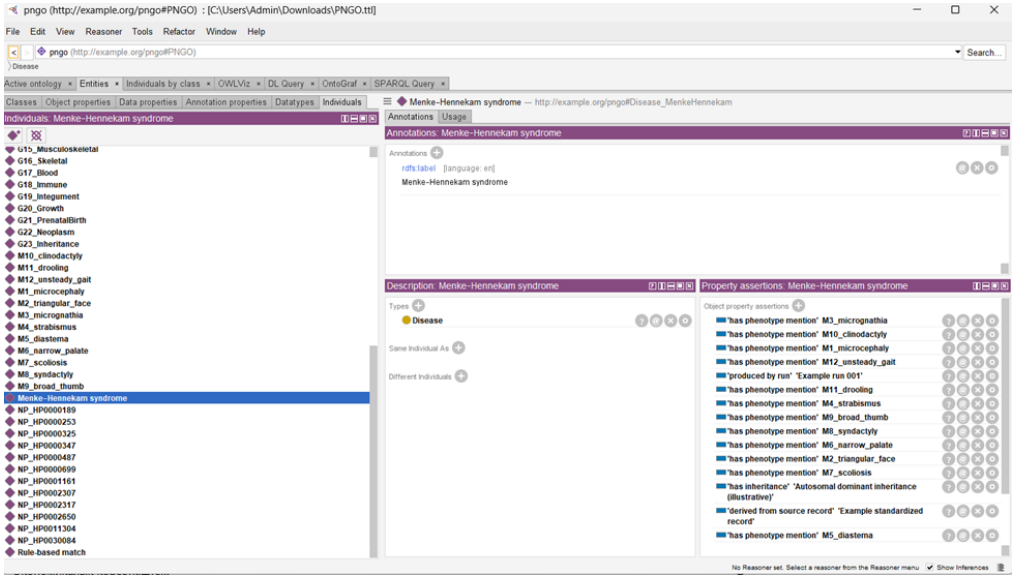


Figure 3 – An example of ontological representation and phenotypic annotation of the disease (Menke-Hennekam syndrome)

Table 1 – An example of a structured phenotypic profile of the disease

№	Phenotypic group	Phenotypic features
1	Abnormalities of head development	Microcephaly
2	Abnormalities of facial development	Hypertelorism
3	Abnormalities of the nervous system	Delayed psychomotor development
4	Abnormalities of the musculoskeletal system	Kyphoscoliosis
5	Abnormalities of the skin	Skin abnormalities
6	Growth abnormalities	Growth retardation
7	Inheritance pattern	Autosomal recessive

Analysis of the results shows that the algorithm correctly distributes phenotypic features to phenotypic groups based on ontological hierarchy. Phenotypes related to different clinical-anatomical systems are not mixed between groups, which confirms the semantic consistency of the method.

In addition, the explicit representation of empty groups allows preserving the integrity of the phenotypic profile and using it for subsequent comparison of diseases, aggregation of data and construction of feature representations.

The graph representation of the formed phenotypic profile of the disease is shown in Figure 4 (see Figure 4).

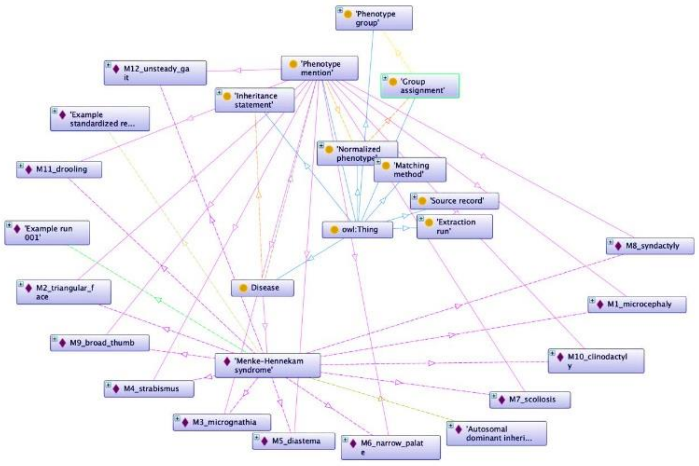


Figure 4 – Graphic representation of the structured phenotypic profile of the disease

The figure shows an ontological graph representation of the disease with nodes corresponding to phenotypic features and type of inheritance, and edges reflecting semantic relationships between them. The graph illustrates the result of the proposed algorithm and demonstrates the formation of a coherent phenotypic profile of the disease.

To confirm the reproducibility and feasibility of the proposed ontological approach, the extraction of the structured phenotypic profile of the disease was carried out using standard SPARQL queries directly to the PNGO ontology.

Queries were performed in the Protégé environment using the Snap SPARQL Query interface and provided a bypass of the ontological graph from the individual disease through associated phenotypic traits normalized in terms of Human Phenotype Ontology (HPO) to the corresponding phenotypic groups.

The formation of the phenotypic profile of the disease is realized not as external data post-processing, but as a direct extraction of knowledge formalized in the ontological model (see Figure 5).

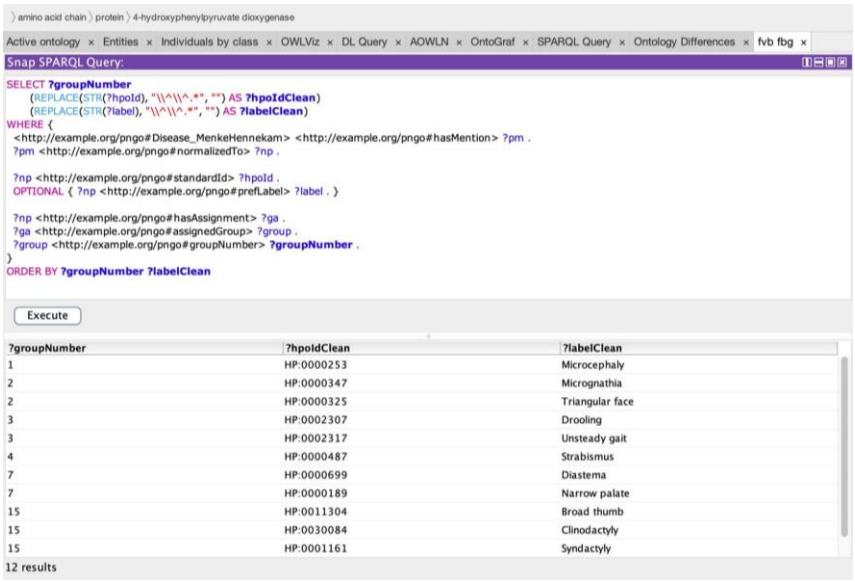


Figure 5 – Result of execution of SPARQL-request for extraction of structured phenotypic profile of Menke-Hennekam syndrome

The obtained results confirm that the proposed algorithm provides automatic formation of a structured phenotypic profile of the disease and can be used in the tasks of intellectual processing of medical information, analysis of hereditary diseases and preparation of data for subsequent computational methods.

To demonstrate the universality of the proposed algorithm, it was applied to four additional hereditary diseases with distinct phenotypic profiles: Marfan Syndrome (OMIM 154700), Down Syndrome (OMIM 190685), Turner Syndrome (OMIM 613577), and Cystic Fibrosis (OMIM 219700). For each disease, phenotypic features were extracted from standardized data sources in HPO identifier format, normalized, and automatically assigned to the corresponding phenotypic groups of the PNGO ontology. The resulting structured profiles are summarized in Table 2.

To quantitatively evaluate the performance of the proposed algorithm, a pilot experiment was conducted on five hereditary diseases comprising 53 phenotype terms in total. For each term, the algorithm output was compared against a gold-standard group label assigned according to the HPO top-level organ system hierarchy. The evaluation metrics are presented in Table 3.

The results across all five diseases confirm that the algorithm correctly assigns phenotypic features to semantically appropriate groups based on the ontological hierarchy, achieving a macro-average F1-score of 0.919. The lower performance observed for Turner Syndrome (F1 = 0.778) is attributable to phenotypic overlap between the Endocrine and Genitourinary groups, reflecting a known ambiguity in HPO taxonomy. These results demonstrate the robustness and generalizability of the proposed approach across diseases with diverse phenotypic profiles.

Table 2 – Structured phenotypic profiles of additional diseases

Disease (OMIM)	Phenotypic group	Phenotypic features (HPO)
Marfan Syndrome (154700)	Cardiovascular	Mitral valve prolapse (HP:0001634); Aortic root aneurysm (HP:0002616)
	Eye	Ectopia lentis (HP:0001083); Deeply set eye (HP:0000490)
	Skeletal	Scoliosis (HP:0002650); Pectus carinatum (HP:0000768)
Down Syndrome (190685)	Nervous system	Seizures (HP:0001250); Globaldevelopmental delay (HP:0001263); Delayed speech (HP:0000750)
	Cardiovascular	Atrial septal defect (HP:0001631); Ventricular septal defect (HP:0001629)
	Growth	Failure to thrive (HP:0001508)
Turner Syndrome (613577)	Growth	Short stature (HP:0000876)
	Cardiovascular	Bicuspid aortic valve (HP:0001631)
	Integument	Hypohidrosis (HP:0000966); Hyperpigmentation (HP:0000953)
Cystic Fibrosis (219700)	Respiratory	Bronchiectasis (HP:0002110); Asthma (HP:0002099); Emphysema (HP:0002097)
	Digestive	Exocrine pancreatic insufficiency (HP:0001738); Malabsorption (HP:0002024)
	Endocrine	Diabetes mellitus (HP:0000819)

Table 3 – Quantitative evaluation of the PNGO algorithm (Precision, Recall, F1-score)

Disease	Terms	TP	FP	Prec.	Recall	F1
Menke–Hennekam syndrome	12	12	0	1.000	1.000	1.000
Marfan Syndrome	10	9	1	0.900	0.900	0.900
Down Syndrome	12	11	1	0.917	0.917	0.917
Turner Syndrome	9	7	2	0.778	0.778	0.778
Cystic Fibrosis	10	10	0	1.000	1.000	1.000
Overall (Macro-average)	53	49	4	0.919	0.919	0.919

Discussion

In this paper, a deterministic ontologically based algorithm for the formation of a structured phenotypic profile is proposed, based on the display of phenotypic features in a fixed set of upper-level phenotypic groups. The obtained results are correlated with modern research in the field of ontology-aware NLP, ontological modeling and knowledge graph-oriented approaches.

A structured comparison of the proposed PNGO algorithm with existing approaches (ML/DL, LLM-based, knowledge graph-based, and ontology-aware NLP) is presented in Table 4.

Table 4 – Comparison of the proposed PNGO algorithm with existing approaches

Criterion	ML/DL	LLM-based	KG-based	Proposed (PNGO)	Ontology NLP
Requires training data	Yes (large)	Yes (large)	No	No	No
Interpretability	Low	Low–Medium	Medium	High	Medium
Reproducibility	Stochastic	Stochastic	Deterministic	Deterministic	Deterministic
Semantic grouping	Implicit	Implicit	Partial	Explicit (23 gr.)	Partial
Ontology as core basis	No	Partial	Yes	Yes	Yes
Structured profile output	No	No	Partial	Yes	No
Normalization to HPO	Partial	Partial	Yes	Yes	Yes
F1-score (this study)	–	–	–	0.919	–

Unlike the methods of machine and deep learning, widely used to extract phenotypic information from texts [7, 8, 9]. the proposed algorithm does not require a learning stage and provides interpretability, reproducibility and predictability of the results. The ontological structure is used not as an infrastructure layer, but as a direct semantic basis of the grouping algorithm, which allows to form an interpreted profile without the involvement of statistical models [3, 4, 6].

An additional level of abstraction is proposed in the form of a fixed set of phenotypic groups, which allows to move from flat lists of phenotypes to a structured representation and increase the comparability of profiles. Semantic aggregation is formalized as an explicit mapping of $F: P \rightarrow G$, which enhances the interpretability and reproducibility of the method.

The novelty of this work lies in:

1) deterministic ontology-based grouping without ML,

2) introduction of PNGO ontology with fixed 23 groups,

3) formal mapping F: P → G for phenotype structuring.

The limitations of the approach include the dependence of results on the quality of the source data and the ontology used, as well as the fixed set of groups, which requires possible adaptation for other subject areas. Promising areas of further research are the integration of the algorithm with methods of automatic extraction of terms from unstructured texts [7,8] and the development of hybrid solutions that combine deterministic ontological grouping with the capabilities of modern language models [5, 10].

Conclusion

The article presents ontology-aware NLP-algorithm of automatic normalization of terms and their distribution on a fixed set of semantic groups based on the ontological model. The proposed approach provides a transition from unstructured terminological data to a formalized and machine-readable representation suitable for use in automated information systems.

Experimental testing showed that the use of the ontological structure allows to provide semantically consistent classification of terms, as well as to preserve the reproducibility of results due to the explicit formalization of distribution rules in ontology. The resulting structured profile can be used for subsequent analysis, data aggregation and integration into knowledge-based systems.

The proposed method is focused on the problems of automation and information technology and can be extended to handle various subject areas using controlled dictionaries, taxonomies and ontologies. Further development of the work is associated with the scaling of the algorithm and its integration into complex reproducible NLP-computational pipelines.

References

1. Uyghur–Kazakh–Kirghiz text keyword extraction based on morpheme segmentation / S. Parhat et al // Information. 2023. – Vol. 14, № 5. – P. 283. https://doi.org/10.3390/info14050283.

2. Hoehndorf R. The role of ontologies in biological and biomedical research: A functional perspective / R. Hoehndorf, P.N. Schofield, G.V. Gkoutos // Briefings in Bioinformatics. – 2015. – Vol. 16, № 6. – P. 1069-1080. https://doi.org/10.1093/bib/bbv011.

3. A review on knowledge graphs for healthcare: Resources, applications, and promises / H. Cui et al // Journal of Biomedical Informatics. – 2025. – Vol. 169. – P. 104861. https://doi.org/10.1016/j.jbi.2025.104861.

4. Explainable artificial intelligence for breast cancer: A visual case-based reasoning approach / J.-B. Lamy et al // Artificial Intelligence in Medicine. – 2019. – Vol. 94. – P. 42-53. https://doi.org/10.1016/j.artmed.2019.01.001.

5. Opportunities and challenges for ChatGPT and large language models in biomedicine and health / S. Tian et al // Briefings in Bioinformatics. – 2024. – Vol. 25, № 1. – P. bbad493. https://doi.org/10.1093/bib/bbad493.

6. Riquelme-García A. Annotation of biological samples data to standard ontologies with support from large language models / A. Riquelme-García, J. Mulero-Hernández, J.T. Fernández-Breis // Computational and Structural Biotechnology Journal. – 2025. – Vol. 27. – P. 2155-2167. https://doi.org/10.1016/j.csbj.2025.02.018.

7. Deep learning in clinical natural language processing: A methodical review / S. Wu et al // Journal of the American Medical Informatics Association. – 2020. – Vol. 27, № 3. – P. 457-470. https://doi.org/10.1093/jamia/ocz200.

8. Arora A. Named entity recognition for clinical text: A review / A. Arora, E. Nyberg, C.P. Rosé // Artificial Intelligence in Medicine. – 2021. – Vol. 113. – P. 102039. https://doi.org/10.1016/j.artmed.2021.102039.

9. Clinical natural language processing in languages other than English: Opportunities and challenges / A. Névéol et al // Journal of Biomedical Semantics. – 2020. – Vol. 11. – P. 12. https://doi.org/10.1186/s13326-020-00239-7.

10. Lu Z. Large language models in biomedicine and health / Z. Lu, Y. Peng // Journal of the American Medical Informatics Association. – 2024. – Vol. 31, № 8. – P. 1801-1811. https://doi.org/10.1093/jamia/ocae089.
11. BioPortal: An open community resource for sharing, searching, and utilizing biomedical ontologies / J. Vendetti et al // Bioinformatics. – 2025. – Vol. 41, № 2. – P. gkaf402. https://doi.org/10.1093/bioinformatics/gkaf4020.
12. Biomedical knowledge graph–optimized prompt generation for large language models / K. Soman et al // Bioinformatics. – 2024. – Vol. 40, № 9. – P. btae560. https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btae560.
13. A survey on unifying large language models and knowledge graphs in biomedicine / R. Xu et al // Bioinformatics. – 2025. – Vol. 41, No. 1. – P. btaf018. – DOI: 10.1093/bioinformatics/btaf018
14. Nicholson D. N., Greene C. S. Constructing knowledge graphs and their biomedical applications // Computational and Structural Biotechnology Journal. – 2020. – Vol. 18. – P. 1414-1428. – DOI: 10.1016/j.csbj.2020.05.017
15. Hogan A., Blomqvist E., Cochez M. [et al.]. Knowledge graphs // ACM Computing Surveys. – 2021. – Vol. 54, No. 4. – P. 1-37. – DOI: 10.1145/3447772

Funding: *This research has been funded by the Committee of Science of the Ministry of Science and higher Education of the Republic of Kazakhstan Grant AP26105113.*

М.А. Самбетбаева[1,3], В.Б. Барахнин[2], А.Н. Сұлтанғазиева[1,4*], Н.К. Мукажанов[1,5], Р.А. Бегім[3]
[1]«Q» University,
050026, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Байзақов көш., 125/185
[2]Новосибирск мемлекеттік техникалық университеті,
Ресей, Новосибирск қ., 630087, Немирович-Данченко көш., 136
[3]Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
010008, Қазақстан Республикасы, Астана қ., Сәтбаев көш., 2
[4]Astana International University,
010000, Қазақстан Республикасы, Астана қ., Қабанбай батыр даңғ., 8
[5]Narxoz University,
050035, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Жандосов көш., 55
*e-mail: anar_sultangazieva@aiu.edu.kz

ОНТОЛОГИЯҒА БАҒЫТТАЛҒАН ФЕНОТИП ТЕРМИНДЕРІН НОРМАЛДАНДЫРУ МЕН ТОПТАСТЫРУҒА АРНАЛҒАН ӘДІСТЕР

Бұл жұмыста терминологиялық деректерді өңдеуді автоматтандыру мәселесі онтологияға бағытталған табиғи тілдерді өңдеу әдістерін қолдану арқылы қарастырылады. Қазіргі ақпараттық жүйелер әртүрлі және әлсіз құрылымдалған терминдермен жұмыс істейді, олар көбінесе тізімдер немесе мәтіндік сипаттамалар түрінде ұсынылады, бұл олардың нормалдануын, салыстырылуын және кейінгі автоматты жіктелуін қиындатады. Бұл мәселе биомедициналық информатикада ерекше өзектілікке ие, өйткені тұқым қуалайтын аурулардың фенотиптік сипаттамалары интеллектуалды ақпараттық жүйелерге интеграция үшін стандартталған көріністі талап етеді.

Мақалада онтологияға негізделген NLP алгоритмі ұсынылған, ол терминдерді нормалдандыруға және оларды онтологиялық модель негізінде алдын ала анықталған 23 семантикалық топ жиынтығына автоматты түрде бөлуге бағытталған. Ұсынылған тәсіл мәндерді шығару және нормалдандыру, онтологиялық байланыстыру және таксономиялық жіктеу әдістерін біріктіре отырып, терминологиялық деректердің формалданған және қайта жаңғыртылатын көрінісін қамтамасыз етеді. Семантикалық негіз ретінде OWL 2 форматында жүзеге асырылған және Human Phenotype Ontology (HPO) иерархиясына байланған 23 фенотиптік топтың бекітілген жиынтығын анықтайтын PNGO (Phenotype-based Normalized Group Ontology) мамандандырылған онтологиясы қолданылады.

Ұсынылған тәсіл машиналық және терең оқыту әдістеріне детерминирленген және интерпретацияланатын балама болып табылады, таңбаланған деректерде оқыту кезеңінсіз нәтижелердің қайта жаңғыртылуын және семантикалық сәйкестігін қамтамасыз етеді. Шешімнің тиімділігі бес тұқым қуалайтын ауру бойынша (53 фенотиптік термин) эксперименттік бағалаумен расталған, мұнда алгоритм макро-орташаланған F1 = 0,919 көрсеткішіне қол жеткізді. Нәтижелі құрылымдалған профиль ақпараттық жүйелерге, аналитикалық модульдерге және қайта орындалатын есептеу конвейерлеріне енгізуге жарамды.

Түйін сөздер: *онтологияға негізделген NLP; фенотиптерді нормалдандыру; білім графтары; семантикалық топтастыру; SPARQL; биомедициналық информатика.*

М.А. Самбетбаева[1,3] , В.Б. Барахнин[2] , А.Н. Сұлтанғазиева[1,4*], Н.К. Мукажанов[1,5], Р.А. Бегім[3]
[1]«Q» University, 050026, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Байзақов көш., 125/185
[2]Новосибирск мемлекеттік техникалық университеті,
Ресей, Новосибирск қ., 630087, Немирович-Данченко көш., 136
[3]Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
010008, Қазақстан Республикасы, Астана қ., Сәтбаев көш., 2
[4]Astana International University,
010000, Қазақстан Республикасы, Астана қ., Қабанбай батыр даңғ., 8
[5]Narxoz University,
050035, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Жандосов көш., 55
*e-mail: anar_sultangazieva@aiu.edu.kz

ОНТОЛОГИЧЕСКИ ОРИЕНТИРОВАННАЯ НОРМАЛИЗАЦИЯ ТЕРМИНОВ ФЕНОТИПОВ И ПРИСВОЕНИЕ ГРУПП

В данной работе рассматривается задача автоматизации обработки терминологических данных с использованием онтологически-ориентированных методов обработки естественного языка. Современные информационные системы всё чаще работают с разнородными и слабо структурированными терминами, представленными в виде списков или текстовых описаний, что существенно усложняет их нормализацию, сопоставление и последующую автоматическую классификацию. Особую актуальность данная проблема приобретает в биомедицинской информатике, где фенотипические описания наследственных заболеваний требуют стандартизированного представления для интеграции в интеллектуальные информационные системы.

В статье предложен ontology-aware NLP алгоритм, направленный на нормализацию терминов и их автоматическое распределение по фиксированному набору семантических групп на основе онтологической модели. Подход объединяет методы извлечения и нормализации сущностей, онтологического связывания и таксономической классификации, обеспечивая формализованное и воспроизводимое представление терминологических данных. В качестве семантической основы используется специализированная онтология PNGO (Phenotype-based Normalized Group Ontology), реализованная в формате OWL 2 и определяющая фиксированный набор из 23 фенотипических групп, привязанных к иерархии Human Phenotype Ontology (HPO).

Предложенный подход представляет собой детерминированную и интерпретируемую альтернативу методам машинного и глубокого обучения, обеспечивая воспроизводимость и семантическую согласованность результатов без необходимости этапа обучения на размеченных данных. Эффективность решения подтверждена экспериментальной оценкой на пяти наследственных заболеваниях (53 фенотипических термина), где алгоритм достиг макро-усреднённого показателя F1 = 0,919. Результирующий структурированный профиль пригоден для интеграции в информационные системы, аналитические модули и воспроизводимые вычислительные конвейеры.

Ключевые слова: *онтологически-ориентированный NLP; нормализация фенотипов; графы знаний; семантическая группировка; SPARQL; биомедицинская информатика.*

Сведения об авторах

Мадина Аралбаевна Самбетбаева – Phd, ассоциированный профессор кафедры информационных систем, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, ведущий научный сотрудник «Q» University, Республика Казахстан Астана; e-mail:sambetbayeva_ma_1@enu.kz. ORCID:https://orcid.org/0000-0001-9358-1614.

Владимир Борисович Барахнин – доктор технических наук; заведующий лабораторией информационных ресурсов Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий, профессор факультета прикладной математики и информатики Новосибирского государственного технического университета, Новосибирск, Россия; e-mail: bar@ict.nsc.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3299-0507.

Анар Несіпбекқызы Сұлтанғазиева* – магистр информатики, докторант Высшая школа информационных технологий и инженерии, Международный университет Астана, младший сотрудник «Q» University, Республика Казахстан Астана; e-mail:anar_sultangazieva@aiu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-9038-5234.

Нуржан Какенович Мукажанов – руководитель проекта «Q» University, PhD, ассоциированный профессор Школы цифровых технологий, Университет Нархоз Республика Казахстан Алматы; e-mail:nurzhan.mukazhanov@narxoz.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4835-5751.

Раушан Аянқызы Бегім – магистрант кафедры информационных систем, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Республика Казахстан Астана; e-mail:rsn.alst@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-9859-5300.

Авторлар туралы мәліметтер

Мадина Аралбайқызы Самбетбаева – PhD, Ақпараттық жүйелер кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, "Q" University жетекші ғылыми қызметкері, Қазақстан Республикасы Астана; e-mail:sambetbayeva_ma_1@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9358-1614.

Владимир Борисович Барахнин – техника ғылымдарының докторы; Ақпараттық және есептеу технологиялары жөніндегі федералдық зерттеу орталығының Ақпараттық ресурстар зертханасының меңгерушісі; Новосібір мемлекеттік техникалық университетінің Қолданбалы математика және информатика факультетінің профессоры, Новосібір, Ресей; e-mail:bar@ict.nsc.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3299-0507.

Анар Несіпбекқызы Сұлтанғазиева* – информатика магистрі, Ақпараттық технологиялар және инженерия жоғары мектебінің докторанты, Астана халықаралық университеті, «Q» University кіші ғылыми қызметкері, Қазақстан Республикасы Астана; e-mail:anar_sultangazieva@aiu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-9038-5234.

Нұржан Кәкенұлы Мукажанов – «Q» University жоба жетекшісі, PhD, Цифрлық технологиялар мектебінің қауымдастырылған профессоры, Нархоз университеті Алматы; e-mail: nurzhan.mukazhanov@narxoz.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4835-5751.

Раушан Аянқызы Бегім – Ақпараттық жүйелер кафедрасының магистранты, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қазақстан Республикасы Астана; e-mail: rsn.alst@gmail.com. ORCID:https://orcid.org/0009-0008-9859-5300.

Information about the authors

Madina Aralbaevna Sambetbaeva – PhD, associate professor of the department of Information systems, L.N. Gumilyov Eurasian National University, leading researcher at Q University, Republic of Kazakhstan Astana; e-mail: sambetbayeva_ma_1@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9358-1614.

Vladimir Borisovich Barakhnin – Doctor of technical sciences; head of the laboratory of Information resources at the federal research center for information and computational technologies; Professor of the faculty of Applied mathematics and informatics at Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia; e-mail:bar@ict.nsc.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3299-0507.

Anar Nesipbekkyzy Sultangaziyeva* – master of computer science, doctoral student at the Higher School of Information Technologies and Engineering, Astana International University, junior researcher at “Q” University, Republic of Kazakhstan Astana; e-mail: anar_sultangazieva@aiu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-9038-5234.

Nurzhan Kakenovich Mukazhanov – project leader at “Q” University, PhD, associate professor of the School of Digital Technologies, Narxoz University Republic of Kazakhstan Almaty; e-mail: nurzhan.mukazhanov@narxoz.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4835-5751.

Raushan Ayankyzy Begim – master’s student of the Department of Information systems, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Republic of Kazakhstan Astana; e-mail: rsn.alst@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-9859-5300.

Received 30.03.2026
Revised 26.05.2026
Accepted 28.05.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-6

IRSTI: 28.23.25

O. Umarov[1], Zh. Oralbekova[1]*, Sh. Tutkyshbayeva[1], D. Oralbekova[2], G. Tyulepberdinova[3]
[1]Astana IT University,
010000, Republic of Kazakhstan, Astana, 55/11 Mangilik El avenue, C1 block
[2]Institute of Information and Computational Technologies,
050010, Republic of Kazakhstan, Almaty, 28 Shevchenko street
[3]Al-Farabi Kazakh National University,
050040, Republic of Kazakhstan, Almaty, 71 Al-Farabi avenue
*e-mail: zh.oralbekova@astanait.edu.kz

STUDENT STRESS CLASSIFICATION BASED ON MACHINE LEARNING ALGORITHMS

Annotation: *Survey instruments remain the most practical approach for large-scale monitoring of student stress in educational settings, and the Perceived Stress Scale (PSS) continues to be validated across contexts. This study evaluates how modern, off-the-shelf machine-learning methods perform on a tabular, multi-class student survey with pronounced class imbalance. We conduct a two-stage evaluation. First, we benchmark Decision Tree (DT), Random Forest (RF), and k-Nearest Neighbors (KNN) across five train-test regimes (90/10, 80/20, 70/30, 60/40, 50/50) to probe stability under different sample sizes. Second, we add an imbalance-aware experiment on an 80/20 split using SMOTE-style oversampling, and compare RF, Gradient Boosting (GB), and XGBoost (XGB). We report macro-averaged metrics suited for skewed multi-class targets. Across the five-split benchmark, RF and KNN are consistently stronger than a single DT. These outcomes align with recent evidence that tree-based ensembles dominate on typical tabular data and with reports that ensembles are reliable for stress-related classification. On the 80/20 split, RF and XGBoost tie at macro-F1 ≈ 0.73, while an additional SVM (RBF) reaches the best macro-F1 of 0.86. Clustering and projections confirm that stress responses form a continuum rather than discrete groups.*

Key words: *student stress, survey classification, tabular data, Random Forest, Gradient Boosting, XGBoost, class imbalance, macro F1.*

Introduction

Educational institutions regularly conduct student surveys to monitor groups of students and offer help at an early stage. Proven self-assessment tools, in particular Perceived Stress Scale (PSS), are widely used and psychometrically evaluated [1]. As data volumes increase, the pertinent inquiry is whether conventional machine learning can convert survey responses into more timely and focused interventions.

Tree-based ensembles, particularly Random Forests (RF) [2] and XGBoost (XGB) [3], provide an appealing combination of precision, resilience, and manageable engineering demands for tabular surveys. Recent cross-task observations emphasize that, on “typical tabular” problems with mixed discrete/continuous predictors and heterogeneous signal, tree-based models often outperform deep learning [4-5]. Ensemble methods have shown great reliability in stress analytics [6].

This paper presents a two-stage comparative analysis of a three-class student stress classification (Eustress, Distress, No Stress). Stage A is a common baseline study that uses Decision Tree (DT) / RF / k-Nearest Neighbors (KNN) across five splits to see how stable and sensitive it is to the size of the training set. Stage B uses SMOTE to deal with imbalances on the 80/20 split and compares RF, Gradient Boosting (GB), and XGB. We prioritize macro-averaged metrics over accuracy [7] and discuss the advantages of precision-recall (PR)-centric diagnostics in skewed contexts [8].

Random Forests combine random decision trees to lower variance while keeping bias low [2]. XGBoost is an example of a boosting family. These families build additive models that fix residual errors stage by stage and get the best results on structured features [3]. On a larger methodological scale, tree-based models have consistently surpassed deep networks in tabular problems characterized by modest sample sizes and categorical signals [4-5]. A recent study validates the efficacy of ensembles in the particular field of stress classification [6].

©O. Umarov, Zh. Oralbekova, Sh. Tutkyshbayeva, D. Oralbekova, G. Tyulepberdinova, 2026

Raw accuracy can be misleading with skewed labels; macro-averaged precision, recall, and F1 weigh classes equally and provide a fairer view of minority performance [7, 9]. When the positive class is rare, PR is usually more useful than ROC for diagnostic curves [8].

Resampling is a useful choice. Using Synthetic Minority Oversampling Technique (SMOTE) – style oversampling on the training set, which often makes it easier to remember rare classes without messing up the test distribution [10].

Materials and methods

We analyzed dataset [11] of 843 respondents, each represented by 26 numerical characteristics (25 input features and one target variable) that cover both demographic attributes (such as sex and age) and a variety of behavioral and psychological indicators including sleep quality, headaches frequency, the level of anxiety, workload perception, and academic concentration. These variables collectively provide a multidimensional view of stress-related symptoms and lifestyle factors.

The target variable is a three-class categorical sign distinguished between Eustress (positive, motivating stress), Distress (negative, harmful stress) and No Stress. The data set shows a strong imbalance of classes, most of which belong to Eustress. According to stratified section 80/20, the test set contains 154 Eustress, 6 Distress and 9 No Stress instances (a total of = 169), which makes the minority categories particularly difficult for generalizing the model. This imbalance requires careful selection of metrics and re-sampling strategies to ensure fair evaluation of models in all groups.

Preprocessing. The data set is already enumerated, requiring minimal transformation before modeling. For stage A (5-part baseline study) we apply an easy pre-processing channel and standardize the functions only for the KNN algorithm, which relies on distance calculations and is sensitive to different scales. Decision Tree and Random Forest models are used on raw feature scales because they are scalable.

Baseline study across five split regimes**.** We benchmark DT, RF, KNN on five stratified splits: 90/10, 80/20, 70/30, 60/40, 50/50. Each model is trained on the training portion of the split and evaluated on its hold-out. We report Accuracy, macro-Precision, macro-Recall, and macro-F1 [7]. KNN uses standardized features; DT/RF do not require scaling.

Imbalance-aware ensembles on 80/20. On an 80/20 stratified split, we apply SMOTE-style oversampling [10] to the training set only, then fit:

- Random Forest (RF) with 200 trees and class_weight = ‘balanced’ [2];
- Gradient Boosting (GB) from a standard library implementation;
- XGBoost (XGB) with default multi-class objective [3]. We again report macro-averaged metrics and per-class scores.

KNN was implemented with k = 5. Decision Tree and Random Forest used the default scikit-learn settings. SVM employed an RBF kernel with C = 1.0 and gamma = ‘scale’. XGBoost used the multi-class objective with eval_metric = 'mlogloss' and random_state = 42.

Following guidance in [7] and [9], we emphasize macro-F1 as the main scalar summary. Under severe imbalance, we additionally recommend PR-curve analyses for minority classes [8]. Macro-F1 as the main scalar summary.

All experiments were conducted in Python 3.12 using Google Colab. The main libraries included scikit-learn 1.6, xgboost, pandas, numpy and imbalanced-learn. To ensure reproducibility, stratified train–test splitting was performed with random_state = 42, and all stochastic models were initialized using the same random seed where applicable. Feature standardization for KNN and SVM was performed using StandardScaler.

Results and Discussion

Stage A – Five-split baseline benchmark (DT, RF, KNN)

Table 1 replicates our split-wise results. Metrics are macro-averaged.

Observations: (1) RF and KNN always do better than DT on macro-F1. (2) KNN does better when it is scaled; its best macro-F1 (0.768) is at 70/30. (3) RF is stable across splits, which is what the literature says about ensemble stability [2, 4, 6]. (4) DT has a higher variance and a lower macro-F1, which is what you would expect from a single-tree learner on targets that are noisy and unbalanced.

Table 1 – Train results

#	Algorithm	Iteration	Features	Targets	Train %	Test %	Accuracy	Precision	Recall	F1
0	Decision Tree	1	25	3	90	10	0.882353	0.506410	0.506410	0.506410
1	Decision Tree	2	25	3	80	20	0.863905	0.565382	0.692690	0.611121
2	Decision Tree	3	25	3	70	30	0.893281	0.600405	0.607915	0.590070
3	Decision Tree	4	25	3	60	40	0.881657	0.544913	0.557766	0.547879
4	Decision Tree	5	25	3	50	50	0.886256	0.564035	0.610006	0.579058
5	Random Forest	1	25	3	90	10	0.929412	0.813008	0.523504	0.598611
6	Random Forest	2	25	3	80	20	0.934911	0.977505	0.616667	0.705026
7	Random Forest	3	25	3	70	30	0.936759	0.978320	0.528205	0.618425
8	Random Forest	4	25	3	60	40	0.946746	0.981763	0.558608	0.652132
9	Random Forest	5	25	3	50	50	0.938389	0.978862	0.560606	0.647204
10	KNN	1	25	3	90	10	0.929412	0.816667	0.602564	0.654008
11	KNN	2	25	3	80	20	0.923077	0.854036	0.598977	0.676543
12	KNN	3	25	3	70	30	0.948617	0.874824	0.708473	0.767914
13	KNN	4	25	3	60	40	0.940828	0.857564	0.577371	0.659551
14	KNN	5	25	3	50	50	0.938389	0.869912	0.603456	0.686206

Stage B – Imbalance-aware ensembles on 80/20 (SMOTE on train)
Below (Figure 1-3), per-class outcomes on the held-out test of the 80/20 split.

Random Forest Results:
Accuracy: 0.9467455621301775

	precision	recall	f1-score	support
Distress (Negative Stress) - Stress that causes anxiety and impairs well-being.	0.75	0.50	0.60	6
Eustress (Positive Stress) - Stress that motivates and enhances performance.	0.95	0.99	0.97	154
No Stress - Currently experiencing minimal to no stress.	1.00	0.44	0.62	9
accuracy			0.95	169
macro avg	0.90	0.65	0.73	169
weighted avg	0.95	0.95	0.94	169

Figure 1 – Random forest results

RF achieves strong, balanced performance with relatively stable recall for No Stress and competitive recall for Distress. Reducing variations of the ensemble (packaging + sub-sampling of features) limits the readjustment to over-analyzed minority models, which helps to keep the generalization on an unaffected set of tests. Typical errors are Eustress ↔ No Stress-confusions when respondents exhibit moderate symptoms without clear threshold crossings.

Gradient Boosting Results:
Accuracy: 0.9171597633136095

	precision	recall	f1-score	support
Distress (Negative Stress) - Stress that causes anxiety and impairs well-being.	0.57	0.67	0.62	6
Eustress (Positive Stress) - Stress that motivates and enhances performance.	0.94	0.97	0.96	154
No Stress - Currently experiencing minimal to no stress.	0.50	0.22	0.31	9
accuracy			0.92	169
macro avg	0.67	0.62	0.63	169
weighted avg	0.91	0.92	0.91	169

Figure 2 – Gradient boosting results

GB follows mainly because of the low recall on No Stress, pointing to a conservative boundary solution that favors the majority class. Although the amplification improves separability for some severe cases of Eustress/Distress, it seems more sensitive to residual noise in minority regions. This manifests as an under-definition of No Stress and a drop in the F1 macro, despite the good precision of Eustress.

XGBoost Accuracy: 0.9408284023668639

	precision	recall	f1-score	support
Distress (Negative Stress) - Stress that causes anxiety and impairs well-being.	0.62	0.83	0.71	6
Eustress (Positive Stress) - Stress that motivates and enhances performance.	0.96	0.98	0.97	154
No Stress - Currently experiencing minimal to no stress.	1.00	0.33	0.50	9
accuracy			0.94	169
macro avg	0.86	0.72	0.73	169
weighted avg	0.95	0.94	0.93	169

Figure 3 – XGBoost results

RF and XGB tie on macro-F1 (~0.73). XGB achieves the best recall on Distress (0.83), while RF is stronger on No Stress (F1 0.62). GB lags mainly due to poor No Stress recall (0.22). These behaviors mirror the broader evidence that ensembles handle tabular surveys well but still struggle on tiny minority classes, even with SMOTE [4-6].

The questionnaire's signal is heterogeneous and nonlinear. Tree-based methods efficiently carve the predictor space into partitions that align with such local interactions (e.g., sleep issues × headaches × workload). Randomization in RF reduces variance [2]. Boosting focuses on hard cases by iteratively correcting residuals [3]. Across typical tabular problems, this bias–variance profile often outperforms deep learning without heavy feature engineering [4-5]. Our findings-RF/XGB with macro-F1 ≈ 0.73-are squarely in line with that picture and with stress-classification literature emphasizing ensembles [6].

Because the test distribution is 154/6/9, raw accuracy ≈ 0.94-0.95 is over-optimistic. Macro-F1 [7] reflects the real difficulty on Distress and No Stress (≈ 0.63-0.73 overall). For triage use cases-e.g., flagging potential Distress for human review-PR curves and recall at chosen thresholds for the minority class are more informative than ROC [8]. In practice, it can be beneficial to tune a higher-recall operating point for Distress, accepting more false positives but reducing the risk of misses.

To investigate the presence of natural clusters in the student stress data set, we applied a density-based DBSCAN clustering algorithm to a standardized feature matrix of 843 student responses. The output of the algorithm shown in Figure 4 illustrates that, despite the change in the region radius (eps = 0.3-0.5) and min_samples = 5, all configurations created a single dense area in which all points were classified as noise (843 noise points, 0 cluster, silhouette = None).

This finding indicates that the stress survey data do not form special regions with high density – in accordance with their continuous and overlapping nature at all levels of stress. As shown in Figure 4, students' responses form a smooth continuum rather than discrete behavioral clusters, confirming that the intensity of stress varies gradually between people. DBSCAN's sensitivity to global density explains the lack of separate cluster concentrations for Eustress, Distress and No Stress.

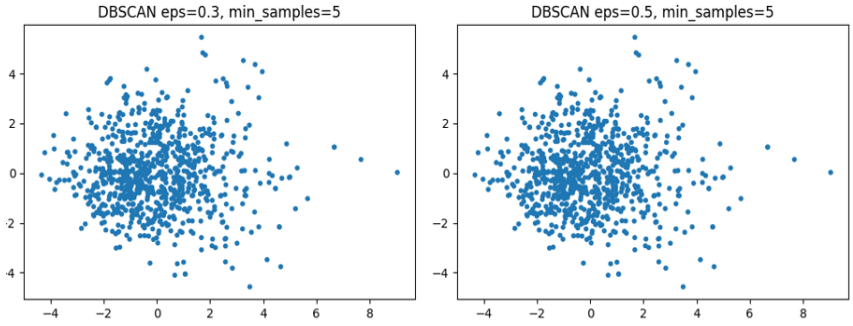


Figure 4 – DBSCAN results at (a) eps = 0.3, (b) eps = 0.5 showing all samples classified as a single dense region without cluster boundaries

To extend the comparison of baseline data beyond tree ensembles, we evaluated support vector machines (SVM) with a Radial Basis Function (RBF) core and XGBoost using the same 80/20 stratified and standardized elements as in stage B.

Both models were trained on coded target labels (Distress, Eustress, No Stress).

The comparative results are summarized in Table 2.

Table 2 – Comparative analysis of models' accuracy

Model	Accuracy	Macro F1	Notes
Random Forest (baseline)	0.947	0.73	Strong ensemble stability
SVM (RBF)	0.970	0.86	Excellent overall; slight under-recall on minorities
XGBoost	0.959	0.80	Strong performance; better Distress recall, weaker No Stress recall

Per-class metrics:

– SVM: Distress F1 = 0.80, Eustress F1 = 0.98, No Stress F1 = 0.80.

– XGBoost: Distress F1 = 0.91, Eustress F1 = 0.98, No Stress F1 = 0.50.

SVM achieved the highest overall accuracy (97%) but missed several Distress and No Stress cases due to class imbalance.

The XGBoost efficiency (95.8%) remained consistent with the Random Forest base, with a slightly higher response for Distress (0.83), but weaker for No Stress (0.33).

These results confirm that the marginal and incentive approaches provide comparable effectiveness in all tabular survey data, supporting their use in multiclass stress classification.

The comparative visualization in Figure 5 highlights the proximity of the three models' performance, reinforcing the statistical results summarized above.

```
Label mapping: {'Distress': np.int64(0), 'Eustress': np.int64(1), 'No Stress': np.int64(2)}
SVM Accuracy: 0.9704142011834319
              precision    recall  f1-score   support

    Distress       1.00      0.67      0.80         6
    Eustress       0.97      1.00      0.98       154
   No Stress       1.00      0.67      0.80         9

    accuracy                           0.97       169
   macro avg       0.99      0.78      0.86       169
weighted avg       0.97      0.97      0.97       169

Confusion matrix (SVM):
 [[  4   2   0]
 [  0 154   0]
 [  0   3   6]]
XGBoost Accuracy: 0.9585798816568047
              precision    recall  f1-score   support

    Distress       1.00      0.83      0.91         6
    Eustress       0.96      1.00      0.98       154
   No Stress       1.00      0.33      0.50         9

    accuracy                           0.96       169
   macro avg       0.99      0.72      0.80       169
weighted avg       0.96      0.96      0.95       169

Confusion matrix (XGBoost):
 [[  5   1   0]
 [  0 154   0]
 [  0   6   3]]
```

Figure 5 – Accuracy comparison between Random Forest, XGBoost, and SVM

To visually study the high-dimensional stress response structure, we projected a standardized object space into two dimensions using PCA and t-SNE.

The PCA projection (Figure 6) showed overlapping, but somewhat expanded clusters.

Electrical models dominate in the central region, while distress and absence of stress appear at the periphery, indicating that linear variations divide levels of stress partially but not cleanly.

The introduction of t-SNE (Figure 7) led to the formation of clearer local groupings.

Although the global structure remained mixed due to small minority classes, t-SNE retained subtle divisions between Distress (lower area) and No Stress (upper clusters), emphasizing its ability to capture non-linear local similarities.

• PCA effectively preserves global differences, but unites minority classes.

• t-SNE, although stochastic and slow, reflects nuanced psychological differences in screening patterns.

These additions support controlled results by showing that Eustress dominates a large homogeneous cluster, while Distress and No Stress occupy rarer, better pockets.

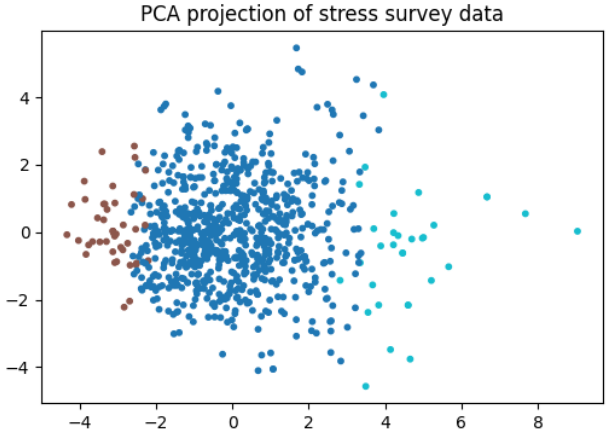


Figure 6 – PCA projection of student stress survey data

The PCA forecast shows that most deviations can be generalized in a small number of linear directions, which explains the wide overlapping structure in Figure 6. In this space, the Eustress responses occupy a central mass, while the Distress and No Stress appear on the periphery - assuming that the linear combinations of questionnaire points (e.g., sleep quality, headache frequency, workload) share the groups only partially. This is consistent with the expectation that stress responses form a continuum, not sharply separated groups.

In contrast, t-SNE in Figure 7 focuses on the conservation of local areas. As a result, slightly narrower micro-groupings appear at the edges of the Eustress collector. These focal points correspond to respondents sharing similar patterns of high stress, and help to identify a fine-grained local structure that smooths out the PGSs.

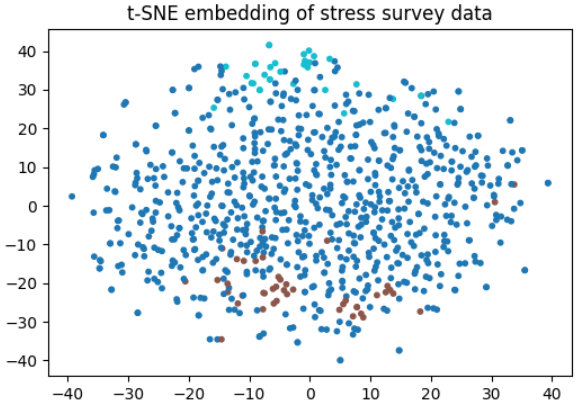


Figure 7 – t-SNE embedding of student stress survey data (perplexity = 30)

Although global geometry is less reliable in t-SNE, the method identifies locally agreed subgroups that may be useful for qualitative review (e.g., students with associated sleep problems and workload overload). In practice, the two views are complementary: PCA is an accurate global summary; t-SNE emphasizes subtle local similarities that can guide targeted interventions.

Conclusion

We combined a five-fold baseline study (DT/RF/KNN) with an assessment of imbalance-aware ensembles (RF/GB/XGB + SMOTE). In the five splits, RF and KNN consistently outperform DT; and in the 80/20 split with SMOTE, RF and XGBoost tie at macro-F1 ≈ 0.73 (accuracy 0.94-0.95), while GB lags due to weak No Stress recall.

These results are consistent with the broader observation that tree-based ensembles continue to be the strongest standard for typical tabular data [4-5], as well as literature highlighting stress classification [6].

Additional comparative and exploration methods were implemented to extend the analysis: the Support Vector Machine achieved 97% accuracy with improved macro-F1 (0.86), while XGBoost maintained strong balanced performance (precision 0.96, macro 0.80). Unsupervised clustering

(DBSCAN) did not reveal clear clusters based on density, confirming that stress response varies over a continuous spectrum. Finally, the dimensionality-reduction techniques (PCA and t-SNE) provided visual evidence that Eustress dominates in latent space, while Distress and No Stress form rarer peripheral regions.

Taken together, these results confirm the conclusion that ensemble and margin models are very effective for structured stress survey data, while visualization and clustering analyses increase model interpretability and reliability.

References

1. Brown T.A. Further validation of the Personality Disorder Severity for *ICD-11* (PDS-*ICD-11*) scale in a community mental health sample / T.A. Brown, M. Sellbom // Psychological Assessment. – 2023. – Vol. 35(8). – P. 706-714. https://doi.org/10.1037/pas0001253.
2. Breiman L. Random forests / L. Breiman // Machine Learning. – 2001. – Vol. 45. – P. 5-32. https://doi.org/10.1023/A:1010933404324.
3. Chen T. XGBoost: A scalable tree boosting system / T. Chen, C. Guestrin // KDD '16: Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. – 2016. – P. 785-794. https://doi.org/10.1145/2939672.2939785.
4. Grinsztajn L. Why do tree-based models still outperform deep learning on typical tabular data? / L. Grinsztajn, E. Oyallon, G. Varoquaux // 36th Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2022) Track on Datasets and Benchmarks. – 2022. – Vol. 35. – P. 507-520. URL: https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2022/file/0378c7692da36807bdec87ab043cdadc-Paper-Datasets_and_Benchmarks.pdf (date of access: 3.01.2026).
5. Shwartz-Ziv R. Tabular data: Deep learning is not all you need / R. Shwartz-Ziv, A. Armon // Information Fusion. – 2022. – Vol. 81. – P. 84-90. https://doi.org/10.1016/j.inffus.2021.11.011.
6. Enhancing diagnostic decision making: Ensemble learning techniques for reliable stress level classification / R.V. Anand et al // Diagnostics. – 2023. – Vol. 13(22). – P. 3455. https://doi.org/10.3390/diagnostics13223455.
7. Grandini M. Metrics for multi-class classification: An overview / M. Grandini, E. Bagli, G. Visani // arXiv:2008.05756. – 2020. – URL: https://arxiv.org/abs/2008.05756 (date of access: 3.01.2026).
8. Saito T. The precision–recall plot is more informative than the ROC plot when evaluating binary classifiers on imbalanced datasets / T. Saito, M. Rehmsmeier // PLOS ONE. – 2015. – Vol. 10(3). – P. e0118432. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0118432.
9. Raschka S. Model evaluation, model selection, and algorithm selection in machine learning / S. Raschka // arXiv:1811.12808. – 2018. – URL: https://arxiv.org/abs/1811.12808 (date of access: 3.01.2026).
10. Lemaître G. Imbalanced-learn: A Python toolbox to tackle the curse of imbalanced datasets in machine learning / G. Lemaître, F. Nogueira, C.K. Aridas // Journal of Machine Learning Research. – 2017. – Vol. 18. – P. 1-5. https://www.jmlr.org/papers/volume18/16-365/16-365.pdf (date of access: 3.01.2026).
11. Kaggle. Student Stress Monitoring Datasets. – 2025. https://www.kaggle.com/datasets/mdsultanulislamovi/student-stress-monitoring-datasets (date of access: 15.09.2025).

О. Умаров[1], Ж. Оралбекова[1]*, Ш. Туткышбаева[1], Д. Оралбекова[2], Г. Тюлепбердинова[3]

[1]Astana IT University, 010000, Республика Казахстан, Астана, проспект Мәңгілік Ел, 55/11, блок С1

[2]Институт информационных и вычислительных технологий,
050010, Республика Казахстан, Алматы, ул. Шевченко, 28

[3]Казахский национальный университет им. Аль-Фараби,
050040, Республика Казахстан, Алматы, проспект Аль-Фараби, 71

*e-mail: zh.oralbekova@astanait.edu.kz

КЛАССИФИКАЦИЯ СТРЕССА СТУДЕНТОВ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Инструменты опроса остаются наиболее практичным подходом для крупномасштабного мониторинга стресса студентов в образовательных учреждениях. А шкала воспринимаемого стресса продолжает подтверждать свою эффективность в различных контекстах. В данном исследовании оценивалась эффективность современных стандартных методов машинного

обучения на табличном многоклассовом опросе студентов с выраженным дисбалансом классов. Проведена двухэтапная оценка. Во-первых, сравнены деревья решений, случайный лес и метод k-ближайших соседей (KNN) в пяти режимах обучения-тестирования (90/10, 80/20, 70/30, 60/40, 50/50), чтобы проверить стабильность при различных размерах выборки. Во-вторых, добавлен эксперимент с учетом дисбаланса на разбиении 80/20 с использованием передискретизации в стиле SMOTE и сравнены случайный лес, градиентный бустинг и XGBoost. Представлены макроусредненные метрики, подходящие для многоклассовых целевых значений с асимметричным распределением. В пяти вариантах сравнения алгоритмы случайный лес и KNN неизменно показывали лучшие результаты, чем алгоритм деревья решений. Эти результаты согласуются с недавними данными о том, что ансамбли на основе деревьев решений доминируют на типичных табличных данных, а также с сообщениями о том, что ансамбли надежны для классификации, связанной со стрессом. При разделении 80/20 RF и XGBoost показывают одинаковый результат по макро-F1 ≈ 0,73, в то время как дополнительный SVM (RBF) достигает наилучшего значения макро-F1 0,86. Кластеризация и проекции подтверждают, что реакции на стресс образуют континуум, а не дискретные группы.

Ключевые слова: *стресс у студентов, классификация опросов, табличные данные, случайный лес, градиентный бустинг, XGBoost, дисбаланс классов, макро F1.*

О. Умаров[1], Ж. Оралбекова[1]*, Ш. Туткышбаева [1], Д. Оралбекова[2], Г. Тюлепбердинова[3]
[1]Astana IT University, 010000, Қазақстан Республикасы, Астана, Мәңгілік Ел даңғылы, 55/11, С1 блогы
[2]Ақпараттық және есептеуіш технологиялар институты,
050010, Қазақстан Республикасы, Алматы, Шевченко көшесі, 28
[3]Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,
050040, Қазақстан Республикасы, Алматы, Әл-Фараби даңғылы, 71
*e-mail: zh.oralbekova@astanait.edu.kz

МАШИНАЛЫҚ ОҚЫТУ АЛГОРИТМДЕРІНЕ НЕГІЗДЕЛГЕН СТУДЕНТТЕРДІҢ СТРЕСІНІҢ ЖІКТЕУІ

Сауалнама құралдары білім беру мекемелеріндегі студенттердің стресін кең көлемді мониторингтеу үшін ең тәжірибелік тәсіл болып табылады. Ал қабылданған стрес шкаласы әртүрлі жағдайларда өзінің тиімділігін дәлелдеуді жалғастыруда. Бұл зерттеу класстағы теңгерімсіздігі айқын, кестелік, көп сыныптық студенттердің сауалнамасындағы заманауи стандартты машиналық оқыту әдістерінің тиімділігін бағалайды. Екі кезеңді бағалау жүргізілді. Біріншіден, әртүрлі үлгі өлшемдеріндегі орнықтылықты тексеру үшін бес оқыту-сынақ режимінде (90/10, 80/20, 70/30, 60/40, 50/50) шешім ағаштары, кездейсоқ орман және k-жақын көршілер (KNN) салыстырылды. Екіншіден, SMOTE стиліндегі қайта іріктеуді қолдана отырып, 80/20 бөлінуіне теңгерімсіздікке бейімделген эксперимент жасалып, кездейсоқ орман, градиентті бустинг пен XGBoost салыстырылды. Қиғаш үлестірімдері бар көп класты нысандарға жарамды макро-орташаланған метрикалар ұсынылды. Бес салыстыру бойынша кездейсоқ орман және KNN алгоритмдері шешім ағашы алгоритмінен асып түсті. Бұл нәтижелер шешім ағашына негізделген ансамбльдердің типтік кестелік деректерде басым екендігі туралы соңғы зерттеулермен, сондай-ақ ансамбльдердің стреске байланысты жіктеу үшін сенімді екендігі туралы есептермен сәйкес келеді. 80/20 бөлінуінде RF және XGBoost макро-F1 ≈ 0,73 кезінде теңеседі, ал қосымша SVM (RBF) 0,86 макро-F1 ең жақсы мәніне жетеді. Кластерлеу және проекциялау нәтижелері студенттердің стресс реакцияларының дискретті топтардан гөрі үздіксіз континуум түрінде қалыптасатынын растады..

Түйін сөздер: *студенттер стресі, сауалнама жіктемесі, кестелік деректер, кездейсоқ орман, градиентті бустинг, XGBoost, класс теңгерімсіздігі, макро F1.*

Сведения об авторах

Олжас Аслзадаевич Умаров – студент 3 курса, Astana IT University, Казахстан; e-mail: 230017@astanait.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-8683-2216.

Жанар Орымбаевна Оралбекова* – PhD, ассоциированный профессор, и.о. профессора Школы ИИ и науки о данных, Astana IT University, Казахстан; e-mail: zh.oralbekova@astanait.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3726-8882.

Шырын Сарыбайевна Туткышбаева – PhD, ассистент профессора Школы программной инженерии, Astana IT University, Казахстан; e-mail: sh.tutkyshbayeva@astanait.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1419-2571.

Дина Орымбаевна Оралбекова – PhD, ассоциированный профессор, старший научный сотрудник Института информационных и вычислительных технологий, Казахстан; e-mail: dinaoral@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4975-6493.

Гульнур Алпыскызы Тюлепбердинова – кандидат физико-математических наук, ассоциированный профессор кафедры искусственного интеллекта и Big Data, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Казахстан; e-mail: tiulepberdynova.g@kaznu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4322-8983.

Авторлар туралы мәліметтер

Олжас Аслзадаевич Умаров – 3-курс студенті, Astana IT University, Қазақстан; e-mail: 230017@astanait.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-8683-2216.

Жанар Орымбаевна Оралбекова* – PhD, қауымдастырылған профессор, Жасанды интеллект және деректер ғылымы мектебінің профессоры м.а., Astana IT University, Қазақстан; e-mail: zh.oralbekova@astanait.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3726-8882.

Шырын Сарыбайевна Туткышбаева – PhD, Бағдарламалық инженерия мектебінің ассистент профессоры, Astana IT University, Қазақстан; e-mail: sh.tutkyshbayeva@astanait.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1419-2571.

Дина Орымбаевна Оралбекова – PhD, қауымдастырылған профессор, Ақпараттық және есептеуіш технологиялар институтының аға ғылыми қызметкері, Қазақстан; e-mail: dinaoral@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4975-6493.

Гульнур Алпыскызы Тюлепбердинова – физика-математика ғылымдарының кандидаты, Жасанды интеллект және Big Data кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан; e-mail: tiulepberdynova.g@kaznu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4322-8983.

Information about the authors

Olzhas Umarov – third-year student, Astana IT University, Kazakhstan; e-mail: 230017@astanait.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-8683-2216.

Zhanar Oralbekova* – PhD, associate professor, acting Professor of the School of AI and Data Science, Astana IT University, Kazakhstan; e-mail: zh.oralbekova@astanait.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3726-8882.

Shyryn Tutkyshbayeva – PhD, assistant professor of the School of Software Engineering, Astana IT University, Kazakhstan; e-mail: sh.tutkyshbayeva@astanait.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1419-2571.

Dina Oralbekova – PhD, associate professor, Senior Researcher of Institute of information and computational technologies, Kazakhstan; e-mail: dinaoral@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4975-6493.

Gulnur Tyulepberdinova – candidate of physical and mathematical sciences, associate professor of the Department of Artificial Intelligence and Big Data, Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan; e-mail: tiulepberdynova.g@kaznu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4322-8983.

Received 01.05.2026
Revised 23.06.2026
Accepted 24.06.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-7

IRSTI: 81.96.00

CC BY 4.0
Check for updates

Ye. Seitkulov[*], R. Ospanov[1], B. Yergaliyeva[1], K. Utebayev[2]
[1]L.N.Gumilyov Eurasian National University, 010008, Republic of Kazakhstan, Astana
[2]Almaty branch of the National Research Nuclear University MEPhI,
050040, Republic of Kazakhstan, Almaty
[*]e-mail: yerzhan.seitkulov@gmail.com

IMPLEMENTATION AND COMPARATIVE ANALYSIS OF SPHINCS+-BASED DIGITAL SIGNATURE SCHEMES

Annotation: *In post-quantum cryptography, the focus is on the design of algorithms capable of withstanding threats posed by quantum computers, which requires the adoption of new approaches to constructing their internal architecture. Significant attention in this field is devoted to digital signatures, as they provide authentication and integrity protection for data in digital environments. One of the most promising*

©Ye. Seitkulov, R. Ospanov, B. Yergaliyeva, K. Utebayev, 2026

directions is considered to be hash-based digital signature schemes. They are characterized by high efficiency and proven cryptographic security, which makes them one of the key post-quantum solutions for electronic signatures. This paper presents a comparison of the main components, as well as the sizes of private keys, public keys, and signatures (in bytes), for several SPHINCS and SPHINCS+-based schemes, including the TANBA-SPHINCS+ scheme, a new variant of SPHINCS+. This scheme employs a cryptographic hash function based on a modified Sponge construction with multiple internal functions. The proposed approach extends the classical SPHINCS+ architecture and allows flexible configuration of internal transformations. Such a design increases the structural diversity of the algorithm and may contribute to improved resistance against certain types of cryptanalytic attacks. For experimental evaluation, a software implementation was developed. The paper also presents comparative experimental performance results.

Key words: *cryptographic algorithm, digital signature, cryptographic hash function, post-quantum cryptography, information security.*

Introduction

Recently, we have witnessed the active development of quantum technologies. Modern research and development in quantum computing and quantum computers are leading to new challenges in information security. Post-quantum cryptography has become a strategic area of information security. The question of whether to transition to post-quantum cryptography is no longer relevant. The pressing question is how and when to do so. For the past two decades, the international community has been actively transitioning to post-quantum cryptography. Research in post-quantum cryptography is aimed not only at studying existing approaches to quantum-resistant cryptographic design, but also at developing new methods capable of ensuring strong security with reasonable computational overhead. At present, several major classes of post-quantum digital signature schemes can be identified, each relying on different mathematical assumptions and construction principles.

The first class includes hash-based digital signature schemes. The security of these schemes relies on the properties of cryptographic hash functions, particularly their resistance to preimage attacks, which are currently believed to remain secure even in the presence of quantum computers. When implemented correctly, the overall security of such schemes is determined primarily by the strength of the underlying hash function. Representative examples of this class include XMSS, LMS and SPHINCS+.

The second class comprises lattice-based signature schemes. Their security is connected with the hardness of lattice problems such as SVP, CVP, SIS, and LWE. These problems are widely considered computationally infeasible for both classical and quantum computing systems. Well-known examples of lattice-based signatures are CRYSTALS-Dilithium, FALCON, and Raccoon signature schemes.

The third category consists of code-based digital signature schemes. Their security relies on the difficulty of encoding and decoding error-correcting codes, including Goppa codes, linear codes, polar codes, and cyclic codes. Representative algorithms in this area include CROSS, Enhanced pqsigRM and LESS.

Another important class involves multivariate polynomial-based signature schemes. The security of these algorithms is based on the computational complexity of solving systems of multivariate polynomial equations over finite fields, which are generally considered NP-complete problems. Examples of such schemes are Rainbow, GeMSS, and DME-Sign.

A separate area of research is formed by isogeny-based digital signature schemes. These approaches employ isogenies between elliptic curves, while their security depends on the difficulty of constructing an isogeny between two given curves, a problem for which no efficient quantum algorithm is currently known. Examples of this category include SIKE, CSI-FiSh and SQIsign.

In addition to the approaches described above, there are also other post-quantum signature algorithms that do not directly belong to these categories, such as KAZ-SIGN, ALTEQ.

An additional advantage of hash-based schemes lies in their flexibility and adaptability. Such constructions can operate with various secure cryptographic hash functions, and if vulnerabilities are discovered in the currently used hashing algorithm, it can be replaced without fundamentally altering the overall structure of the signature scheme. Owing to these properties, hash-based digital signatures are regarded as one of the most practical and reliable directions in the development of post-quantum cryptography.

SPHINCS+ is a framework for constructing a family of digital signature algorithms [1], [2]. Initially, SPHINCS+ considered implementations using the SHA2, SHAKE, and Haraka algorithms, while the version of the framework outlined in the FIPS 205 standard, i.e., SLH-DSA, retained the SHA2 and SHAKE implementations. There are several implementation examples of the SPHINCS+ scheme using various cryptographic hash functions. For example, the paper [3] proposes a variant of the SPHINCS+ scheme that uses the Stribog hash function, described in the Russian standard GOST R 34.11-2018 [4]. K-SPHINCS+ [5], [6] is another variant of SPHINCS+ that uses the Korean cryptographic algorithms LSH, CHAM, and LEA.

Previously, a new modification of the Sponge scheme, a modern scheme for constructing cryptographic hash functions, was developed in [7]. The Sponge construction used for hash computation consists of several consecutive stages. First, the input message undergoes a padding procedure in which additional bits are appended so that the resulting message length becomes divisible by the predefined block size. Afterward, the internal state of the algorithm, represented by a fixed-length bit sequence, is initialized with a predefined value. The message is then processed during the absorbing phase. At this stage, message blocks of fixed size are sequentially combined with part of the internal state using a bitwise operation, followed by the application of an internal permutation function. This procedure is repeated until all message blocks have been processed. Once the absorption phase is completed, the algorithm proceeds to the squeezing phase, where fragments of the final hash value are extracted from the internal state. If the required output length exceeds the available number of bits, the permutation function is applied repeatedly to generate additional output fragments. The central component of the scheme is the internal function, which is either a permutation or a transformation of some fixed length.

Based on the modified Sponge construction, a new cryptographic hash function called TANBA was developed. In this approach, the internal function applied at each stage is determined by a dedicated selection mechanism that chooses a function from a predefined set of internal functions. The proposed implementation incorporates three different internal functions. The first function follows a generalized design approach derived from AES principles. The second is built using the word ring feedback with carry shift registers. The third function is conceptually close to the Keccak permutation; however, several structural modifications distinguish it from the original Keccak design. One of the advantages of the proposed construction is its scalability. By modifying the selection mechanism, the scheme can be adapted to operate with a different number of internal functions, including configurations with two or four functions. The construction can also be implemented using only a single internal function when required.

In [8] a new variant of SPHINCS+, replacing the hash functions from SPHINCS+ with the TANBA hash function, was proposed. The proposed TANBA-SPHINCS+ scheme uses the architectural principles of SPHINCS+, but differs in the use of an alternative hash function TANBA. Therefore, the design under consideration represents a research variant of the SPHINCS+ scheme, intended for analyzing possible modifications to the underlying cryptographic primitives.

The contribution of this paper includes the implementation of the TANBA-SPHINCS+ scheme in Python and its experimental evaluation against selected SPHINCS+ variants. Additionally, the study analyzes the impact of replacing the hash function while preserving the overall structure of the scheme. The aim of this work is to study the implementation of the previously proposed TANBA-SPHINCS+ scheme and to evaluate the effect of replacing the underlying hash function within the SPHINCS+ framework. The focus is placed on implementation aspects and experimental analysis rather than on developing a new cryptographic construction. This paper provides a comparison of main components (one-time signatures, few-time signatures, cryptographic hash functions), sizes of private keys, public keys, and signatures (in bytes) for some variants of SPHINCS and SPHINCS+-based schemes, including the TANBA-SPHINCS+ scheme. To conduct the computational experiments, a software implementation was written in Python 3.8.10. The paper presents comparative experimental results in terms of performance.

Materials and methods

The bases for the development of hash-based digital signatures are the so-called one-time signatures. They appeared back in the late 1970s. The simplest one-time signature scheme can be described as follows. For each bit of the message, pairs of random secret values are used. Their hashes are published. When signing a message, some of the secret values are revealed. Signature verification is performed through re-hashing. More formally, this can be described as follows.

Let M be an n-bit message to be signed: $M = a_1 a_2 \dots a_n$, $a_i \in \{0,1\}$. Also suppose that there is some cryptographic hash function H that computes hash values of length n.

First, a key pair is calculated: a private key K_{priv} and a public key K_{pub}. The private key is obtained using a cryptographically secure pseudorandom number generator. For this, n pairs of pseudorandom n-bit numbers are generated. Let us denote these pairs as (x_i, y_i), $i = 1, \dots, n$. These pairs of numbers represent the private key K_{priv}. Then, using the hash function H, the hash values for all these numbers are calculated. Let us denote these pairs as $(H(x_i), H(y_i))$, $i = 1, \dots, n$. These pairs of numbers represent the public key K_{pub}.

Next, a signature $Sig(M) = s_1 s_2 \dots s_n$ is generated using the private key K_{priv}: $s_i = \begin{cases} x_i, \ if \ a_i = 0 \\ y_i, \ if \ a_i = 1 \end{cases}$. Thus, these n n-bit numbers represent the digital signature of message M. Further verification of the signature is also performed using a hash function H. To do this, the hash values of the n numbers that make up the signature $Sig(M) = s_1 s_2 \dots s_n$ are first calculated: $H(s_1), H(s_2), \dots, H(s_n)$. The resulting hash values are then compared with the corresponding numbers that make up the public key: for each bit a_i of message $M = a_1 a_2 \dots a_n$, if $a_i = 0$, the equality $H(s_i) = H(x_i)$ is checked; if $a_i = 1$, the equality $H(s_i) = H(y_i)$ is checked. If all equalities are true, then the signature verification is considered successful.

This is the first known digital signature scheme (Lamport's scheme) that demonstrated the possibility of constructing secure signatures not based on factorization or discrete logarithm, but solely on the properties of cryptographic hash functions. Furthermore, this scheme can be considered the foundation of post-quantum cryptography. It is resistant to attacks on quantum computers. Its security comes down to the security of the cryptographic hash function used in the scheme. The name "one-time signature (OTS)" follows from the fact that such a signature is secure only when forming a signature for one message. This is one of the disadvantages of this scheme. Another drawback is the large size of the keys and signatures. For example, for a 256-bit message, the private key consists of 512 random numbers, the public key also consists of 512 256-bit hash values, and the signature consists of 256 256-bit values. Clearly, as the message size increases, this becomes impractical. Using such a signature, one cannot simply sign multiple messages. Later, more sophisticated and efficient one-time signatures were developed (for example, W-OTS and W-WOTS+: the main improvement made in these schemes over Lamport's scheme is that the bits are signed in groups, i.e. one signature element is created for a group of bits.). And also, it was from one-time signatures that few-time signatures (FTS), Merkle schemes, and then modern hash-based signatures emerged and developed.

Modern hash-based digital signature schemes can be divided into stateful and stateless schemes. Stateful signature schemes store information about used keys. This means there is a set of one-time keys. Each key can only be used once. Each time a signature is performed, a counter is incremented, and the key used is marked. Stateless signature schemes do not store any state at all. Each signature can be used independently, and no memory of previous signatures is required. In other words, in stateful schemes, the use of each key is controlled. In stateless schemes, the system is designed in such a way that even reuse does not compromise security.

Examples of a stateful scheme are XMSS and LMS, standardized by NIST and IETF. The first stateless hash-based signature scheme was proposed in [9]. However, to ensure sufficient security and a reasonable number of signatures, parameters resulting in a fairly large signature size were required, making this scheme impractical. The first practical stateless hash-based signature scheme, capable of achieving reasonable signature sizes while computing hundreds of signatures per second on modern processors, was the SPHINCS scheme [10]. This scheme combined the one-time signature (OTS) binary authentication tree from [9, x6.4.2] and the HORS few-time signature scheme with two key optimizations. First, the internal tree nodes are not one-time signatures, but Merkle trees whose leaves are W-OTS signatures. This allows each node to sign up to 2^x child nodes, where x is the height of the corresponding tree. This leads to the use of a hypertree and a reduction in signature size due to the inclusion of fewer OTSs, but increases the signature time, since all Merkle trees on the path to a leaf must be generated anew for each signature. Second, the hypertree leaves are not one-time signatures, but few-time HORST signatures – a variant of the HORS scheme with a binary tree for public key compression, which allows a single leaf to sign

multiple messages, improves resilience to path collisions, and thereby reduces the required hypertree height. A specific instantiation of the scheme, called SPHINCS-256, was also proposed. The name of the instantiation is determined by the security parameter n = 256 (bitlength of hashes in HORST and W-OTS). Hash functions used in SPHINCS-256 are BLAKE256, BLAKE512 and function based on ChaCha12.

The SPHINCS framework subsequently became the basis for subsequent work conducted within the NIST Post Quantum Cryptography standardization process.

A new variant of the SPHINCS signature scheme, called SPHINCS-Simpira, was presented in [11]. The scheme is based on the Simpira family of cryptographic permutations, presented in [12].

Several instantiations of the SPHINCS scheme with various cryptographic hash functions on modern high-performance processors was examined in [13]. Algorithms used included SHA256, Keccak, Simpira, Haraka, and ChaCha.

In [14], a new variant of SPHINCS, called Gravity-SPHINCS, was proposed with shorter keys, shorter signatures, and faster signing and verification procedures while maintaining the same level of security as SPHINCS. These improvements are based on a number of optimizations proposed in the same paper. The paper presents a new, more secure variant of the HORS few-time signature scheme, called PORS. It also introduces secret key caching to speed up signing and reduce signature size; batch signatures to amortize signature time and reduce signature size; mask-free constructions to reduce key size; and a method for eliminating redundancy in authentication paths in Merkle trees, called Octopus. Hash functions used in SPHINCS-256 are Haraka-v2-256, Haraka-v2-512, SHA-256 and function based on AES-256-CTR.

In [1] a new refinement and generalization of the SPHINCS, called SPHINCS+, was presented. One of several improvements proposed in SPHINCS+ is the use of a new FORS few-time signature scheme. Another distinctive feature is the use of publicly verifiable index selection as a method for selecting leaf nodes. These changes ultimately make it more difficult to attack SPHINCS+ using a few-time signature scheme, thereby allowing the selection of smaller parameters. Also so-called tweakable hash functions introduced in [1]. SPHINCS+ is a scheme for constructing a family of digital signature algorithms. Initially, SPHINCS+ considered implementation options using the SHA2, SHAKE, and Haraka algorithms, while the version of the scheme described in the FIPS 205 standard, i.e., SLH-DSA, retained the SHA2 and SHAKE options.

The SPHINCS+ digital signature scheme is a combination of the following algorithms: a key pair generation algorithm, a digital signature generation algorithm, and a digital signature verification algorithm [1], [2].

Let $M = m_1 m_2 \ldots m_k$, $m_i \in \{0,1\}$ is a k-bit message.

The key pair generation algorithm (generation of secret and public keys) is defined as follows.

Let G be a cryptographically strong pseudorandom number generator. Using generator G, we obtain n-bit sk_{seed}, pk_{seed} and sk_{prf}. Then the private key will consist of sk_{seed}, sk_{prf}, pk_{seed} and pk_{root} ($sk = sk_{seed} \parallel sk_{prf} \parallel pk_{seed} \parallel pk_{root}$), and the public key will consist of pk_{seed} and pk_{root} ($pk = pk_{seed} \parallel pk_{root}$). Here, pk_{root} is the hypertree's public key, i.e., the public key (root node) of the single XMSS tree on the top layer.

The digital signature generation algorithm is defined as follows. The input data is a message M and a secret key $sk = sk_{seed} \parallel sk_{prf} \parallel pk_{seed} \parallel pk_{root}$.

First, an n -bit randomization string $R = PRF_{msg}(sk_{prf}, opt, M)$ is generated, where $PRF_{msg}: \{0,1\}^n \times \{0,1\}^n \times \{0,1\}^* \to \{0,1\}^n$ is a pseudorandom function, and opt is some additional random n -bit value. Then, using R , $dg = H_{msg}(R, pk_{seed}, pk_{root}, M)$ is calculated, where $H_{msg}: \{0,1\}^n \times \{0,1\}^n \times \{0,1\}^n \times \{0,1\}^* \to \{0,1\}^m$ is the keyed hash function. Next, using the calculated value of dg, md_{temp} is determined as the first $\lfloor (k \log_2 t + 7)/8 \rfloor$ bytes of dg, ti_{temp} is the next $\lfloor (\mathrm{h} - \mathrm{h/d} + 7)/8 \rfloor$ bytes of dg , li_{temp} is the next $\lfloor (\mathrm{h/d} + 7)/8 \rfloor$ bytes of dg . Next, md is determined as the first $k \log_2 t$ bits of md_{temp}, ti is the first $\mathrm{h} - \mathrm{h/d}$ bits of ti_{temp}, li is the first $\mathrm{h/d}$ bits of li_{temp}. Using the obtained values, σ_{FORS} (the FORS signature) and σ_{HT} (the hypertree signature) are sequentially determined. The signature will then consist of the obtained σ_{FORS} and σ_{HT} ($\sigma = R \parallel \sigma_{FORS} \parallel \sigma_{HT}$).

The digital signature verification algorithm is defined as follows.

The input data are the message M, the signature $\sigma = R \| \sigma_{FORS} \| \sigma_{HT}$, and the public key $pk = pk_{seed} \| pk_{root}$.

First, $dg = H_{msg}(R, pk_{seed}, pk_{root}, M)$ is calculated, md_{temp} is determined as the first $\lfloor (k \log_2 t + 7)/8 \rfloor$ bytes of dg, ti_{temp} is the next $\lfloor (\mathrm{h} - \mathrm{h/d} + 7)/8 \rfloor$ bytes of dg, li_{temp} is the next $\lfloor (\mathrm{h/d} + 7)/8 \rfloor$ bytes of dg, then md is determined as the first $k \log_2 t$ bits of md_{temp}, ti is the first $\mathrm{h} - \mathrm{h/d}$ bits of ti_{temp}, li is the first $\mathrm{h/d}$ bits of li_{temp}. Next, the FORS public key candidate is calculated and the hypertree signature on this public key is verified.

The paper [3] considers the implementation of SPHINCS+ using the STREEBOG cryptographic hash function, described in the Russian standard GOST R 34.11-2018 [4]. The papers [5], [6] propose a hashing-based digital signature scheme, K-SPHINCS+, in which the hash functions from SPHINCS+ are replaced with the Korean cryptographic algorithms LSH, CHAM, and LEA.

In [15], an improvement to the SPHINCS+ scheme, called SPHINCS-α, was proposed. The proposed optimization is primarily based on optimizations to the one-time signature scheme. The optimized one-time signature scheme, CS-W-OTS+ (constant-sum W-OTS+), increases the message-to-signature-size ratio compared to the original W-OTS+ scheme, thereby reducing the one-time signature size. The W-OTS+ component in SPHINCS+ and XMSS is replaced by CS-W-OTS+. As a result, the parameters of the hash-based signature scheme can be retuned to reduce the signature size without increasing computation time.

Reference [16] introduces the stateless hash-based signature scheme SPHINCS+C, based on SPHINCS+. It relies on updated one-time and few-time signature primitives, W-OTS+C and FORS+C, respectively, both also introduced in [16]. W-OTS+C reduces the number of chains in the original W-OTS construction, which leads to smaller signatures and faster verification, while leaving signing and key generation costs essentially unchanged. FORS+C further decreases the signature size and provides a slight improvement in verification efficiency, again without affecting the main computational costs of signing and key generation.

A related scheme, Hypericum, proposed for standardization in Russia, is presented in [17], [18]. It is based on SPHINCS+ and SPHINCS+C and employs W-OTS+C and FORS+C as core components. In addition, it uses the STREEBOG hash function defined in the Russian standard GOST R 34.11-2018, with a 256-bit output.

In [19], a variant of SPHINCS+ called F-SPHINCS+ is introduced. It was designed as a basis for constructing a group signature scheme using only symmetric primitives. The scheme incorporates a modified version of FORS, referred to as M-FORS (Merkle FORS). Its overall structure is organized as a hypertree built from M-FORS trees.

In [20], a new few-time signature scheme, PORS+FP, is used within SPHINCS+. It is an optimization of the PORS few-time signature scheme using the forced pruning technique (PORS plus forced pruning). The resulting improvements led to shorter signatures and faster verification with minimal increase in signing time.

In [21], new stateless hashing-based digital signature schemes (CEDRUS+, CEDRUS-α, CEDRUS+C) were developed using the SPHINCS+ framework. The authors extended the hypertree structure underlying the SPHINCS+ framework, allowing trees of different heights to appear at different levels. By allowing for different hash chain lengths, they generalized one-time signatures based on hash chains and connected them to the hypertree. The resulting structural generalizations led to expanded design capabilities and a more nuanced analysis of tradeoffs between various signature scheme parameters. New schemes were identified that outperform several modern stateless hashing-based signature schemes (SPHINCS+, SPHINCS-α, and SPHINCS+C) in signature size, signature efficiency, and verification.

Results and discussion

The TANBA-SPHINCS+ algorithm proposed in [8] is an implementation of the SPHINCS+ scheme, replacing the hash functions from SPHINCS+ with the TANBA hash function. TANBA-SPHINCS+ uses the same parameters and structures as SPHINCS+. Specifically, the algorithm uses the following functions.

$PRF: \{0,1\}^n \times \{0,1\}^{256} \to \{0,1\}^n$ is a pseudorandom function for generating pseudorandom keys, defined as $PRF(seed, adrs) = TANBA(seed||adrs, 8n)$.

$PRF_{msg}: \{0,1\}^n \times \{0,1\}^n \times \{0,1\}^* \rightarrow \{0,1\}^n$ is a pseudorandom function for generating random numbers for message compression, defined as

$PRF_{msg}(sk_{prf}, opt, M) = TANBA(sk_{prf} ||opt||M, 8n)$.

$H_{msg}: \{0,1\}^n \times \{0,1\}^n \times \{0,1\}^n \times \{0,1\}^* \rightarrow \{0,1\}^m$ is an additional keyed hash function that can handle messages of arbitrary length, defined as

$H_{msg}(R, pk_{seed}, pk_{root}, M) = TANBA(R||pk_{seed}||pk_{root}||M, 8m)$.

$T_l: \{0,1\}^n \times \{0,1\}^{256} \times \{0,1\}^{ln} \rightarrow \{0,1\}^n$, $F = T_1: \{0,1\}^n \times \{0,1\}^{256} \times \{0,1\}^n \rightarrow \{0,1\}^n$, $H = T_2: \{0,1\}^n \times \{0,1\}^{256} \times \{0,1\}^{2n} \rightarrow \{0,1\}^n$ are tweakable hash functions, defined as

$F(pk_{seed}, adrs, M_1) = TANBA(pk_{seed}||adrs||M_1, 8n)$,

$H(pk_{seed}, adrs, M_1||M_2) = TANBA(pk_{seed}||adrs||M_1||M_2, 8n)$,

$T_l(pk_{seed}, adrs, M) = TANBA(pk_{seed}||adrs||M, 8n)$, respectively. Here, $adrs$ is the address of one of the seven types defined in [2].

The following Table 1 below summarizes the main components (one-time signatures, few-time signatures, cryptographic hash functions) of the above-mentioned algorithms and the TANBA-SPHINCS+. Table 2 provides a comparison of the sizes of the private keys, public keys, and signatures (in bytes) for some variants of SPHINCS and SPHINCS+-based schemes, including the TANBA-SPHINCS+.

Table 1 – Main components of SPHINCS and SPHINCS+-based schemes

Scheme	OTS	FTS	Hash functions
SPHINCS (2015) [10]	W-OTS+	HORST	BLAKE256, BLAKE512, based on ChaCha12
SPHINCS-Simpira (2017) [11]	W-OTS+	HORST	based on Simpira
Instantiation of SPHINCS (2017) [13]	W-OTS+	HORST	SHA256, Keccak, Haraka, based on Simpira, based on ChaCha
Gravity-SPHINCS (2018) [14]	W-OTS	PORST	Haraka-v2-256, Haraka-v2-512, SHA-256, based on AES-256-CTR
SPHINCS+ (2019) [1]	W-OTS+	FORS	SHA2, SHAKE, Haraka
STREEBOG-SPHINCS+ (2020) [3]	W-OTS+	FORS	STREEBOG
K-SPHINCS (2022) [5], [6]	W-OTS+	FORS	LSH256, based on CHAM256, based on LEA256
SPHINCS-α (2022) [15]	CS-W-OTS+	FORS	SHA2-256, SHA2-512, SHAKE-256
SPHINCS+C (2023) [16]	W-OTS+C	FORS+C	SHAKE
Hypericum (2023) [17],[18]	W-OTS+C	FORS+C	STREEBOG
F-SPHINCS (2024) [19]	W-OTS+	M-FORS	Based on LowMC
SPHINCS+PORS+FP (2025) [20]	W-OTS+	PORS-FP	SHA-3, SHAKE
CEDRUS+ (2025) [21]	Inhomogeneous W-OTS+	FORS	SHAKE-128, SHAKE-192, SHAKE-256
CEDRUS-α (2025) [21]	Inhomogeneous CS-W-OTS+	FORS	SHAKE-128, SHAKE-192, SHAKE-256
CEDRUS+C (2025) [21]	Inhomogeneous W-OTS+C	FORS+C	SHAKE-128, SHAKE-192, SHAKE-256
TANBA-SPHINCS+ [8]	W-OTS+	FORS	TANBA

Table 2 – Private key, public key and signature sizes (in bytes) of some instantiations for SPHINCS and SPHINCS+-based schemes

Scheme	Private key size	Public key size	Signature size
1	*2*	*3*	*4*
SPHINCS-256	1088	1056	41000
SPHINCS-Simpira	1088	1056	41000
Gravity-SPHINCS (NIST-fast)	64	32	35168
Gravity-SPHINCS (NIST)	64	32	26592
Gravity-SPHINCS (NIST-slow)	64	32	22304
Gravity-SPHINCS (fast)	64	32	28928
Gravity-SPHINCS (batched)	64	32	20032
Gravity-SPHINCS (small)	64	32	12640
SPHINCS+-128s	64	32	7 856

1	2	3	4
SPHINCS+-128f	64	32	17 088
SPHINCS+-192s	96	48	16 224
SPHINCS+-192f	96	48	35 664
SPHINCS+-256s	128	64	29 792
SPHINCS+-256f	128	64	49 856
K-SPHINCS	128	64	49 856
SPHINCS-α-128s	64	32	6880
SPHINCS-α-128f	64	32	16720
SPHINCS-α-192s	96	48	14568
SPHINCS-α-192f	96	48	34896
SPHINCS-α-256s	128	64	27232
SPHINCS-α-256f	128	64	49312
SPHINCS+C-128s	64	32	6304
SPHINCS+C-128f	64	32	14904
SPHINCS+C-192s	96	48	13776
SPHINCS+C-192f	96	48	33016
SPHINCS+C-256s	128	64	26096
SPHINCS+C-256f	128	64	46884
Hypericum-s	128	64	18292
Hypericum-f	128	64	58460
Hypericum-u	128	64	28068
SPHINCS+PORS+FP-128s1	64	32	7332
SPHINCS+PORS+FP-128f1	64	32	16420
SPHINCS+PORS+FP-192s1	96	48	15316
SPHINCS+PORS+FP-192f1	96	48	34540
SPHINCS+PORS+FP-256s1	128	64	28260
SPHINCS+PORS+FP-256f1	128	64	48132
SPHINCS+PORS+FP-128s2	64	32	6096
SPHINCS+PORS+FP-128f2	64	32	14504
SPHINCS+PORS+FP-192s2	96	48	13104
SPHINCS+PORS+FP-192f2	96	48	32104
SPHINCS+PORS+FP-256s2	128	64	25,168
SPHINCS+PORS+FP-256f2	128	64	45412
CEDRUS+-128s	64	32	7840
CEDRUS+-128f	64	32	16528
CEDRUS+-192s	96	48	16176
CEDRUS+-192f	96	48	35280
CEDRUS+-256s	128	64	29600
CEDRUS+-256f	128	64	49632
CEDRUS-α-128s	64	32	6960
CEDRUS-α-128f	64	32	16560
CEDRUS-α-192s	96	48	14760
CEDRUS-α-192f	96	48	35640
CEDRUS-α-256s	128	64	27104
CEDRUS-α-256f	128	64	49696
CEDRUS+C-128s	64	32	6252
CEDRUS+C-128f	64	32	14452
CEDRUS+C-192s	96	48	13384
CEDRUS+C-192f	96	48	31620
CEDRUS+C-256s	128	64	25228
CEDRUS+C-256f	128	64	46500
TANBA-SPHINCS+	128	64	49 856

Existing implementations of the SPHINCS+ scheme use a limited set of cryptographic hash functions, such as SHA2, SHA3, SHAKE, and apply the same function to various operations (generating pseudorandom functions, computing Merkle tree nodes, hashing messages). This limits the flexibility of the scheme, complicates the replacement of individual components, and limits the

experimental exploration of alternative hash function configurations. The modified scheme proposed in this paper, in which standard hash functions are replaced with a hash function based on the modified Sponge scheme with multiple internal functions, has the potential to provide a more flexible and modular architecture. Despite existing implementations, there is virtually no research in the literature on the use of Sponge-constructions with multiple internal functions for building a flexible and modular scheme.

The proposed TANBA-SPHINCS+ scheme uses the same security parameters as the SPHINCS+. Therefore, the public key, private key, and signature sizes remain identical to those of the original scheme. This is because the modification only affects the hash function used, while the hypertree parameters and WOTS+ structure remain unchanged.

To conduct the computational experiments, a software implementation was written in Python 3.8.10. The experiments were conducted on a computer with the following specifications: processor – Intel(R) Core(TM) i5-10210U CPU @ 1.60GHz 2.11 GHz, RAM – 4.00 GB, video adapter – NVIDIA GeForce MX330 (2 GB), Intel(R) UHD Graphics (128 MB), system type – 64-bit operating system, x64 processor, operating system – Windows 10 Pro (version 22H2).

Following Table 3 presents comparative experimental results in terms of performance.

Table 3 – Experimental results

Algorithm	Keygen	Sign	Verify
SPHINCS+-SHA2-256f	12.9 ms	257 ms	2860 ms
SPHINCS+-SHAKE-256f	13.4 ms	261 ms	2921 ms
TANBA-SPHINCS+	15.2 ms	283 ms	3012 ms

The experimental results show that TANBA-SPHINCS+ achieves performance comparable to the reference SPHINCS+ implementations while preserving identical key and signature sizes. The observed differences in execution time are mainly due to the computational cost of the underlying hash function. This work focuses on the implementation and experimental evaluation of a previously proposed scheme rather than on improving performance or designing a new cryptographic construction. In this context, the results confirm that modifying the hash function does not affect the overall structure of the SPHINCS+ scheme, but also does not lead to performance gains. The computational cost of TANBA-SPHINCS+ is dominated by hash function evaluations within the SPHINCS+ framework. Key generation depends on the hypertree structure, while signing involves multiple operations in the WOTS+ and FORS components. Verification follows a similar structure but generally requires fewer computations. Performance is measured in milliseconds, which depends on the hardware and software environment. Therefore, the reported values should be treated as approximate. More hardware-independent metrics, such as cycles per byte, were not used and remain a subject for future work. The reported execution times are based on a single measurement for each operation. Consequently, statistical measures such as standard deviation and confidence intervals were not evaluated. This limitation will be addressed in future work through repeated experiments and statistical analysis. The current implementation is limited to a single parameter set corresponding to SPHINCS+-256f. Although other configurations were not evaluated, the scheme can be extended to different parameter sets without changes to its overall structure.

Conclusion

This paper presents an implementation of the TANBA-SPHINCS+ digital signature scheme, which was previously introduced in our earlier work, together with its experimental evaluation against selected SPHINCS+ variants. The implementation was developed in Python 3.8.10 and tested in a standard desktop environment. The experimental study covered the main stages of the algorithm, including key generation, signing, and verification. The obtained results show that TANBA-SPHINCS+ preserves the same key and signature sizes as the SPHINCS+-256f configuration. In terms of execution time, the scheme demonstrates performance comparable to standard SPHINCS+ implementations, with no noticeable improvement in computational speed. These results indicate that the substitution of the underlying hash function does not affect the overall structure of the SPHINCS+ framework. At the same time, it also does not lead to a reduction in computational cost, since performance remains dominated by hash-based operations. The main contribution of this work lies in the practical implementation of the TANBA-SPHINCS+ scheme and the experimental verification of its compatibility with the original SPHINCS+ design. The study confirms that the proposed modification can be integrated without changing the structural properties of the scheme.

The work is limited to a single parameter set and a Python-based implementation. Hardware-specific optimizations and alternative parameter configurations were not considered, and the reported timing results should therefore be treated as indicative. Future research should focus on a formal security analysis of the TANBA-based construction, a more detailed study of computational complexity, and an evaluation under different parameter settings.

References

1. The SPHINCS+ Signature Framework. In Proceedings of the 2019 ACM SIGSAC Conference / D.J. Bernstein et al. – New York, NY, USA, P. 2129-2146. https://doi.org/10.1145/3319535.3363229.
2. Aumasson, et al. SPHINCS+ - Submission to the NIST post-quantum project, v.3.1. 10 June 2022. https://sphincs.org/data/sphincs+-r3.1-specification.pdf.
3. Sphincs+ post-quantum digital signature scheme with Streebog hash function / E. Kiktenko et al // AIP Conference Proceedings. – 2020. – vol. 2241. – P. 020014. https://doi.org/10.1063/5.0011441.
4. GOST 34.11-2018. Mezhgosudarstvennyi standart. Informatsionnaya tekhnologiya. Kriptograficheskaya zashchita informatsii. Funktsiya kheshirovaniya. (In Russian).
5. K-XMSS and K-SPHINCS+: Hash based signatures with korean cryptography algorithms / M. Sim et al // Cryptology ePrint Archive, 2022. https://eprint.iacr.org/2022/152.pdf.
6. K-XMSS and K-SPHINCS+: Enhancing Security in Next-Generation Mobile Communication and Internet Systems with Hash Based Signatures Using Korean Cryptography Algorithms / M. Sim et al // Sensors. – 2023. – № 23(17). – P. 7558. https://doi.org/10.3390/s23177558.
7. A cryptographic hash function based on a modified Sponge scheme / R.M. Ospanov et al // Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications. – 2022. – № 10(2). – P. 55-70. https://doi.org/10.32523/2306-6172-2022-10-2-55-70.
8. TANBA-SPHINCS+ - post-quantum cryptographic hash-based digital signature algorithm. / R.M. Ospanov et al // Bulletin Abai KazNPU. Series of Physics & Mathematical Sciences. – 2025. – № 1(89). – P. 235-246. https://doi.org/10.51889/2959-5894.2025.89.1.020. (In Russian).
9. Goldreich O. Foundations of Cryptography: Basic Applications, volume 2. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2004.
10. SPHINCS: Practical Stateless Hash-based Signatures / D.J. Bernstein et al // In: Osvald, E., Fischlin, M. (eds), Advances in Cryptology, Lecture Notes in Computer Science. – 2015. – vol 9056. – P. 368-397. https://doi.org/10.1007/978-3-662-46800-5_15.
11. Gueron S. Sphincs-Simpira: Fast Stateless Hash-Based Signatures with Post-Quantum Security / S. Gueron, N. Mouha // Cryptology ePrint Archive. – 2017. – P. 2017/645. https://eprint.iacr.org/2017/645.
12. A Family of Efficient Permutations Using the AES Round Function / S. Gueron et al // Advances in Cryptology ASIACRYPT. – 2016. – vol. 10031. – P. 95-125. https://doi.org/10.1007/978-3-662-53887-6_4 .
13. Kölbl S. Putting Wings on SPHINCS / S. Kölbl // Cryptology ePrint Archive. – 2017. – P. 2017/898. https://eprint.iacr.org/ 2017/898.
14. Aumasson J.-P. Improving stateless hash-based signatures / J.-P. Aumasson, G. Endignoux // In: Smart, N. (eds) Topics in Cryptology – CT-RSA. – 2018. – vol 10808. – P. 219-242. https://doi.org/10.1007/978-3-319-76953-0_12.
15. Zhang K. Sphincs-α: A compact stateless hash-based signature scheme / K. Zhang, H. Cui, Y. Yu // Cryptology ePrint Archive. – 2022. – P. 2022/059. https://eprint.iacr.org/2022/059.
16. SPHINCS+C: Compressing SPHINCS+ with (Almost) No Cost / A. Hulsing et al // In: Proceedings of the 2023 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP), San Francisco, CA, USA, 22-24 May 2023, P. 1435-1453. https://doi.org/10.1109/SP46215.2023.10179381.
17. Grebnev S. Hypericum – a quantum-resistant digital signature project for standardization in Russia, RusCrypto 2023. Available online: https://ruscrypto.ru/resource/archive/rc2023/files/02_grebnev.pdf. (In Russian).
18. Turchenko O. Hypericum: a post-quantum digital signature for standardization in Russia / O. Turchenko, S. Grebnev // J Comput Virol Hack Tech. – 2024. – № 20. – P. 455-483. https://doi.org/10.1007/s11416-024-00520-6.
19. Sphinx-in-the-Head: Group Signatures from Symmetric Primitives / L. Chen et al // ACM Trans. Priv. Sec. – 2024. – Vol. 27, Issue 1, Article 11. – P. 1-35. https://doi.org/10.1145/3638763.
20. Abri M. Shorter Hash-Based Signatures Using Forced Pruning / M. Abri, J. Katz // Cryptology ePrint Archive. – 2025. – P. 2025/2069. https://eprint.iacr.org/2025/2069.

21. Qin Z. Extending the SPHINCS+ Framework: Varying the Tree Heights and Chain Lengths / Z. Qin, S. Sun // Cryptology ePrint Archive. – 2025. – P. 2025/2236. https://eprint.iacr.org/2025/2236.

Acknowledgments

This research was funded by Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan, grant number AP23486901.

Е.Н. Сейткулов*, Р.М. Оспанов[1], Б.Б. Ерғалиева[1], К.А. Утебаев[2]
[1]Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, 010008, Қазақстан Республикасы, Астана,
[2]MEPhI Ұлттық зерттеу ядролық университетінің Алматы филиалы,
050040, Қазақстан Республикасы, Алматы
*e-mail: yerzhan.seitkulov@gmail.com

SPHINCS+ НЕГІЗІНДЕГІ ЦИФРЛЫҚ ҚОЛТАҢБА СХЕМАЛАРЫН ІСКЕ АСЫРУ ЖӘНЕ САЛЫСТЫРМАЛЫ ТАЛДАУ

Посткванттық криптографияда кванттық компьютерлер тарапынан туындайтын қауіптерге төтеп бере алатын алгоритмдерді құру мәселелері қарастырылады, бұл олардың ішкі архитектурасын жобалауда жаңа тәсілдерді қолдануды талап етеді. Бұл салада цифрлық қолтаңбаларға ерекше назар аударылады, себебі олар цифрлық ортада деректердің түпнұсқалығын растауды және тұтастығын қамтамасыз етеді. Ең перспективалы бағыттардың бірі ретінде хештеуге негізделген цифрлық қолтаңба схемалары қарастырылады. Олар жоғары тиімділігімен және дәлелденген криптографиялық беріктігімен ерекшеленеді, сондықтан электрондық қолтаңба үшін постквантты шешімдердің негізгі түрлерінің қатарына жатады. Осы жұмыста SPHINCS және SPHINCS+ негізіндегі кейбір схемалардың, соның ішінде SPHINCS+-тың жаңа нұсқасы болып табылатын TANBA-SPHINCS+ схемасының негізгі компоненттері, жабық және ашық кілттердің, сондай-ақ қолтаңбалардың (байтпен) өлшемдері салыстырылды. Бұл схема бірнеше ішкі түрлендіру функцияларын қамтитын модификацияланған Sponge схемасына негізделген криптографиялық хеш-функцияны қолданады. Ұсынылған тәсіл SPHINCS+ классикалық архитектурасын кеңейтеді және ішкі түрлендірулерді икемді түрде баптауға мүмкіндік береді. Мұндай құрылым алгоритмнің құрылымдық әртүрлілігін арттырады және криптоаналитикалық шабуылдардың белгілі бір түрлеріне қарсы тұрақтылықты күшейтуге ықпал етуі мүмкін. Есептеу эксперименттерін жүргізу үшін бағдарламалық іске асыру әзірленді. Мақалада өнімділік бойынша салыстырмалы эксперименттік нәтижелер ұсынылған.

Түйін сөздер: *криптографиялық алгоритм, сандық қолтаңба, криптографиялық хэш функциясы, постквантты криптография, ақпараттық қауіпсіздік.*

Е.Н. Сейткулов*, Р.М. Оспанов[1], Б.Б. Ергалиева[1], К.А. Утебаев[2]
[1]Евразийский национальный университет им. Л.Н.Гумилева, 010008, Республика Казахстан, Астана
[2]Алматинский филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»,
050040, Республика Казахстан, Казахстан

РЕАЛИЗАЦИЯ И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СХЕМ ЦИФРОВОЙ ПОДПИСИ НА ОСНОВЕ SPHINCS+

В постквантовой криптографии рассматриваются вопросы создания алгоритмов, способных устойчивость к угрозам со стороны квантовых компьютеров, что предполагает применение новых подходов к построению их внутренней архитектуры. Значительное внимание в этой области уделяется цифровым подписям, поскольку они обеспечивают подтверждение подлинности и сохранность данных в цифровой среде. Одним из наиболее перспективных направлений считаются схемы цифровой подписи, основанные на хешировании. Они отличаются высокой эффективностью и обладают доказанной криптографической стойкостью, благодаря чему относятся к числу ключевых постквантовых решений для электронной подписи. В данной работе проведено сравнение основных компонентов, размеров закрытых ключей, открытых ключей и подписей (в байтах) для некоторых вариантов схем на основе SPHINCS и SPHINCS+, включая схему TANBA-SPHINCS+, новый вариант SPHINCS+. В этой схеме применяется криптографическая хеш-функция на основе модифицированной схемы Sponge с несколькими внутренними функциями. Предложенный подход расширяет классическую архитектуру SPHINCS+ и позволяет гибко настраивать внутренние преобразования. Такая конструкция повышает структурное разнообразие алгоритма и может способствовать повышению устойчивости к определенным типам криптоаналитических атак. Для проведения вычислительных экспериментов была написана программная реализация. В статье представлены сравнительные экспериментальные результаты по производительности.

Ключевые слова: криптографический алгоритм, цифровая подпись, криптографическая хеш-функция, постквантовая криптография, информационная безопасность.

Information about the authors

Yerzhan Seitkulov* – PhD, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Republic of Kazakhstan; e-mail: yerzhan.seitkulov@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5172-8339.

Ruslan Ospanov – Researcher, Gumilyov Eurasian National University, Republic of Kazakhstan; e-mail: ospanovrm@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0771-575X.

Banu Yergaliyeva – Researcher, Gumilyov Eurasian National University, Republic of Kazakhstan; e-mail: banu.yergalieva@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1252-857X.

Kuat Utebayev – Master student, Almaty Branch, National Research Nuclear University MEPhi, Almaty 050040, Kazakhstan; e-mail: utebayevkuat@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-3032-5049.

Авторлар туралы ақпарат

Ержан Сейтқұлов* – PhD, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: yerzhan.seitkulov@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5172-8339.

Руслан Оспанов – Ғылыми қызметкер, Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: ospanovrm@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0771-575X.

Бану Ерғалиева – Ғылыми қызметкер, Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: banu.yergalieva@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1252-857X.

Қуат Өтебаев – магистрант, MEPhi Ұлттық зерттеу ядролық университетінің Алматы филиалы, Алматы 050040, Қазақстан; e-mail: utebayevkuat@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-3032-5049.

Информация об авторах

Ержан Сейткулов* – PhD, Л.Н. Евразийский национальный университет имени Гумилева, Республика Казахстан; e-mail: erzhan.seitkulov@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5172-8339.

Руслан Оспанов – научный сотрудник Евразийского национального университета имени Гумилева, Республика Казахстан; e-mail: ospanovrm@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0771-575X.

Бану Ергалиева – научный сотрудник Евразийского национального университета имени Гумилева, Республика Казахстан; e-mail: Banu.yergalieva@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1252-857X.

Куат Утебаев – магистрант, Алматинский филиал Национального исследовательского ядерного университета МИФИ, Алматы Казахстан; e-mail: utebayevkuat@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-3032-5049.

Received 04.05.2026
Revised 19.06.2026
Accepted 22.06.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-8

IRSTI: 28.23.25

CC BY 4.0
Check for updates

A. Zhakanova[1], Zh. Oralbekova[1]*, D. Oralbekova[2]
[1]Astana IT University,
010000, Republic of Kazakhstan, Astana, 55/11 Mangilik El avenue, C1 block
[2]Institute of Information and Computational Technologies,
050010, Republic of Kazakhstan, Almaty, 28 Shevchenko street
*e-mail: zh.oralbekova@astanait.edu.kz

DEVELOPMENT OF A MODEL OF KAZAKH SIGN LANGUAGE FOR CLOSED-SET PHRASE RECOGNITION AND TRAINING

Annotation: *Kazakh Sign Language (KSL) remains underrepresented in current sign language processing research due to a lack of large, annotated datasets and specialized computational tools. This paper presents a deep learning-based framework for phrase-level recognition of sign language using visual keypoint sequences, in which each recognized phrase is mapped to its gloss label and a verified reference translation in Russian. The approach employs the FluentSigners-50 dataset as a benchmark corpus and extracts pose*

©A. Zhakanova, Zh. Oralbekova, D. Oralbekova, 2026

and hand landmarks from video data using the MediaPipe Holistic model. A two-layer bidirectional long short-term memory (BiLSTM) network is trained on the resulting spatiotemporal sequences to classify forty distinct KSL phrases. The model takes as input a fixed-length sequence of 150 frames, each containing 225 keypoint features, and outputs a predicted phrase class through a multilayer perceptron. Experimental results demonstrate strong performance in phrase classification, with accurate mappings from video to gloss labels and their corresponding Russian translations, achieving an accuracy of 94.73%. Rather than performing open-vocabulary machine translation, the system addresses closed-set phrase classification with gloss and reference-translation lookup, making it suitable for structured assistive and training applications in sign language learning environments.

Key words: *kazakh sign language, sign language recognition, deep learning, bidirectional LSTM, MediaPipe Holistic, keypoint sequence modeling, closed-set phrase classification.*

Introduction

Sign language plays a critical role in enabling communication for deaf and hard-of-hearing (DHH) individuals across the world. In Kazakhstan, Kazakh Sign Language (KSL) serves as the primary medium of communication for a substantial DHH population. Despite its importance, KSL remains severely underrepresented in sign language recognition (SLR) research. This lack of computational support restricts access to education, healthcare, and public services, and creates a persistent communication gap between hearing and non-hearing communities [1, 2]. The development of automatic translation systems for KSL is thus not only technically relevant but also socially imperative.

Globally, recent advancements in deep learning have enabled significant progress in automatic sign language recognition and translation, particularly for high-resource sign languages such as American Sign Language (ASL), Chinese Sign Language (CSL), and Arabic Sign Language [3], [4]. These developments rely on large annotated datasets and spatiotemporal modeling using Convolutional Neural Networks (CNNs), Long Short-Term Memory (LSTM) networks, and Transformer-based models [5, 6]. Moreover, the use of pose estimation frameworks such as MediaPipe or OpenPose has enabled the extraction of structured body and hand keypoints for gesture modeling [7]. These advances, however, do not directly transfer to Kazakh Sign Language due to unique grammatical structures, signer variation, and resource scarcity [2].

Existing studies on KSL have explored isolated letter and word recognition using CNNs, SVMs, and LSTMs, reporting high accuracy on alphabet datasets [8, 9]. However, these works primarily focus on classification of static signs and lack support for phrase-level recognition or translation. Furthermore, many proposed systems rely on small scale, internally collected datasets with limited vocabulary coverage. The FluentSigners-50 dataset, introduced in [10], is a recent attempt to address this gap by providing sentence-level video samples of Kazakh Russian Sign Language (KRSL). Still, end-to-end frameworks for automatic KSL translation based on such data remain underexplored.

This paper presents a phrase-level recognition framework for Kazakh Sign Language based on spatiotemporal keypoint modeling and sequence classification. The model uses pose and hand landmarks extracted from the FluentSigners-50 dataset via MediaPipe Holistic and applies a two-layer Bidirectional LSTM for phrase classification. A subset of 40 commonly used KSL phrases was selected, with each input video converted into a uniform 150-frame sequence of 225-dimensional keypoint vectors. The model was trained and evaluated on this data, demonstrating reliable mapping of gestures to gloss labels and supporting future integration into KSL training and communication systems.

The system targets closed-set phrase recognition with gloss and reference-translation lookup: each input video is mapped to a fixed gloss label and a verified reference sentence in Russian. This is a deliberate scope, matched to structured KSL learning and communication scenarios where the target phrase set is known in advance.

Materials and methods

The experimental setup is based on the FluentSigners-50 dataset [10], a large-scale collection of phrase-level videos in Kazakh Russian Sign Language (KRSL). It contains over 43,000 samples from 50 fluent signers, covering 173 unique phrases. For this study, a curated subset of 40 representative KRSL phrases was selected. Each phrase (class) contains 250 video samples, resulting in a total of 10,000 annotated samples.

Each video is labeled with a class index (0-39), the corresponding sign gloss (e.g., “ЗДРАВСТВУЙТЕ”) and a Russian textual equivalent (e.g., “Здравствуйте”).

The dataset is split into training (70%), validation (15%), and test (15%) sets, stratified to ensure uniform class distribution across splits. In absolute terms, this corresponds to 7,000 training, 1,500 validation, and 1,500 test videos (37-38 samples per class in each of the validation and test partitions). The stratified split was performed at the level of individual video samples and balanced only with respect to phrase class.

To extract meaningful motion and posture information, the MediaPipe Holistic model was used, which detects 33 full body pose landmarks and 21 hand landmarks per hand. Each landmark provides three coordinates (x, y, z), resulting in a 225-dimensional feature vector per frame.

Each video is processed frame-by-frame. First, RGB frames are passed through MediaPipe. Then, if a hand is not visible, its keypoints are zero-filled. Finally, each frame’s 225-dimensional vector is stored sequentially.

All sequences are normalized to 150 frames. Shorter sequences are zero-padded, longer ones are truncated to 150. Thus, every input video becomes a tensor of shape (150, 225), ready for time-series processing.

As shown in Figure 1, the MediaPipe Holistic model extracts pose and hand keypoints directly from RGB video frames, yielding a total of 225 features per frame. The overlaid landmarks comprise body pose and both-hand joints, which together form the 225-dimensional feature vector used for gesture classification. These skeletal keypoints serve as a compact and modality-agnostic representation of signer motion and articulation across the entire video sequence.



Figure 1 – Example of pose and hand landmarks extracted from a Kazakh Sign Language video frame using MediaPipe Holistic

The proposed classification model is based on a Bidirectional Long Short-Term Memory (BiLSTM) architecture followed by a fully connected multilayer perceptron (MLP) head. The model is designed to capture both spatial and temporal characteristics of gesture sequences and to map them to phrase-level outputs.

The input to the network consists of sequences with shape (150, 225), where each sequence contains 150-time steps and each time step is represented by a 225-dimensional feature vector corresponding to frame-level keypoint features. These sequences are processed by two stacked BiLSTM layers. Each BiLSTM layer has a hidden size of 128 units per direction, resulting in a combined output dimensionality of 256 at each time step. Consequently, the BiLSTM encoder produces an output sequence of shape (150, 256), effectively capturing bidirectional temporal dependencies within the gesture data.

To transform the variable-length temporal information into a fixed-size representation, mean pooling is applied across the temporal dimension. This operation aggregates the sequence of 150-time steps into a single 256-dimensional feature vector, representing the entire video sequence.

The resulting representation is then passed through a multilayer perceptron classification head. The first dense layer reduces the feature dimension from 256 to 128 and is followed by batch normalization and a Rectified Linear Unit (ReLU) activation function. A dropout layer with a rate of 0.5 is applied to prevent overfitting. The second dense layer further reduces the dimensionality from 128 to 64, followed by another ReLU activation and a dropout layer with a rate of 0.3. Finally, a fully connected layer maps the 64-dimensional feature vector to 40 output classes, corresponding to the target phrase categories. A softmax activation function is applied to produce class probabilities over the 40 output classes.

This architecture effectively captures bidirectional temporal dependencies in gesture sequences while maintaining a compact and efficient representation. The overall design ensures that both spatial and temporal information are preserved and utilized for accurate phrase-level classification.

The complete architecture of the proposed model is illustrated in Figure 2. To improve generalization and ensure stable convergence during training, regularization techniques such as dropout and batch normalization are incorporated throughout the network. These design choices contribute to both spatiotemporal sensitivity and computational efficiency, making the model suitable for phrase-level sign language recognition tasks.

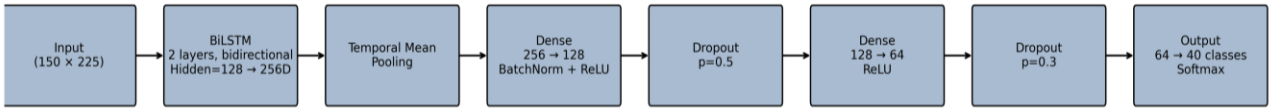


Figure 2 – Architecture of the model

The model was trained using a supervised learning approach with categorical cross-entropy as the loss function. Optimization was performed using the Adam optimizer, which provides adaptive learning rate adjustments and efficient convergence for deep neural networks.

The training process used a fixed schedule of 150 epochs with batch size 32, a ReduceLROnPlateau learning-rate scheduler (factor 0.5, patience 5 epochs on validation loss), and gradient clipping (max norm 1.0) to stabilize convergence. A checkpoint was saved after every epoch. The checkpoint achieving the highest validation accuracy across all 150 epochs was selected as the final model, the test set was held out completely from this selection process and used exactly once.

The final model was selected based on its validation set performance, with the best results obtained at epoch 150. This model achieved a test accuracy of 94.73%, demonstrating strong generalization capability on unseen data.

The BiLSTM-MLP classifier contains 802,792 trainable parameters (around 0.80 million and around 3.1 MB at single precision), substantially smaller than typical image-based or transformer-based sign language recognition models, reflecting the compactness gained by operating on low-dimensional keypoint sequences rather than raw video. All experiments were run on a single Apple M4 machine, the BiLSTM classifier was trained on CPU only, with no dedicated GPU. MediaPipe Holistic keypoint extraction required on average 3 seconds of processing per video on this hardware (a one-time, offline preprocessing cost of 8.3 hours for the full 10,000-video subset used in this study). Training the BiLSTM classifier for 150 epochs on this 40-class subset took approximately 3.4 hours.

Results

A total of 10,000 videos representing 40 distinct phrases were selected from the FluentSigners-50 dataset. Each phrase contains 250 samples performed by multiple fluent signers. The dataset was stratified into 70% training, 15% validation, and 15% test sets, ensuring balanced class representation. The final test set consisted of 1,500 examples (approximately 37-38 samples per class).

The final model, trained over 150 epochs using the Adam optimizer and cross-entropy loss, achieved an overall test accuracy of 94.73%. Table 1 summarizes the per-class precision, recall, and F1-score results across all 40 classes.

The overall accuracy on the test set was 94.73%, with a macro-average F1-score of 94.74%. The weighted average across all metrics remained consistently above 94%.

The normalized confusion matrix in Figure 3 illustrates classification confidence across all 40 classes. Most classes exhibited strong diagonal dominance, confirming high accuracy and low confusion. However, several misclassifications occur in semantically similar classes. In particular, the model confuses class 14 (“Какой ваш адрес”) with class 15 (“Где вы живете”), and class 17 (“Где находится магазин”) with class 16 (“Как вас зовут”), which correspond to contextually related location and identity queries.

Table 1 – per class classification metrics

Class ID	Precision	Recall	F1-score	Support
0	1.0000	1.0000	1.0000	37
1	0.9744	1.0000	0.9870	38
2	0.9500	1.0000	0.9744	38
3	1.0000	0.9737	0.9867	38
4	0.9722	0.9459	0.9589	37
5	0.8293	0.8947	0.8608	38
6	0.9737	1.0000	0.9867	37
7	0.8718	0.8947	0.8831	38
8	1.0000	0.9459	0.9722	37
9	0.9730	0.9730	0.9730	37
10	1.0000	0.9474	0.9730	38
11	0.9500	1.0000	0.9744	38
12	0.9730	0.9730	0.9730	37
13	0.9487	1.0000	0.9737	37
14	1.0000	1.0000	1.0000	38
15	0.6923	0.7297	0.7105	37
16	1.0000	0.9730	0.9863	37
17	0.7059	0.6486	0.6761	37
18	1.0000	0.9737	0.9867	38
19	0.9474	0.9730	0.9600	37
20	1.0000	0.9474	0.9730	38
21	1.0000	0.9474	0.9730	38
22	0.9250	0.9737	0.9487	38
23	1.0000	0.9737	0.9867	38
24	1.0000	0.8649	0.9275	37
25	0.9231	0.9730	0.9474	37
26	0.9474	0.9730	0.9600	37
27	0.9714	0.9189	0.9444	37
28	0.9444	0.8947	0.9189	38
29	0.9189	0.8947	0.9067	38
30	0.9444	0.8947	0.9189	38
31	0.7826	0.9730	0.8675	37
32	1.0000	0.9474	0.9730	38
33	1.0000	1.0000	1.0000	37
34	1.0000	1.0000	1.0000	37
35	0.9730	0.9474	0.9600	38
36	0.9500	1.0000	0.9744	38
37	0.9250	1.0000	0.9610	37
38	1.0000	0.9211	0.9589	38
39	1.0000	1.0000	1.0000	37

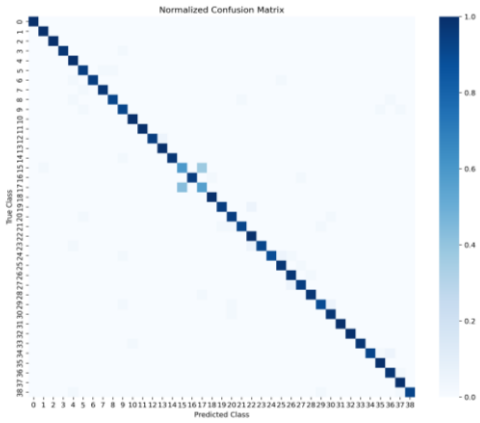


Figure 3 – Confusion matrix on the test set

These confusions suggest that although the model captures the dominant spatiotemporal patterns, gesture overlap and subtle hand trajectory differences may lead to ambiguity across neighboring classes. This indicates a potential need for more training examples or finer-grained motion modeling in future iterations.

To assess model convergence and generalization, we analyzed validation accuracy across training epochs. Table 2 reports performance at selected checkpoints.

Table 2 – validation accuracy across epochs

Experiment	Epochs	Val Accuracy	Val Loss
1	20	0.8020	1.3223
2	50	0.9020	0.9853
3	80	0.9207	0.9208
4	100	0.9293	0.9093
5	135	0.9280	0.9099
6	150	0.9473	0.9118
Final	150	0.9473	0.9118

As shown, performance steadily improved up to epoch 80. The best validation accuracy was recorded at epoch 150, which was selected as the final model checkpoint.

To further examine model learning dynamics, training and validation loss, as well as validation accuracy, were monitored across 150 epochs. The training dynamics illustrated in Figure 4 demonstrate stable convergence over the course of 150 epochs.

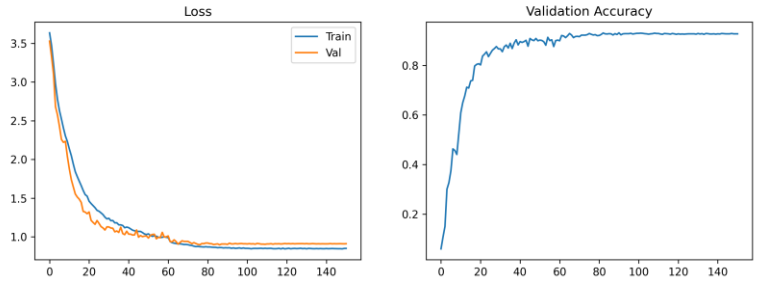


Figure 4 – Training and validation loss and validation accuracy curves over 150 epochs

The training loss exhibits a smooth and monotonic decrease, approaching a minimum below 0.9. The validation loss follows a similar trend, stabilizing after approximately 60 epochs, indicating the model has generalized well without overfitting. The validation accuracy improves rapidly during early epochs, plateauing near 0.91, confirming robust learning capacity of the BiLSTM-based architecture and the effectiveness of the chosen optimization strategy.

Discussion

The results of this study demonstrate the feasibility and practical value of using pose-based temporal modeling for phrase-level recognition in Kazakh Sign Language (KSL). The system achieved over 94.73% classification accuracy across 40 frequently used KRSL phrases, using MediaPipe keypoints and a BiLSTM architecture trained on a curated subset of the FluentSigners-50 dataset.

The use of MediaPipe Holistic for keypoint extraction provides a compact and noise-resistant representation of gesture dynamics. By transforming raw video input into structured skeletal features, the model effectively reduces sensitivity to environmental variations such as background clutter and illumination changes, while preserving essential spatial and temporal information. This representation enables efficient learning and contributes to the stable convergence observed during training. The training and validation loss curves exhibit consistent behavior, with no significant divergence, suggesting that the applied regularization techniques, including dropout and batch normalization, successfully mitigate overfitting.

Some of the model's confusion patterns can be attributed to semantic and gestural similarity across multiple KSL phrases. For example, confusion between phrases related to location ("Где вы живете" and "Какой ваш адрес") and identity-related queries indicates that overlapping motion trajectories and similar temporal patterns remain challenging for the model. Similarly, lower

performance in classes such as 15 and 17 (F1-scores of 0.71 and 0.67, respectively) suggests that subtle differences in gesture execution are not always fully captured by the current representation. These findings are consistent with prior work, where dynamic gesture similarity and coarticulation effects are known to limit classification performance in sign language recognition systems [11].

Furthermore, signer variability, including hand speed, articulation, and background, affects model consistency. While the MediaPipe Holistic model provides robust keypoints, even minor differences in pose estimation can propagate to misclassifications, particularly in boundary cases with short or incomplete signs. These findings highlight the need for more fine-grained attention mechanisms and signer-aware adaptation in future work [7].

One of the distinguishing features of this system is its applicability to KSL learning environments. The proposed model can serve as a foundational component in interactive training tools where learners practice phrase articulation and receive real-time classification feedback. For example, a language learner can perform a KSL phrase on camera, and the model would predict and display the detected phrase in gloss and spoken Kazakh, enabling self-correction and visual reinforcement.

This aligns with recent trends in computer-assisted sign language learning, where models trained on phrase-level gestures act as digital tutors [4]. Compared to prior systems trained on isolated signs or letters, the use of phrase-level data from FluentSigners-50 allows for more contextual and grammatically relevant feedback, which is critical for meaningful conversation training.

The work presented in this study introduces a technically novel contribution to Kazakh Sign Language recognition. It constitutes the first implementation of a phrase-level classification model for KSL that employs bidirectional long short-term memory (BiLSTM) networks operating on MediaPipe-based pose and hand keypoints. This architecture bridges spatially structured gesture input with sequential temporal modeling, enabling accurate phrase-level recognition in a low-resource linguistic setting.

In addition, the system incorporates a fully automated end-to-end pipeline that processes raw video data from the FluentSigners-50 dataset, performs landmark extraction, applies sequence normalization, and classifies complete phrases. Unlike prior work that typically focuses on isolated signs or alphabets, this model targets semantically meaningful phrase recognition, offering a more linguistically relevant output for real-world communication.

A further strength of the proposed system lies in its modular design: the architecture maintains a clear separation between feature extraction (via pose/hand keypoints) and sequence learning (via BiLSTM), ensuring flexibility and scalability. This modularity allows for seamless extension to additional phrase classes or sign languages with minimal structural adjustment. Collectively, these contributions position the model as a viable foundation for research and assistive applications in underrepresented sign languages such as KSL.

From a methodological perspective, the proposed approach can be considered competitive with recent state-of-the-art (SOTA) methods for low-resource sign language recognition. While CNN-based and transformer-based architectures have demonstrated strong performance in large-scale datasets, they typically require significantly higher computational resources and large annotated corpora. In contrast, the proposed BiLSTM model reduces computational overhead by operating on low-dimensional keypoint features rather than high-resolution image data, while maintaining high accuracy. This makes the model suitable for real-time applications and deployment in resource-constrained environments. Compared to approaches using YOLO-based detection combined with temporal modeling, the MediaPipe-based pipeline reduces preprocessing overhead while still capturing essential gesture dynamics.

To substantiate this comparison, Table 3 summarizes recent results on Kazakh Sign Language recognition.

[9] reported 99% accuracy using a Support Vector Machine on MediaPipe hand landmarks, but for a considerably simpler task, classifying 42 static dactyl (finger-spelling) signs from single images, with no temporal modeling. [8] achieved 95.7% accuracy with a ResNet-50/VGG-19 ensemble on the same 42-class static Kazakh dactyl alphabet. The methodologically closest prior work [7], which applies a BiLSTM over YOLO-extracted keypoints and optical flow, reported 92% accuracy on its largest set (47 isolated gesture classes, without optical flow).

Table 3 – comparison with related work

Study	Method	Task / classes	Dataset	Accuracy
Zholshiyeva et al. [9], 2023	MediaPipe + SVM	Static dactyl signs, 42 classes	4,200 images	99%
Amirgaliyev et al. [8], 2024	CNN ensemble (ResNet-50+VGG-19)	Static dactyl signs, 42 classes	57,708 images	95.7%
Buribayev et al. [7], 2025	YOLOv8-Pose + optical flow + BiLSTM	Isolated gestures, 47 classes	166,010 samples	92.0% (no flow) / 54.0% (with flow)
Present study	MediaPipe Holistic + BiLSTM	Isolated phrase classification, 40 classes	FluentSigners-5, 10,000 videos	94.73%

Accuracy fell to 54% once optical-flow features were added, which the authors attributed to additional noise at higher class counts. By comparison, the present model reaches 94.73% accuracy on 40 classes using the larger, signer-diverse FluentSigners-50 corpus [10], without a dedicated keypoint detector or an auxiliary motion stream. It should be noted that all three studies above address static or short isolated-sign classification, while the present work addresses phrase-level (multi-word) classification, a linguistically more complex unit.

Despite the strong performance, several limitations remain. The current framework focuses on isolated phrase classification and does not address continuous sign language recognition, where temporal segmentation and context modeling are required. In addition, the model relies primarily on hand and pose keypoints, without incorporating facial expressions or lip movements, which are important components of sign language communication. These factors limit the system’s ability to fully capture the multimodal nature of KSL.

It is also worth situating this system relative to the broader sign language translation literature. As formalized in [12], Sign Language Translation is an open-vocabulary sequence-to-sequence problem capable of producing previously unseen sentences. The present system addresses a complementary problem: high-precision recognition over a fixed, known phrase set, where each recognized phrase is mapped to its gloss and a verified reference translation. This closed-set design guarantees a correct reference translation for every recognized class, avoiding the mistranslation risk inherent to generative open-vocabulary output, which matters directly for an educational or assistive tool. Broadening coverage toward open-vocabulary sequence-to-sequence translation, as outlined in planned follow-up work, would extend the system's reach beyond this fixed phrase set while preserving the reliability the closed-set design provides for the phrases it already covers.

Overall, the proposed method demonstrates that keypoint-based spatiotemporal modeling provides a reliable and efficient solution for phrase-level sign language recognition, while also highlighting areas for further enhancement.

Conclusion

This paper presented a deep learning-based model for phrase-level recognition of Kazakh Sign Language using MediaPipe keypoints and bidirectional LSTM sequence modeling. The proposed system achieved 94.73% accuracy and a macro-average F1-score of 94.74% across 40 common KSL phrases using a compact architecture and a well-curated subset of the FluentSigners-50 dataset. By converting each video into normalized skeletal sequences, the model efficiently captured temporal gesture dynamics without the need for raw video or manual gloss annotations.

The findings confirm that keypoint-based representations provide a robust and computationally efficient alternative to traditional image-based methods. By reducing input dimensionality while preserving essential motion information, the approach enables stable training, strong generalization, and suitability for real-time applications. The integration of bidirectional temporal modeling further enhances performance by capturing contextual dependencies across gesture sequences.

Analysis of the experimental results reveals that the model performs consistently across most classes, with high precision and recall. Misclassifications are primarily associated with gestures that exhibit similar spatial and temporal trajectories. These observations provide valuable insights into the challenges of phrase-level sign language recognition and highlight directions for future research.

In conclusion, the proposed approach contributes to the advancement of sign language recognition for low-resource languages by demonstrating that efficient keypoint-based sequence modeling can achieve high accuracy in phrase-level tasks. The developed framework provides a foundation for the creation of scalable assistive technologies aimed at improving communication accessibility for the deaf and hard of hearing community.

References

1. Aitim A. A systematic review on translating Kazakh sign language to speech using dynamic gesture recognition / A. Aitim, D. Sattarkhuzhayeva, A. Khairullayeva // The Bulletin of KazATC. – 2025. – T. 138, № 3. – P. 122-133. https://doi.org/10.52167/1609-1817-2025-138-3-122-133.
2. Creating a Parallel Corpus for the Kazakh Sign Language and Learning / A. Yerimbetova et al // Applied Sciences. – 2025. – T. 15, № 5. – P. 2808. https://doi.org/10.3390/app15052808.
3. Advancements in Machine Learning Techniques for Hand Gesture-Based Sign Language Recognition: A Comprehensive Review / U. Rastogi et al // Archives of Computational Methods in Engineering. – 2025. – T. 32, № 7. – P. 4265-4302. https://doi.org/10.1007/s11831-025-10258-z.
4. Almjally A., Almukadi W.S. Deep computer vision with artificial intelligence based sign language recognition to assist hearing and speech-impaired individuals / A. Almjally, W.S. Almukadi // Scientific Reports. – 2025. – T. 15, № 1. – P. 32268. https://doi.org/10.1038/s41598-025-09106-8.
5. Deep learning pathways for automatic sign language processing / M. Toshpulatov et al // Pattern Recognition. – 2025. – T. 164. – P. 111475. https://doi.org/10.1016/j.patcog.2025.111475.
6. Luqman H. SignVLM: a pre-trained large video model for sign language recognition / H. Luqman // PeerJ Computer Science. – 2025. – T. 11. – P. e3112. https://doi.org/10.7717/peerj-cs.3112.
7. Enhancing Kazakh Sign Language Recognition with BiLSTM Using YOLO Keypoints and Optical Flow / Z. Buribayev et al // Applied Sciences. – 2025. – T. 15, № 10. – P. 5685. https://doi.org/10.3390/app15105685.
8. Application of neural networks ensemble method for the Kazakh sign language recognition / Y. Amirgaliyev et al // Bulletin of Electrical Engineering and Informatics. – 2024. – T. 13, № 5. – P. 3275-3287. https://doi.org/10.11591/eei.v13i5.7803.
9. Real-time Kazakh sign language recognition using Mediapipe and SVM / L. Zholshiyeva et al // Academic Scientific Journal of Computer Science. – 2023. – № 1. – P. 82-93. https://doi.org/10.32014/2023.2518-1726.170.
10. FluentSigners-50: A signer independent benchmark dataset for sign language processing / M. Mukushev et al // PloS ONE. – 2022. – T. 17, № 9. – P. e0273649. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0273649.
11. Continuous sign language recognition and its translation into intonation-colored speech / N. Amangeldy et al // Sensors. – 2023. – T. 23, № 14. – P. 6383. https://doi.org/10.3390/s23146383.
12. Neural Sign Language Translation / N.C. Camgoz et al // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – Salt Lake City, USA, 2018. – P. 7784-7793. https://doi.org/10.1109/CVPR.2018.00812.

Ә. Жаканова[1], Ж. Оралбекова[1]*, Д. Оралбекова[2]

[1]Astana IT University, 010000, Республика Казахстан, Астана, проспект Мәңгілік Ел, 55/11, блок С1

[2]Институт информационных и вычислительных технологий,
050010, Республика Казахстан, Алматы, ул. Шевченко, 28

*e-mail: zh.oralbekova@astanait.edu.kz

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ КАЗАХСКОГО ЖЕСТОВОГО ЯЗЫКА ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ И ОБУЧЕНИЯ ЗАМКНУТЫХ ФРАЗ

Казахский язык жестов (KSL) остается недостаточно представленным в современных исследованиях по обработке языка жестов из-за отсутствия больших аннотированных наборов данных и специализированных вычислительных инструментов. В этой статье представлен основанный на глубоком обучении фреймворк для распознавания языка жестов на уровне фраз с использованием визуальных последовательностей ключевых точек, в котором каждая распознанная фраза сопоставляется с соответствующей и проверенным переводом на русский язык. Этот подход использует набор данных FluentSigners-50 в качестве эталонного корпуса и извлекает позы и ориентиры рук из видеоданных, используя целостную модель MediaPipe. Двухуровневая двунаправленная сеть долговременной кратковременной памяти (BiLSTM) обучается на основе полученных пространственно-временных последовательностей для классификации сорока различных фраз KSL. Модель принимает в качестве входных данных последовательность фиксированной длины из 150 кадров, каждый из которых содержит 225 ключевых объектов, и выводит предсказанный класс фраз через многослойный персептрон. Результаты экспериментов демонстрируют высокую эффективность в классификации фраз, с

точным сопоставлением видео с глосс-метками и соответствующими переводами на русский язык, точность которых достигает 94,73%. Вместо полноценного открытого машинного перевода система решает задачу классификации фраз закрытого множества с отображением gloss-метки и эталонного перевода, что делает её применимой как для вспомогательных, так и для обучающих приложений.

Ключевые слова: *казахский язык жестов, распознавание языка жестов, глубокое обучение, двунаправленный LSTM, MediaPipe Holistic, моделирование последовательности ключевых точек, классификация замкнутых фраз.*

Ә. Жақанова[1], Ж. Оралбекова[1]*, Д. Оралбекова[2]

[1]Astana IT University, 010000, Қазақстан Республикасы, Астана, Мәңгілік Ел даңғылы, 55/11, С1 блогы

[2]Ақпараттық және есептеуіш технологиялар институты,

050010, Қазақстан Республикасы, Алматы, Шевченко көшесі, 28

*e-mail: zh.oralbekova@astanait.edu.kz

ЖАБЫҚ СӨЗ ТІРКЕСТЕРІН ТАНУ ЖӘНЕ ОҚЫТУ ҮШІН ҚАЗАҚ ЫМДАУ ТІЛІНІҢ МОДЕЛІН ӘЗІРЛЕУ

Қазақ ымдау тілі (KSL) қазіргі ымдау тілдерін өңдеу саласындағы зерттеулерде жеткілікті деңгейде ұсынылмаған, бұл ең алдымен ауқымды таңбаланған деректер жиынтықтарының және арнайы есептеу құралдарының жетіспеушілігімен байланысты. Бұл мақалада визуалды кілттік нүктелер тізбегіне негізделген, ымдау тілін фразалық деңгейде тану және әрбір танылған фразаны оның глосс-белгісімен және эталондық аудармасымен сәйкестендіруге арналған терең оқытуға негізделген әдіс ұсынылады. Ұсынылған тәсіл эталондық корпус ретінде FluentSigners-50 деректер жиынтығын пайдаланады және бейнемәліметтерден поза мен қол қимылдарының белгілерін MediaPipe Holistic моделі арқылы бөліп алады. Алынған кеңістіктік-уақыттық тізбектер негізінде екі қабатты екібағытты ұзақ қысқа мерзімді жад (BiLSTM) нейрондық желісі оқытылып, қазақ ымдау тіліндегі қырық түрлі фразаны жіктеуді жүзеге асырады. Модель кіріс ретінде ұзындығы бекітілген 150 кадрдан тұратын тізбекті қабылдайды, әрбір кадр 225 кілттік нүкте белгілерін қамтиды, ал шығыс ретінде көпқабатты перцептрон арқылы болжанған фраза класын береді. Эксперименттік нәтижелер фразаларды жіктеу міндетінде жоғары тиімділікті көрсетеді: бейнеден глосс белгілеріне және олардың сәйкес орыс тіліндегі аудармаларына дәл салыстырулар 94,73% дәлдікке қол жеткізді. Толыққанды ашық сөздікті машиналық аударманың орнына жүйе жабық жиынтықтағы фразаларды жіктеу және глосс-белгі мен эталондық аударманы сәйкестендіру міндетін шешеді, бұл оны көмекші және оқыту қолданбаларында қолдануға жарамды етеді.

Түйін сөздер: *қазақ ымдау тілі; ымдау тілін тану; терең оқыту; екібағытты LSTM; MediaPipe Holistic; кілттік нүктелер тізбегін модельдеу; жабық сөз тіркестерінің жіктелуі.*

Сведения об авторах

Әсем Ерікқызы Жақанова – магистрант 1 курса, Astana IT University, Казахстан; e-mail: 255692@astanait.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-2416-645X.

Жанар Орымбаевна Оралбекова* – PhD, ассоциированный профессор, и.о. профессора Школы ИИ и науки о данных, Astana IT University, Казахстан; e-mail: zh.oralbekova@astanait.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3726-8882.

Дина Орымбаевна Оралбекова – PhD, ассоциированный профессор, старший научный сотрудник Института информационных и вычислительных технологий, Казахстан; e-mail: dinaoral@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4975-6493.

Авторлар туралы мәліметтер

Әсем Ерікқызы Жақанова – 1 курс магистранты, Astana IT University, Қазақстан; e-mail: 255692@astanait.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-2416-645X.

Жанар Орымбаевна Оралбекова* – PhD, қауымдастырылған профессор, Жасанды интеллект және деректер ғылымы мектебінің профессоры м.а., Astana IT University, Қазақстан; e-mail: zh.oralbekova@astanait.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3726-8882.

Дина Орымбаевна Оралбекова – PhD, қауымдастырылған профессор, Ақпараттық және есептеуіш технологиялар институтының аға ғылыми қызметкері, Қазақстан; e-mail: dinaoral@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4975-6493.

Information about the authors

Assem Zhakanova – first year master's student, Astana IT University, Kazakhstan; e-mail: 255692@astanait.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-2416-645X.

Zhanar Oralbekova* – PhD, associate professor, acting Professor of the School of AI and Data Science, Astana IT University, Kazakhstan; e-mail: zh.oralbekova@astanait.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3726-8882.

Dina Oralbekova – PhD, associate professor, Senior Researcher of Institute of information and computational technologies, Kazakhstan; e-mail: dinaoral@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4975-6493.

Received 01.05.2026
Revised 25.06.2026
Accepted 29.06.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-9

CC BY 4.0
Check for updates

МРНТИ: 55.30.31

Е.А. Тулешов[1], Қ.М. Абуталипов[1], М.Ж. Куатова[2], П.М. Рахметова[1]*
[1]Satbayev University, 050000, Республика Казахстан, г.Алматы, ул. Сатпаева 22
[2]Институт Механики Машиноведения им. Академика У.А. Джолдасбекова,
050010, Республика Казахстан, г.Алматы, ул. Шевченко 28
*e-mail: p.rakhmetova@gmail.com

РАЗРАБОТКА ГИБРИДНОЙ АРХИТЕКТУРЫ КООРДИНАЦИИ ФЛОТА МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ НА ОСНОВЕ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ПЛАНИРОВАНИЯ И ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ НАВИГАЦИИ

Аннотация: *В статье предложена и формализована гибридная архитектура управления флотом мобильных роботов, в которой централизованный уровень MAPF/CBS формирует согласованный дискретный план движения, а децентрализованный уровень ROS2/Nav2 обеспечивает непрерывное исполнение и локальную адаптацию в среде Gazebo. В отличие от полностью централизованных схем, чувствительных к росту вычислительной сложности и отклонениям исполнения, а также от Nav2-only режима, не имеющего глобального механизма предотвращения межроботных конфликтов, предложенная архитектура вводит промежуточный Fleet Manager. Данный модуль преобразует дискретный план в последовательность waypoint-команд, контролирует прогресс, выявляет задержки и инициирует перепланирование при нарушении условий движения. Сформулирована математическая постановка задачи на графе G=(V,E), заданы конфликтные ограничения по вершинам и рёбрам, целевые критерии makespan и sum-of-costs, а для непрерывного исполнения приведена кинематическая модель Ackermann-типа. Экспериментальная проверка выполнена на двух уровнях: в дискретной MAPF/CBS-модели и в симуляционной среде ROS2/Gazebo/Nav2. Для эталонного режима R1 показано, что при увеличении числа агентов на карте A с N=1 до N=8 время планирования возрастает с 0,095823 до 15,709505 с, SOC – с 3 до 40, а makespan – с 2 до 4 тактов. Полученные результаты подтверждают необходимость гибридного переноса централизованного плана в локально адаптивное исполнение и задают воспроизводимый контур оценки масштабируемости, устойчивости и конфликтности многороботной системы.*

Ключевые слова: *гибридная архитектура управления; многоагентные робототехнические системы; MAPF; Conflict-Based Search; ROS2; Nav2; Gazebo; автономная навигация.*

Введение

Автономные мобильные роботы становятся ключевым элементом складской, производственной и внутрилогистической автоматизации, где требуется согласованное перемещение грузов, материалов и сервисных платформ в общем рабочем пространстве [1-3]. При увеличении числа агентов растёт плотность движения, возникают пересечения траекторий, очереди в узких проходах, взаимные блокировки и локальные тупиковые состояния. Поэтому качество многороботной системы определяется не только автономной навигацией отдельного робота, но и способностью всей группы поддерживать глобально согласованный порядок движения.

Существующие архитектуры управления обычно опираются на две предельные парадигмы. Децентрализованные системы хорошо масштабируются и устойчивы к локальным изменениям среды, поскольку каждый робот принимает решения на основе собственных

©Е.А. Тулешов, Қ.М. Абуталипов, М.Ж. Куатова, П.М. Рахметова, 2026

сенсоров, локальной карты и навигационного стека [3, 6]. Однако отсутствие глобального координатора приводит к неоптимальному распределению проходов, конкуренции за узкие зоны и росту времени выполнения задач. Централизованные системы, напротив, способны строить согласованные планы движения для всего флота, но требуют полной информации о состоянии среды и становятся вычислительно более затратными при росте числа агентов [2, 4, 5].

Формальной основой централизованной координации является задача Multi-Agent Path Finding (MAPF), в которой необходимо построить набор траекторий для группы агентов без пространственно-временных конфликтов. Одним из наиболее интерпретируемых алгоритмов решения MAPF является Conflict-Based Search (CBS): верхний уровень выявляет конфликт и порождает ограничения, а нижний уровень перестраивает индивидуальные маршруты с учётом этих ограничений [4, 5, 11]. Такая схема обеспечивает строгую трактовку конфликтов по вершинам и рёбрам, но при увеличении числа агентов и необходимости частого перепланирования её вычислительная нагрузка быстро возрастает.

Практическая проблема состоит в том, что дискретный бесконфликтный план MAPF не является готовой траекторией для физического робота. В непрерывной среде необходимо учитывать габариты платформы, кинематические ограничения, ошибки локализации, задержки связи, динамические препятствия и параметры локальной навигации. Сравнительные исследования централизованных и децентрализованных схем, распределённой координации, ресурсного планирования и кооперативной локализации показывают, что наиболее устойчивые решения требуют сочетания глобального согласования и локальной автономии [7-10]. Поэтому перспективным является гибридный подход, при котором централизованный уровень задаёт порядок движения и предотвращает конфликты на уровне флота, а децентрализованный уровень обеспечивает устойчивое исполнение средствами ROS2/Nav2 и локальных costmap [12-14].

Целью настоящей работы является разработка и экспериментальная оценка гибридной архитектуры управления мобильными роботами, объединяющей MAPF/CBS-координацию, Fleet Manager и децентрализованное исполнение на базе Nav2 в ROS2/Gazebo. Научная новизна заключается в формализованном связывании дискретного координационного плана с непрерывным исполнением через waypoint-представление, контроль прогресса и событийное перепланирование. Вклад работы включает: математическую постановку задачи, корректную кинематическую модель Ackermann-типа, описание экспериментального стенда, систему метрик и количественную оценку эталонного CBS-режима.

Методология

Методология исследования основана на иерархическом представлении многороботной системы. На верхнем уровне рабочее пространство описывается дискретной картой или графом, на котором решается задача MAPF/CBS. На среднем уровне Fleet Manager преобразует дискретный план в последовательность целей и контролирует ход исполнения. На нижнем уровне каждый робот выполняет движение в непрерывной среде средствами ROS2/Nav2, используя локализацию, локальное планирование, costmap и механизмы восстановления.

Формальная постановка задачи

Пусть рабочая зона представлена графом, заданным формулой (1):

$$G = (V, E), \quad (1)$$

где V – множество допустимых дискретных позиций, E - множество переходов между соседними позициями.

Для флота из N роботов заданы стартовые вершины s_i и целевые вершины g_i, i=1,...,N. Дискретная траектория i-го робота задаётся формулой (2), где начальная и конечная вершины соответствуют поставленной задаче перемещения.

$$\pi\_i = \langle v\_i(0), v\_i(1), \dots, v\_i(T\_i) \rangle, \; v\_i(0) = s\_i, \; v\_i(T\_i) = g\_i \quad (2)$$

Допустимое решение должно исключать два базовых типа конфликтов: вершинный конфликт и рёберный конфликт. Эти ограничения представлены формулами (3) и (4). В качестве критериев качества используются makespan и sum-of-costs, определяемые

формулами (5) и (6). Для гибридного режима дополнительно учитываются суммарный фактический пробег, число перепланирований и доля успешных запусков.

$$v\_i(t) \neq v\_j(t), \ \forall\, i \neq j \tag{3}$$

$$(v\_i(t), v\_i(t+1)) \neq (v\_j(t+1), v\_j(t)), \ \forall\, i \neq j \tag{4}$$

$$T\_make = \max\_\{i = 1, \ldots, N\}\, T\_i \tag{5}$$

$$SOC = \Sigma\_\{i = 1\}\hat{}\{N\}\, T\_i \tag{6}$$

Обобщённая целевая функция задаётся формулой (7):

$$J = \alpha T_{make} + \beta SOC + \gamma N_{replan} + \eta D_{sum}, \tag{7}$$

где коэффициенты alpha, beta, gamma и eta определяют приоритеты между скоростью завершения, компактностью маршрутов, адаптационной нагрузкой и фактической длиной движения.

В дискретном эталонном режиме R1 оптимизируются T_make и SOC; в непрерывных режимах R2 и R3 основное внимание уделяется времени завершения, успешности выполнения, блокировкам и фактическому пробегу по одометрии.

Алгоритм гибридного управления

Гибридный цикл выполняется следующим образом: 1) формируются start/goal-пары и дискретная карта; 2) CBS строит бесконфликтный план; 3) Fleet Manager сжимает коллинеарные участки и преобразует узлы плана в waypoint-цели; 4) Nav2 исполняет цели в отдельных ROS2 namespace каждого робота; 5) по обратной связи оцениваются достижение цели, отсутствие прогресса, ошибки Nav2 и превышение таймаута; 6) при нарушении условий инициируется локальное или глобальное перепланирование. Такая организация отделяет стратегическое разрешение конфликтов от реактивного исполнения движения. Внешний вид 3D-модели робота в симуляторе представлен на рисунке 1.

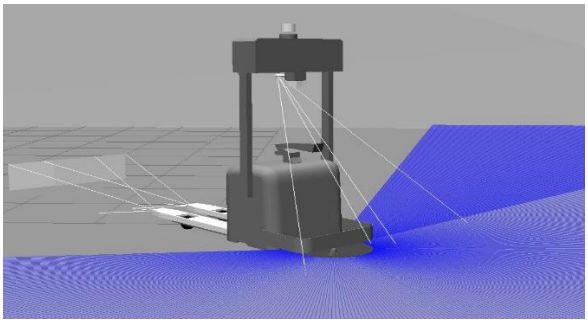


Рисунок 1 – Внешний вид 3D-модели робота в симуляторе (Gazebo)

Для непрерывного исполнительного уровня использована кинематическая модель Ackermann-типа. Она отражает связь между линейной скоростью робота v, углом поворота рулевого колеса δ, базой робота L и изменением позы q=(x,y,θ) в плоскости. Модель минимизирует боковое проскальзывание и является достаточной для передачи ограничений движения в контроллер и систему одометрии; её уравнения приведены в формуле (8). Схематическое изображение кинематики с обозначением переменных показано на рисунке 2.

$$\dot{x} = v\cos\theta, \quad \dot{y} = v\sin\theta, \quad \dot{\theta} = \left(\frac{v}{L}\right)\tan\delta, \tag{8}$$

где x,y – координаты центра робота в плоскости; theta – угол ориентации; v – линейная скорость; delta – угол поворота рулевого механизма; L – расстояние между передней и задней осями.$(x, y)\theta L$

Одометрия вычислялась численным интегрированием скоростей и угла рулевого механизма, после чего использовалась Nav2 и AMCL для локализации, построения локальных траекторий и контроля достижения целей. Для связи дискретного и непрерывного уровней применялось преобразование координат, заданное формулой (9):

$$x = x\_0 + r\,i, \quad y = y\_0 + r\,j \tag{9}$$

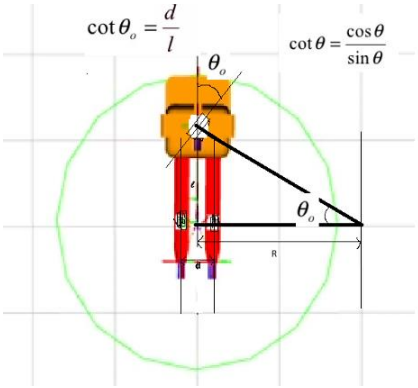


Рисунок 2 – Схематическое изображение кинематики с обозначением переменных

Критерий достижения waypoint задавался ошибкой положения по формуле (10). Цель считалась достигнутой при выполнении условия (11). Перепланирование инициировалось при превышении таймаута, отсутствии прогресса или ошибке Nav2; соответствующие условия приведены в формулах (12)-(14).

$$e\_i(t) = \sqrt{((x\_i(t) - x\_goal)\text{^}2 + (y\_i(t) - y\_goal)\text{^}2)} \quad (10)$$

$$e\_i(t) \leq R\_goal \quad (11)$$

$$t\_now - t\_sent > t\_timeout \Rightarrow replan \quad (12)$$

$$\sqrt{((x\_i(t) - x\_i(t - T\_stuck))\text{^}2 + (y\_i(t) - y\_i(t - T\_stuck))\text{^}2)} < d\_min \Rightarrow replan \quad (13)$$

$$Nav2\_status \in \{aborted, canceled\} \Rightarrow replan \quad (14)$$

Результаты исследований

Экспериментальная оценка проводилась на двух взаимодополняющих уровнях. Дискретный уровень использовался для проверки централизованной координации MAPF/CBS и расчёта makespan, SOC и времени планирования. Непрерывный уровень ROS2/Gazebo/Nav2 применялся для анализа поведения роботов при физически интерпретируемом исполнении, где каждый агент функционировал в отдельном ROS2 namespace, а воспроизводимость конфигураций обеспечивалась контейнеризацией Docker. Параметры дискретных карт и преобразования координат приведены в таблице 1, а также пример симуляции многороботной системы показан на рисунке 3.

Таблица 1 – Параметры дискретных карт и преобразования координат

Карта	Размер сетки	r, м	x0	y0	Тип среды
A	3 x 3	2,0	-2,0	-2,0	свободная / низкоконфликтная среда
B	3 x 3	2,0	-2,0	-2,0	коридорная / конфликтно-нагруженная среда

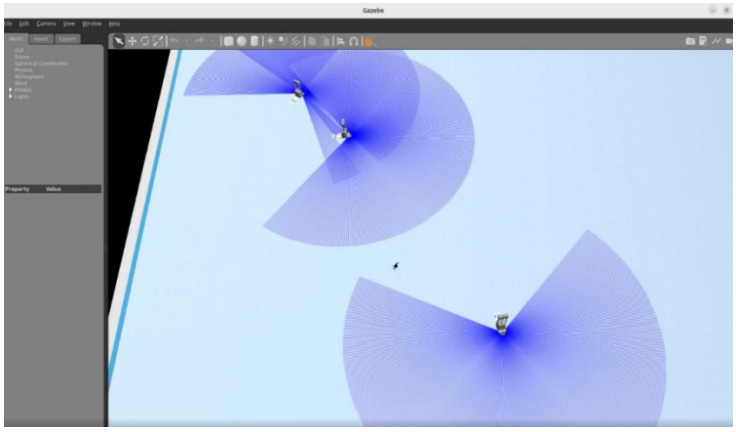


Рисунок 3 –Симуляция многороботной системы в виртуальном складе, где каждый робот функционирует в изолированной среде ROS2

Сравнивались три режима. R1 – централизованная дискретная координация MAPF/CBS, используемая как reference baseline. R2 – децентрализованное исполнение Nav2-only, при котором каждый робот получает только конечную цель и не имеет глобального

механизма согласования с другими агентами. R3 – гибридный режим MAPF/CBS + Fleet Manager + Nav2, где глобальный план преобразуется в waypoint-последовательности и исполняется локальными навигационными средствами. Количественные результаты эталонного режима R1 представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Количественные результаты эталонного режима R1 (MAPF/CBS)

Карта	N	Makespan, такты	SOC	Время планирования, с
A	1	2	3	0,095823
A	2	2	5	0,108520
A	8	4	40	15,709505
B	8	1	16	0,055002

В режиме R2 каждый робот получал индивидуальную целевую точку, а построение траектории и обход препятствий выполнялись средствами Nav2 без внешнего координационного уровня. В свободной среде такой подход сохраняет работоспособность при малой плотности агентов, однако в коридорных сценариях становится чувствительным к встречным потокам, очередям и циклическому ожиданию. Поэтому R2 рассматривается как базовый децентрализованный сценарий, относительно которого оценивается вклад глобальной координации.

Гибридная конфигурация R3 объединяет преимущества R1 и R2. Централизованный планировщик устраняет конфликты на уровне дискретной модели до начала движения, Fleet Manager переносит план в последовательность waypoint-целей, а Nav2 обеспечивает локальное исполнение с учётом непрерывной геометрии среды. Такая схема особенно важна в участках ограниченной пропускной способности: глобальный уровень задаёт порядок прохождения конфликтной зоны, а локальный уровень компенсирует ошибки позиционирования, задержки и малые отклонения траектории. Траектории роботов в гибридном режиме MAPF + Nav2 представлены на рисунке 4.

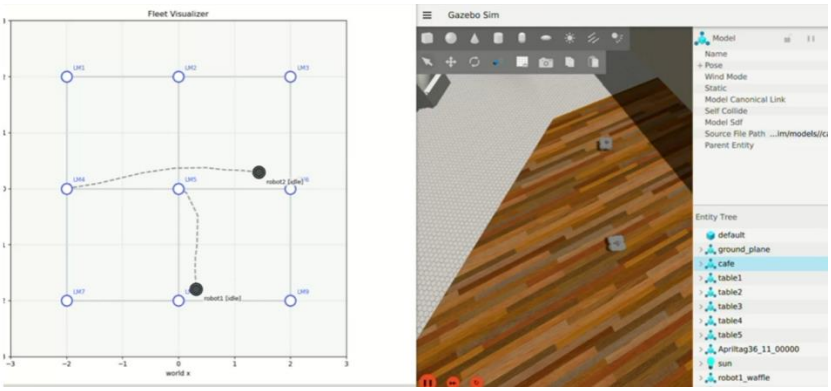


Рисунок 4 – Траектории роботов в гибридном режиме MAPF + Nav2, демонстрирующие согласованное движение

Обсуждение научных результатов

Количественные результаты R1 показывают, что уже на малой дискретной карте увеличение числа агентов с 1 до 8 на карте A приводит к росту времени планирования примерно в 164 раза (с 0,095823 до 15,709505 с), SOC увеличивается с 3 до 40, а makespan - с 2 до 4 тактов. Это подтверждает основное ограничение строгой централизованной координации: она обеспечивает бесконфликтность и глобальную согласованность, но её вычислительная стоимость существенно возрастает при усложнении задачи. Следовательно, практическая ценность гибридной архитектуры заключается не в замене локальной навигации, а в создании координационного слоя, который задаёт порядок движения и передаёт его в устойчивое локальное исполнение.

Заключение

В работе предложена гибридная архитектура управления мобильными роботами, объединяющая централизованное MAPF/CBS-планирование, промежуточный Fleet Manager

и децентрализованное исполнение средствами ROS2/Nav2. В отличие от чисто децентрализованного режима, предложенный подход вводит глобальный механизм предотвращения конфликтов; в отличие от полностью централизованного управления, он сохраняет способность локального уровня адаптироваться к непрерывной среде и текущим отклонениям исполнения.

Формализация задачи через граф G=(V,E), конфликтные ограничения, метрики makespan и SOC, а также кинематическая модель Ackermann-типа устраняют методологическую неопределённость и позволяют воспроизводимо оценивать систему. Экспериментальные результаты эталонного режима R1 показывают рост времени планирования с 0,095823 до 15,709505 с при увеличении числа агентов на карте A с N=1 до N=8; одновременно SOC возрастает с 3 до 40. Эти данные количественно подтверждают, что централизованный уровень полезен для глобальной согласованности, но требует гибридного исполнения при переходе к практическим многороботным сценариям.

Таким образом, разработанная архитектура является обоснованным компромиссом между глобальной оптимизацией и локальной автономностью. Практическое значение работы состоит в воспроизводимом контуре MAPF/CBS – Fleet Manager – Nav2, пригодном для складских и логистических сред с узкими проходами и конфликтными зонами. Дальнейшие исследования должны быть направлены на расширение серии Gazebo/Nav2-запусков, статистическую обработку R2/R3 по метрикам success rate, deadlock rate и D_sum, а также на проверку алгоритма при большем числе агентов и динамических препятствиях.

Список литературы

1. Dai Y. Development of a Fleet Management System for Multiple Robots' Task Allocation Using Deep Reinforcement Learning / Y. Dai, D. Kim, K. Lee // Processes. – 2024. – № 12(12). – P. 2921. https://doi.org/10.3390/pr12122921.
2. Efficient multi-robot path planning in real environments: a centralized coordination system / D.M. Matos et al // Int J Intell Robot Appl. – 2025. – № 9. – P. 217-244. https://doi.org/10.1007/s41315-024-00378-3.
3. Decentralized multi-robot formation control in environments with non-convex and dynamic obstacles based on path planning algorithms / L.E. Ruiz-Fernandez et al // Intel Serv Robotics. – 2025. – № 18. – P. 215-232. https://doi.org/10.1007/s11370-024-00582-x.
4. Bayer J. Decentralized multi-robot exploration under low-bandwidth communications / J. Bayer, J. Faigl // Auton Robot. – 2026. – № 50. – P. 7. https://doi.org/10.1007/s10514-025-10234-3.
5. Consistent batch fusion for decentralized multi-robot cooperative localization / N. Hao et al // Control Theory Technol. – 2024. – № 22. – P. 638-651. https://doi.org/10.1007/s11768-024-00229-3.
6. Niu L. Decentralized Density Control of Multi-Robot Systems Using PDE-Constrained Optimization / L. Niu, G. Notomista // IEEE Robotics and Automation Letters. – 2025. – vol. 10, № 4. – P. 4045-4052. https://doi.org/10.1109/LRA.2025.3548501. https://ieeexplore.ieee.org/document/10910164.
7. Centralization vs. decentralization in multi-robot sweep coverage with ground robots and UAVs / A. Jamshidpey et al // Artif Life Robotics. – 2025. https://doi.org/10.1007/s10015-025-01049-7.
8. Priority-Based Distributed Coordination for Heterogeneous Multi-Robot Systems With Realistic Assumptions / M. Cecchi et al // IEEE Robotics and Automation Letters. – 2021. – vol. 6, № 3. – P. 6131-6138. https://doi.org/10.1109/LRA.2021.3091016.
9. Tahir N. Consensus-based Resource Scheduling for Collaborative Multi-Robot Tasks / N. Tahir, R. Parasuraman // Seventh IEEE International Conference on Robotic Computing (IRC), Laguna Hills, CA, USA. – 2023. – P. 323-330. https://doi.org/10.1109/IRC59093.2023.00059. https://ieeexplore.ieee.org/document/10473544.
10. Comparative Analysis of Centralized and Federated Learning Techniques for Sensor Diagnosis Applied to Cooperative Localization for Multi-Robot Systems / Z. El Mawas et al // Sensors. – 2023. – № 23(17). – P. 7351. https://doi.org/10.3390/s23177351.

Информация о финансировании

Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (Грант №BR31715767 и № AP22685781).

Е.А. Төлешев[1], Қ.М. Абуталипов[1], М.Ж. Куатова[2], П.М. Рахметова[1]*
[1]Satbayev University, 050000, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Сатпаева 22
[2]Академик Ө.А. Жолдасбеков атындағы Механика және машинатану институты,
050010, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Шевченко 28
*e-mail: p.rakhmetova@gmail.com

ОРТАЛЫҚТАНДЫРЫЛҒАН ЖОСПАРЛАУ ЖӘНЕ ОРТАЛЫҚТАНДЫРЫЛМАҒАН НАВИГАЦИЯ НЕГІЗІНДЕ МОБИЛЬДІ РОБОТТАР ФЛОТЫН КООРДИНАЦИЯЛАУДЫҢ ГИБРИДТІ АРХИТЕКТУРАСЫН ӘЗІРЛЕУ

Бұл мақалада мобильді роботтар паркін басқаруға арналған гибридті архитектура ұсынылады және формальдандырылады. Орталықтандырылған MAPF/CBS қабаты тұрақты дискретті қозғалыс жоспарын жасайды, ал орталықсыздандырылған ROS2/Nav2 қабаты Gazebo ортасында үздіксіз орындалуды және жергілікті бейімделуді қамтамасыз етеді. Есептеу күрделілігі мен орындау ауытқуларының артуына сезімтал толық орталықтандырылған схемалардан, сондай-ақ роботтар арасындағы қақтығыстардың алдын алудың жаһандық механизмі жоқ тек Nav2 режимінен айырмашылығы, ұсынылған архитектура аралық флот менеджерін енгізеді. Бұл модуль дискретті жоспарды жол нүктесінің командаларының тізбегіне түрлендіреді, прогресті бақылайды, кідірістерді анықтайды және қозғалыс шарттары бұзылған кезде қайта жоспарлауды бастайды. G=(V,E) графигіндегі мәселенің математикалық тұжырымдамасы тұжырымдалған, шыңдар мен жиектердегі қақтығыс шектеулері, макспан және шығындар қосындысының мақсатты критерийлері көрсетілген және үздіксіз орындау үшін Ackermann типті кинематикалық модель ұсынылған. Тәжірибелік тексеру екі деңгейде жүргізілді: дискретті MAPF/CBS моделінде және ROS2/Gazebo/Nav2 модельдеу ортасында. R1 сілтеме режимі үшін A картасындағы агенттер саны N=1-ден N=8-ге дейін артқан сайын жоспарлау уақыты 0,095823-тен 15,709505 с-қа дейін, SOC 3-тен 40-қа дейін, ал макспан 2-ден 4 циклге дейін артатыны көрсетілді. Алынған нәтижелер орталықтандырылған жоспарды жергілікті бейімделгіш іске асыруға гибридті түрде ауыстыру қажеттілігін растайды және көп роботты жүйенің масштабталуын, беріктігін және қақтығыстарға төзімділігін бағалау үшін қайталанатын құрылымды анықтайды.

Түйін сөздер: *гибридті басқару архитектурасы; көп агентті роботты жүйелер; MAPF; Қақтығысқа негізделген іздеу; ROS2; Nav2; Gazebo; автономды навигация.*

E.A. Tuleshov[1], K.M. Abutalipov[1], M.Zh. Kuatova[3], P.M. Rakhmetova[1]*
[1]Satbayev University, 050000, Republic of Kazakhstan, Almaty, Satpayev St. 22
[2]U. Joldasbekov Institute of Mechanics and Engineering,
050010, Republic of Kazakhstan, Almaty, Shevchenko St. 28
*e-mail: p.rakhmetova@gmail.com

DEVELOPMENT OF A HYBRID COORDINATION ARCHITECTURE FOR A MOBILE ROBOT FLEET BASED ON CENTRALIZED PLANNING AND DECENTRALIZED NAVIGATION

Abstract: *This paper proposes and formalizes a hybrid architecture for controlling a fleet of mobile robots. The centralized MAPF/CBS layer generates a consistent discrete motion plan, while the decentralized ROS2/Nav2 layer ensures continuous execution and local adaptation in a Gazebo environment. Unlike fully centralized schemes, which are sensitive to increasing computational complexity and execution deviations, as well as the Nav2-only mode, which lacks a global mechanism for preventing inter-robot conflicts, the proposed architecture introduces an intermediate Fleet Manager. This module converts the discrete plan into a sequence of waypoint commands, monitors progress, detects delays, and initiates replanning when motion conditions are violated. A mathematical formulation of the problem on a graph G=(V,E) is formulated, conflict constraints on vertices and edges, makespan and sum-of-costs target criteria are specified, and an Ackermann-type kinematic model is presented for continuous execution. Experimental verification was performed at two levels: in a discrete MAPF/CBS model and in the ROS2/Gazebo/Nav2 simulation environment. For the R1 reference mode, it was shown that as the number of agents on map A increases from N=1 to N=8, the planning time increases from 0.095823 to 15.709505 s, the SOC increases from 3 to 40, and the makespan increases from 2 to 4 cycles. The obtained results confirm the need for a hybrid transfer of a centralized plan to a locally adaptive implementation and define a reproducible framework for assessing the scalability, robustness, and conflict tolerance of a multi-robot system.*

Key words: *hybrid control architecture; multi-agent robotic systems; MAPF; Conflict-Based Search; ROS2; Nav2; Gazebo; autonomous navigation.*

Сведения об авторах

Еркебулан Амандыкович Тулешов – кандидат технических наук, ассоциированный профессор кафедры Робототехники и технических средств автоматики, Satbayev University, г. Алматы, Республика Казахстан; e-mail: y.tuleshov@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9146-7137.

Қайсар Мұхтарұлы Абуталипов – магистрант кафедры Робототехники и технических средств автоматики, Satbayev University, г. Алматы, Республика Казахстан; e-mail: kaisar.abutalipovv@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-7972-6620.

Молдир Жангелдиевна Куатова – PhD, ведущий научный сотрудник, Институт механики и машиноведения имени академика У.А. Джолдасбекова, г. Алматы, Казахстан; директор Департамента по научно-инновационной деятельности Международного инженерно-технологического университета, г. Алматы, Республика Казахстан; e-mail: kuatova.moldyr@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7614-6124.

Перизат Маратқызы Рахметова* – PhD, ассоциированный профессор кафедры Робототехники и технических средств автоматики, Satbayev University, г. Алматы, Республика Казахстан; e-mail: p.rakhmetova@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5645-5157.

Авторлар туралы мәліметтер

Еркебұлан Амандыкович Төлешев – Техника ғылымдарының кандидаты, Роботтытехника және автоматиканың техникалық құралдары кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Satbayev University, Алматы қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: y.tuleshov@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9146-7137.

Қайсар Мұхтарұлы Абуталипов – Робототехниканың және техниканың автоматтық құралдары кафедрасының магистранты, Satbayev University, Алматы қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: kaisar.abutalipovv@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-7972-6620.

Мөлдір Жангелдіқызы Қуатова – PhD, Академик Ө.А. Жолдасбеков атындағы Механика және машина жасау институты, Алматы қ., Қазақстан Республикасы; Халықаралық инженерлік-технологиялық университетінің ғылыми және инновациялық қызмет департаментінің директоры, Алматы қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: kuatova.moldyr@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7614-6124.

Перизат Маратқызы Рахметова* – PhD, Робототехниканың және техниканың автоматтық құралдары кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Satbayev University, Алматы қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: p.rakhmetova@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5645-5157.

Information about the authors

Yerkebulan Tuleshov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Robotics and Technical Means of Automation, Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: y.tuleshov@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9146-7137.

Kaisar Abutalipov – masters of Department of Robotics and Technical Means of Automation, Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: kaisar.abutalipovv@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-7972-6620.

Moldir Zhangeldievna Kuatova – PhD, Leading Researcher, RSE on the Right of Economic Management «Institute of Mechanics and Mechanical Engineering named after Academician U.A. Dzholdasbekov» of the Scientific Research Institute of Higher Education of the Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan; Director of the Department of Scientific and Innovative Activities, International University of Engineering and Technology, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: kuatova.moldyr@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7614-6124.

Perizat Rakhmetova* – PhD, Associate Professor of the Department of Robotics and technical means of automation, Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan, e-mail: p.rakhmetova@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5645-5157.

Поступила в редакцию 01.05.2026
Принята к публикации 18.06.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-10

BY 4.0
Check for updates

МРНТИ: 27.35.33

Б.Б. Оразбаев[1], А.Т. Кишубаева[2]*, К.Н. Оразбаева[3], Л.М. Абдибекова[3], Б.Е. Утенова[4]
[1]Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева,
Z01A3D7, Республика Казахстан, г. Астана, ул. К. Сатпаева, 2
[2]Торайгыров Университет,
S14P3K7, Республика Казахстан, г. Павлодар, улица Ломова, 64
[3]Esil university,
Z01A3D8, Республика Казахстан, г. Астана, ул. Жубанова, 7
[4]Атырауский университет нефти и газа,
E01Y6P0, Республика Казахстан, г. Атырау, ул. Баймуханова 45,а
*e-mail: Altynai_999@mail.ru

ЛИНГВИСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО УПРАВЛЕНИЮ ВЫХОДОМ И КАЧЕСТВОМ НЕФТЯНОГО КОКСА

Аннотация: *В работе исследованы проблемы лингвистического моделирования и управления процессами производства качественного кокса в нечеткой среде на основе системы поддержки принятия решений, а также предложены подходы к их решению. Предложен метод синтеза лингвистических моделей сложных технологических систем с нечеткими входными и выходными параметрами, основанный на экспертных знаниях и на использовании приложения Fuzzy Logic Toolbox системы MATLAB. На основе предложенного метода, в виде системы нечеткого вывода, синтезированы лингвистические модели, оценивающие выход кокса и его качественные показатели в процессе замедленного коксования. Построены функции принадлежности входных и выходных параметров процесса замедленного коксования, а также 3D поверхности «входы-выходы», которые позволяют анализировать и принимать решения по управлению процессом производства качественного кокса. На основе синтезированных в данной работе лингвистических моделей, разработанной и опубликованной авторами модели ректификационной колонны установки замедленного коксования, а также эвристического метода принятия решений создана интеллектуализированная система поддержки принятия решений. Приведены и описаны основные интерфейсы созданной системы поддержки принятия решений, реализующие процессы моделирования и принятия решений для эффективного управления процессом производства кокса. Новизна и преимущества полученных результатов заключаются в их возможности моделирования и оптимизации процесса замедленного коксования, а также управления качеством производимого кокса в нечеткой среде. Практическая значимость результатов исследования заключается в том, что они позволяют оперативно управлять процессом производства кокса в реальных условиях, характеризующихся неопределенностью и нечеткостью исходной информации.*

Ключевые слова: *лингвистические модели, нефтяной кокс, процесс замедленного коксования, реакторы коксования, принятия решений.*

Введение

Современные технологические установки нефтеперерабатывающих заводов (НПЗ) относятся к сложным технологическим системам, состоящим из множества взаимосвязанных агрегатов и характеризующихся высокой сложностью, наличием взаимосвязанных параметров и существенной неопределенностью исходной информации. Одним из ключевых технологических установок глубокой переработки нефти в НПЗ является установка замедленного коксования (УЗК), в которой производится качественный нефтяной кокс, являющийся ценным сырьем для электроники, космической техники, металлургии и электрохимической промышленности [1]. В настоящее время на мировом рынке спрос на качественный кокс интенсивно растет, что требует оптимального управления процессом производства качественного кокса, в условиях неопределенности. В этой связи решение проблем моделирования и принятия решений по оптимальному управлению процессом замедленного коксования в условиях неопределенности и нечеткости исходной информации стало весьма актуальной научно-практической задачей НПЗ [2].

©Б.Б. Оразбаев, А.Т. Кишубаева, К.Н. Оразбаева, Л.М. Абдибекова, Б.Е. Утенова, 2026

Некоторые важные параметры процесса замедленного коксования в производственных условиях непосредственно не измеряются. Эти параметры и показатели на практике оцениваются лицом, принимающим решения (ЛПР), которые принимают решение по управлению процессом, экспертами в лингвистической форме, например: «высокая летучесть», «среднее качество кокса», «низкое содержание золы» и т.д. Это делает использование классических методов моделирования не эффективным. В этой связи, для управления такими объектами активно стали развиваться методы интеллектуального моделирования и принятия решений, которые включают: нечеткую логику; лингвистические переменные и экспертные знания [3]. На основе этих методов создаются системы поддержки принятия решений (СППР), позволяющие эффективно управлять сложными процессами в условиях неопределенности и нечеткости данных. Использование лингвистических моделей в таких системах позволяет учитывать опыт и знания ЛПР, специалистов-экспертов, формализуя их в виде правил и логических зависимостей.

Приведем основные результаты литературного анализа по теме данного исследования. Ishibuchi и другие авторы в работе [4] разработали компактные лингвистические модели неформализуемых систем, на основе лингвистических информационных гранул. Проблемы лингвистического моделирования и многоцелевого проектирования лингвистических моделей в нечеткой среде исследованы авторами работ [5, 6]. Kickert в своем исследовании [7] анализировал особенности результатов лингвистического моделирования, а авторы в работе [8, 9] описали типы лингвистических моделей и их применение для решения лингвистических задач. Подходы к разработке лингвистических моделей установки каталитического крекинга на основе методов экспертной оценки исследованы в работе [10]. Однако в проанализированных работах, посвященных вопросам лингвистического моделирования, до сих пор не предложен метод синтеза лингвистических моделей с использованием инструментария нечеткой логики, содержащий конкретные этапы реализации. В связи с этим в данной работе предлагается и используется метод синтеза лингвистических моделей в нечеткой среде, базирующийся на основе экспертных знаний и инструментария Fuzzy Logic Toolbox графической системы MATLAB.

Для эффективного управления процессом производства кокса в нечеткой среде на основе лингвистических моделей необходимо создать СППР, позволяющую поддерживать ЛПР в процессе принятия решений по управлению выходом и качественными показателями производимого кокса. СППР представляет собой компьютерную систему, поддерживающую ЛПР, при моделировании режимов работы управляемого объекта и принятия обоснованного решения по управлению. Эти функции СППР реализуются на основе моделей управляемого объекта, методов принятия решений, базы данных и знаний, модуля логического вывода и интерфейса пользователя.

Общая структура и функциональные блоки СППР описаны в работе [11]. Авторы работ [12] исследовали вопросы применения СППР в промышленности, науке. Triantafyllou в своем исследовании [13] предложил подход к созданию СППР, базирующийся на основе деревьев решений. Sànchez-Marrè в работе [14] привел результаты исследования подходов к созданию интеллектуальных СППР на основе методов искусственного интеллекта. В проанализированных и других известных работах, посвященных созданию СППР, мало освещены вопросы разработки интеллектуализированных СППР (ИССПР) в условиях неопределенности, базирующихся на основе лингвистических моделей управляемого объекта и эвристических методов решения задач принятия решений. Это мотивировало необходимость проведения данного исследования, посвященного разработке ИСППР на основе лингвистических моделей процесса производства качественного кокса и эвристического метода, основанного на модификации принципа Парето оптимальности для нечеткости, который опубликован ранее нами в работе [15].

Процесс замедленного коксования характеризуется сложной нелинейной динамикой и неопределенностью из-за нечеткости параметров. В таких условиях классическая модель:

$$y_j = f(x_1, x_2, \ldots, x_n), j = \overline{1,m},$$

не всегда адекватно описывает исследуемые системы, так как функция f неизвестна и характеризуется неопределенность, нечеткостью.

В этих условиях для адекватного описания используется лингвистическое представление:

$$\tilde{Y} = \mathcal{F}(\tilde{X}),$$

где $\tilde{X} = \{\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \ldots, \tilde{x}_n\}$ – входные переменные; $\tilde{Y}$ –выходные параметры реакторов коксования: выход кокса и его качественные показатели; $\mathcal{F}$– нечеткое отображение.

Целью настоящего исследования является разработка метода синтеза лингвистических моделей объектов в нечеткой среде (на примере производства кокса), на основе которого создается ИСППР для управления выходом и качеством нефтяного кокса.

Условия и методы исследования

Объектом исследования являются реакторы коксования УЗК Атырауского НПЗ. Особенность условий проведения исследования заключается в том, что доступная информация для разработки моделей определения зависимости выхода и качества кокса от входных параметров объекта исследования является нечеткой, представляющей собой экспертные знания. Сбор нечеткой информации от ЛПР, специалистов-экспертов предметной области произведен на основе методов экспертных оценок [16]. Формализация, обработка и использование нечеткой информации, получаемой от экспертов, проведена с использованием методов теории нечетких множеств [2, 15, 17]. При проведении исследования разработки моделей, решения задач принятия решений и создании СППР также использованы теоретические сведения о процессах производства кокса, экспериментально-статистические данные, а также данные технологического регламента УЗК Атырауского НПЗ [18]. Кроме того, для проведения комплексного анализа взаимосвязанных параметров УЗК в работе использованы методы системного анализа интеллектуального анализа данных. Для синтеза разработки моделей плохоформализуемых систем в нечеткой среде с использованием инструментария Fuzzy Logic Toolbox нами предлагается и используется метод синтеза лингвистических моделей.

Методика исследования. Основными этапами предлагаемого метода синтеза лингвистических моделей плохоформализуемых процессов в нечеткой среде являются:

1. На основе методов экспертной оценки выбрать нечеткие входные, режимные параметры плохоформализуемых технологических систем, как УЗК $\tilde{x}_i, i = \overline{1,n}$, влияющих на нечеткие значения выхода продукции и их качественные показатели $\tilde{y}_j, j = \overline{1,m}$.

2. Определение и выбор термов терм-множества $T(X,Y)$, нечетко описывающих нечеткие значения $\tilde{x}_i$ и $\tilde{y}_j$, являющихся лингвистическими переменными: $\tilde{x}_i \in \tilde{A}_i \subset X$, $\tilde{y}_j \in \tilde{B}_j \subset Y$, где $\tilde{A}_i$ и $\tilde{B}_j$ – нечеткие множества, к которым принадлежат входные, выходные лингвистические переменные, X, Y – универсальные множества;

3. С использованием инструментария Fuzzy Logic Toolbox графической системы MATLAB построить функции принадлежностей входных, выходных лингвистических переменных $\mu_{\tilde{A}_i}(\tilde{x}_i)$, $\mu_{\tilde{B}_j}(\tilde{y}_j)$, оценивающих степени принадлежности $\tilde{x}_i$ и $\tilde{y}_j$ к выбранным термам, например в виде гауссово функции:

$$\mu_{\tilde{A}_i}(\tilde{x}_j) = \exp\left(-\frac{(\tilde{x}_j - c)^2}{2\sigma^2}\right), \quad \mu_{\tilde{B}_j}(\tilde{y}_j) = \exp\left(-\frac{(\tilde{y}_j - c)^2}{2\sigma^2}\right) \qquad (1)$$

где c – центр (среднее значение); σ – ширина (разброс); $\tilde{x}_j, \tilde{y}_j$ – входные, выходные лингвистические переменные.

4. На основе экспертных знаний, с помощью методов экспертной оценки, формировать базы нечетких правил и синтезировать лингвистические модели по формуле:

$$R_k: \text{ЕСЛИ } \tilde{x}_1 \in \tilde{A}_1 \text{ И/ИЛИ } \tilde{x}_2 \in \tilde{A}_2, \ldots, \text{И/ИЛИ } \tilde{x}_n \in \tilde{A}_n \; THEN \;\; \tilde{y}_j \in \tilde{B}_j, j = \overline{1,m}. \qquad (2)$$

$R_k, k = \overline{1,K}$ – правило с номером k, $K = T^n$ – общее количество полных нечетких правил, T – количество термов входных лингвистических переменных, n – количество входных, режимных параметров технологической системы.

В редакторе базы правил Fuzzy Logic Toolbox создать полную базу нечетких правил в виде системы нечеткого вывода.

5. На основе базы правил формализуются нечеткие отображения $\tilde{R}_{ij}$, описывающие нечеткие связи между входными $\tilde{x}_i, i = \overline{1,n}$ и выходными $\tilde{y}_j, j = \overline{1,m}$ лингвистическими переменными. Для удобства нечеткие отображения $\tilde{R}_{ij}$ следует формализовать через их функции принадлежности $\mu_{\tilde{R}_{ij}}(\tilde{x}_i, \tilde{y}_j)$.

6. На основе композиционного правила вывода $\tilde{B}_j = \tilde{A}_i \circ \tilde{R}_{ij}$, где $\tilde{A}_i \subset X,\ \tilde{B}_j \subset Y$, а X, Y – универсальные множества, определенные на этапе 2 для каждого терма t из терм-множеств $T(X,Y)$ нечеткое отображение определить декартовым произведением соответствующие универсальные множества: $\tilde{R}_{ij}^t = \tilde{A}_i^t \times \tilde{B}_j^t$.

7. Для проведения расчетов на основе функций принадлежностей нечеткого отображения $\tilde{R}_{ij}$ построить матрицы нечетких отношений $\mu_{\tilde{R}_{ij}}(\tilde{x}_i, \tilde{y}_j)$, которые в общем виде на основе операции пересечения записываются в виде:

$$\mu_{\tilde{R}_{ij}}^t(\tilde{x}_i, \tilde{y}_j) = min\left[\mu_{\tilde{A}_i}^t(x_i), \mu_{\tilde{B}_j}^t(y_j)\right], i = \overline{1,n}, j = \overline{1,m}. \quad (3)$$

8. На основе композиционного правила вывода и матрицы нечетких отношений (3) определить значения функции принадлежностей выходных параметров по формуле:

$$\mu_{\tilde{B}_j}^t(y_j') = \max_{x_i \in X}\{\min[\mu_{\tilde{A}_i}(x_i^*), \mu_{R_{ij}}(\tilde{x}_i, y_j^M)]\}, \quad (4)$$

где x_i^* – нечетко оцененные экспертами значения входных, режимных параметров технологических систем.

Тогда искомое множество, к которому принадлежат текущие значения входных, режимных параметров объекта, определяются по формуле $\mu_{A_i}(x_i^*) = \max_i \mu_{A_i}(x_i)$, т. е. как множество, в котором значения входных, режимных параметров имеют максимальное значение функции принадлежности.

В окне Rule Viewer Fuzzy Logic Toolbox провести нечеткое моделирование различных режимов работы технологической системы, с целью поиска оптимального режима, и визуализировать результаты нечеткого логического вывода.

9. Для дефаззификации результатов, т. е. определения числовых значений выходных параметров y_j^M из множества нечетких решений можно применить метод центра тяжести. В случае строгой формы нормальной функции принадлежности выходного параметра числовое значение результата может быть определено по выражению: $y_j^M = \arg\max_{y_j'} \mu_{B_j}(y_j'), j = \overline{1,m}.$, т. е. аргумент максимального значения функции принадлежности выходных параметров.

10. Проверяется условие адекватности полученной модели: $\min \sum_{j=1}^m \left(y_j^M - y_j^E\right)^2 \le S_R$,

где y_j^M – дефазифицированные значения выходных параметров технологической системы; y_j^E – реальные значения выходных параметров, полученные экспериментальным путем на исследуемой технологической системы; S_R – заданный уровень адекватности. Значения y_j^M и y_j^E должны быть получены при одинаковых значениях $x_i^*, i = \overline{1,n}$.

При выполнении условия адекватности выводятся синтезированные лингвистические модели с необходимой адекватностью. Если условие не выполняется, то начиная с 3-го этапа начинается новая итерация синтеза более адекватных моделей.

В окне Surface Viewer Fuzzy Logic Toolbox построить 3D поверхность “входы-выход” для визуального анализа зависимостей выходных параметров технологической системы от ее входных параметров.

Для решения задачи принятия решений в нечеткой среде также используется предложенный авторами в работе [16] эвристический метод, разработанный путем модификации принципа Парето оптимальности для работы в нечеткой среде.

Результаты исследований

Лингвистические модели, оценивающие нечеткие значения выхода и основных качественных показателей кокса в зависимости от фаззифицированных значений входных параметров реакторов коксования синтезированы на основе предложенного выше метода разработки лингвистических моделей плохоформализуемых процессов в нечеткой среде.

1. На основе автоматизированного метода Дельфи выбраны следующие входные, режимные параметры реакторов коксования: $\tilde{x}_1 \in [20,25]$, т/ч – объем сырья; $\tilde{x}_2 \in [480,490]$,°С и $\tilde{x}_3 \in [5,10]$, кг/см^2 – соответственно температура и давление реактора коксования. Выходными параметрами реакторов коксования, характеризующими качество процесса замедленного коксования, являются: $\tilde{y}_1 \in [15{,}22]$, т/ч – выход кокса; $\tilde{y}_2 \in [0.3, 0.5]$, % – зольность кокса; $\tilde{y}_3 \in [7,12]$, % – летучесть кокса;

2. С участием лица, принимающего решение (ЛПР) и экспертов определены и выбраны следующие термы терм-множества $T(X,Y)$, описывающие нечеткие значения переменных $\tilde{x}_i$ и $\tilde{y}_j$, представленных в виде лингвистических переменных. Для входов:

$\tilde{x}_1$ – объем сырья: низкий (20-21.5) – НЗ; средний (21–24) – СР; высокий (23-25) – ВС;

$\tilde{x}_2$ –температура: низкая (480-483)–НЗ; средняя (482–487)–СР; высокая (486-490)–ВС;

$\tilde{x}_3$ – давление: низкое (5-6.5) – НЗ; среднее (6–8.5) – СР; высокое (8–10) – ВС.

Для выходов:

$\tilde{y}_1$– выход кокса: низкий (15-17) – НЗ; средний (16-20) – СР; высокий (19-22) – ВС;

$\tilde{y}_2$– зольность кокса: низкая (0.3-0.35) – НЗ; средняя (0.33-0.45) – СР; высокая (0.4-0.5) – ВС;

$\tilde{y}_3$– летучесть кокса: низкий (7-8.5) – НЗ; средний (8-10) – СР; высокий (9.5-12) – ВС;

Таким образом $\tilde{A}_i \in (\text{НЗ, СР, ВС})$; $\tilde{B}_j \in (\text{НЗ, СР, ВС}); i = \overline{1,3}, j = \overline{1,3}$, $X = [20-25;\ 480-490;\ 5-10]$, $Y = [15-22; 0.3-0.5; 7-12]$.

3. С использованием Fuzzy Logic Toolbox построены функции принадлежностей (ФП) входных и выходных лингвистических переменных $\mu_{\tilde{A}_i}(\tilde{x}_i)$, $\mu_{\tilde{B}_j}(\tilde{y}_j)$, характеризующие степень принадлежности $\tilde{x}_i$ и $\tilde{y}_j$ к выбранным термам по формуле (1). Полученные результаты приведены на рисунках 1-3 для входных и на рисунках 4-6 для выходных переменных.

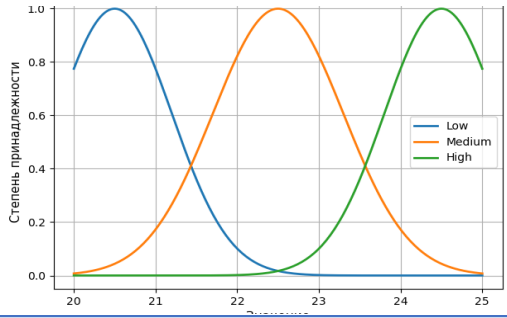


Рисунок 1 – ФП $\tilde{x}_1$ объема сырья

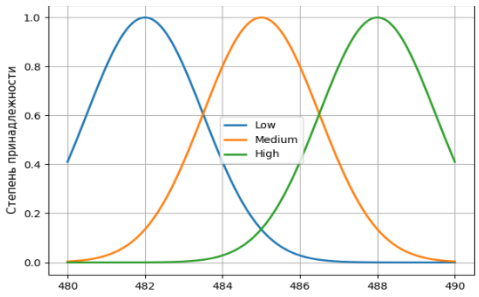


Рисунок 2 – ФП $\tilde{x}_2$ температура

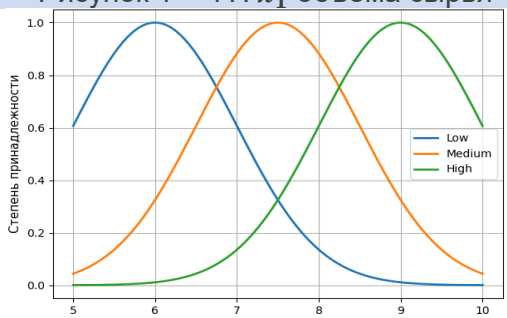


Рисунок 3 – ФП $\tilde{x}_3$ давление

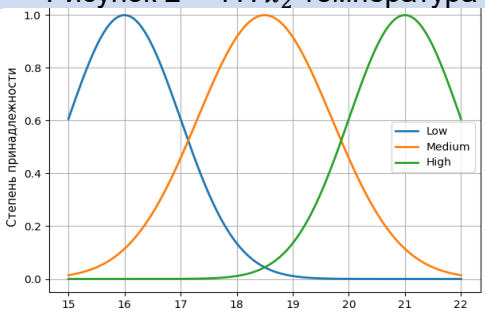


Рисунок 4 – ФП $\tilde{y}_1$ выход кокса

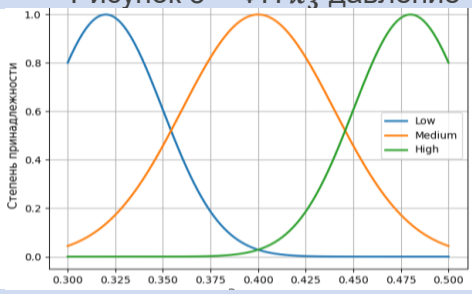


Рисунок 5 – ФП $\tilde{y}_2$ зольность кокса

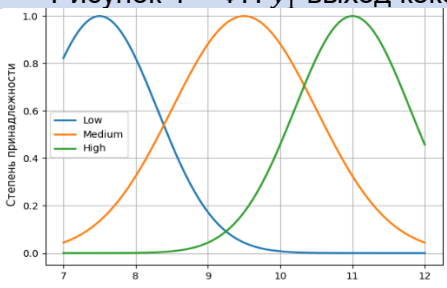


Рисунок 6 – ФП $\tilde{y}_3$ летучесть кокса

4. На основе экспертных знаний сформирована полная база нечетких правил из $3^3 = 27$ правил:

$\boldsymbol{R_1}$: IF $\tilde{\boldsymbol{x}}_1 = \text{НЗ}, \tilde{\boldsymbol{x}}_2 = \text{НЗ}, \tilde{\boldsymbol{x}}_3 = \text{НЗ},$ $\boldsymbol{R_{10}}$: IF $\tilde{\boldsymbol{x}}_1 = \text{СР}, \tilde{\boldsymbol{x}}_2 = \text{НЗ}, \tilde{\boldsymbol{x}}_3 = \text{НЗ},$ $\boldsymbol{R_{19}}$: IF $\tilde{\boldsymbol{x}}_1 = \text{ВС}, \tilde{\boldsymbol{x}}_2 = \text{НЗ}, \tilde{\boldsymbol{x}}_3 = \text{НЗ},$

THEN $\tilde{y}_1 = \text{НЗ}, \tilde{y}_2 = \text{НЗ}, \tilde{y}_3 = \text{ВС}$;	THEN $\tilde{y}_1 = \text{НЗ}, \tilde{y}_2 = \text{НЗ}, \tilde{y}_3 = \text{ВС}$;	THEN $\tilde{y}_1 = \text{СР}, \tilde{y}_2 = \text{СР}, \tilde{y}_3 = \text{ВС}$;
R_2: IF $\tilde{x}_1 = \text{НЗ}, \tilde{x}_2 = \text{НЗ}, \tilde{x}_3 = \text{СР}$, THEN $\tilde{y}_1 = \text{НЗ}, \tilde{y}_2 = \text{СР}, \tilde{y}_3 = \text{ВС}$;	R_{11}: IF $\tilde{x}_1 = \text{СР}, \tilde{x}_2 = \text{НЗ}, \tilde{x}_3 = \text{СР}$, THEN $\tilde{y}_1 = \text{СР}, \tilde{y}_2 = \text{СР}, \tilde{y}_3 = \text{ВС}$;	R_{20}: IF $\tilde{x}_1 = \text{ВС}, \tilde{x}_2 = \text{НЗ}, \tilde{x}_3 = \text{СР}$, THEN $\tilde{y}_1 = \text{СР}, \tilde{y}_2 = \text{СР}, \tilde{y}_3 = \text{СР}$;
R_3: IF $\tilde{x}_1 = \text{НЗ}, \tilde{x}_2 = \text{НЗ}, \tilde{x}_3 = \text{ВС}$, THEN $\tilde{y}_1 = \text{СР}, \tilde{y}_2 = \text{НЗ}, \tilde{y}_3 = \text{СР}$;	R_{12}: IF $\tilde{x}_1 = \text{СР}, \tilde{x}_2 = \text{НЗ}, \tilde{x}_3 = \text{ВС}$, THEN $\tilde{y}_1 = \text{СР}, \tilde{y}_2 = \text{ВС}, \tilde{y}_3 = \text{СР}$;	R_{21}: IF $\tilde{x}_1 = \text{ВС}, \tilde{x}_2 = \text{НЗ}, \tilde{x}_3 = \text{ВС}$, THEN $\tilde{y}_1 = \text{НЗ}, \tilde{y}_2 = \text{ВС}, \tilde{y}_3 = \text{СР}$;
R_4: IF $\tilde{x}_1 = \text{НЗ}, \tilde{x}_2 = \text{СР}, \tilde{x}_3 = \text{НЗ}$ THEN $\tilde{y}_1 = \text{СР}, \tilde{y}_2 = \text{НЗ}, \tilde{y}_3 = \text{СР}$;	R_{13}: IF $\tilde{x}_1 = \text{СР}, \tilde{x}_2 = \text{СР}, \tilde{x}_3 = \text{НЗ}$, THEN $\tilde{y}_1 = \text{СР}, \tilde{y}_2 = \text{НЗ}, \tilde{y}_3 = \text{СР}$;	R_{22}: IF $\tilde{x}_1 = \text{ВС}, \tilde{x}_2 = \text{СР}, \tilde{x}_3 = \text{НЗ}$, THEN $\tilde{y}_1 = \text{ВС}, \tilde{y}_2 = \text{СР}, \tilde{y}_3 = \text{СР}$;
R_5: IF $\tilde{x}_1 = \text{НЗ}, \tilde{x}_2 = \text{СР}, \tilde{x}_3 = \text{СР}$, THEN $\tilde{y}_1 = \text{СР}, \tilde{y}_2 = \text{СР}, \tilde{y}_3 = \text{НЗ}$;	R_{14}: IF $\tilde{x}_1 = \text{СР}, \tilde{x}_2 = \text{СР}, \tilde{x}_3 = \text{СР}$, THEN $\tilde{y}_1 = \text{ВС}, \tilde{y}_2 = \text{СР}, \tilde{y}_3 = \text{СР}$;	R_{23}: IF $\tilde{x}_1 = \text{ВС}, \tilde{x}_2 = \text{СР}, \tilde{x}_3 = \text{СР}$, THEN $\tilde{y}_1 = \text{ВС}, \tilde{y}_2 = \text{ВС}, \tilde{y}_3 = \text{НЗ}$;
R_6: IF $\tilde{x}_1 = \text{НЗ}, \tilde{x}_2 = \text{СР}, \tilde{x}_3 = \text{ВС}$, THEN $\tilde{y}_1 = \text{СР}, \tilde{y}_2 = \text{НЗ}, \tilde{y}_3 = \text{НЗ}$;	R_{15}: IF $\tilde{x}_1 = \text{СР}, \tilde{x}_2 = \text{СР}, \tilde{x}_3 = \text{ВС}$, THEN $\tilde{y}_1 = \text{ВС}, \tilde{y}_2 = \text{ВС}, \tilde{y}_3 = \text{НЗ}$;	R_{24}: IF $\tilde{x}_1 = \text{ВС}, \tilde{x}_2 = \text{СР}, \tilde{x}_3 = \text{ВС}$, THEN $\tilde{y}_1 = \text{ВС}, \tilde{y}_2 = \text{ВС}, \tilde{y}_3 = \text{НЗ}$;
R_7: IF $\tilde{x}_1 = \text{НЗ}, \tilde{x}_2 = \text{ВС}, \tilde{x}_3 = \text{НЗ}$, THEN $\tilde{y}_1 = \text{ВС}, \tilde{y}_2 = \text{СР}, \tilde{y}_3 = \text{НЗ}$;	R_{16}: IF $\tilde{x}_1 = \text{СР}, \tilde{x}_2 = \text{ВС}, \tilde{x}_3 = \text{НЗ}$, THEN $\tilde{y}_1 = \text{ВС}, \tilde{y}_2 = \text{НЗ}, \tilde{y}_3 = \text{НЗ}$;	R_{25}: IF $\tilde{x}_1 = \text{ВС}, \tilde{x}_2 = \text{ВС}, \tilde{x}_3 = \text{НЗ}$, THEN $\tilde{y}_1 = \text{ВС}, \tilde{y}_2 = \text{СР}, \tilde{y}_3 = \text{НЗ}$;
R_8: IF $\tilde{x}_1 = \text{НЗ}, \tilde{x}_2 = \text{ВС}, \tilde{x}_3 = \text{СР}$, THEN $\tilde{y}_1 = \text{ВС}, \tilde{y}_2 = \text{СР}, \tilde{y}_3 = \text{НЗ}$;	R_{17}: IF $\tilde{x}_1 = \text{СР}, \tilde{x}_2 = \text{ВС}, \tilde{x}_3 = \text{СР}$, THEN $\tilde{y}_1 = \text{ВС}, \tilde{y}_2 = \text{СР}, \tilde{y}_3 = \text{НЗ}$;	R_{26}: IF $\tilde{x}_1 = \text{ВС}, \tilde{x}_2 = \text{ВС}, \tilde{x}_3 = \text{СР}$, THEN $\tilde{y}_1 = \text{ВС}, \tilde{y}_2 = \text{ВС}, \tilde{y}_3 = \text{НЗ}$;
R_9: IF $x_1 = \text{НЗ}, x_2 = \text{ВС}, x_3 = \text{ВС}$, THEN $\tilde{y}_1 = \text{СР}, \tilde{y}_2 = \text{ВС}, \tilde{y}_3 = \text{НЗ}$;	R_{18}: IF $\tilde{x}_1 = \text{СР}, \tilde{x}_2 = \text{ВС}, \tilde{x}_3 = \text{ВС}$, THEN $\tilde{y}_1 = \text{ВС}, \tilde{y}_2 = \text{ВС}, \tilde{y}_3 = \text{НЗ}$;	R_{27}: IF $\tilde{x}_1 = \text{ВС}, \tilde{x}_2 = \text{СР}, \tilde{x}_3 = \text{ВС}$, THEN $\tilde{y}_1 = \text{ВС}, \tilde{y}_2 = \text{ВС}, \tilde{y}_3 = \text{НЗ}$.

Таким образом, лингвистические модели имеют стандартную форму Мамдани и сформированы по общей формуле:

$$R_k: \text{ЕСЛИ } \tilde{x}_1 \in \tilde{A}_1 \text{ И } \tilde{x}_2 \in \tilde{A}_2 \text{ И } \tilde{x}_3 \in \tilde{A}_3 \, TO \; y_1 = B_1^k, y_2 = B_2^k, y_3 = B_3^k, k = \overline{1,27}. \quad (5)$$

В редакторе базы правил Fuzzy Logic Toolbox сформированная полная база нечетких правил создана в виде системы нечеткого вывода.

Детализируем методику синтеза нечеткой модели.

Тип системы нечеткого вывода. Нечеткие модели оценки выхода и основных качественных показателей кокса разработаны на основе аппарата нечеткой логики с использованием системы нечеткого вывода Мамдани, реализованной в среде MATLAB Fuzzy Logic Toolbox. Выбор системы Мамдани обусловлен тем, что она обеспечивает наиболее естественное представление экспертных знаний в виде лингвистических правил типа «ЕСЛИ–ТО», хорошо интерпретируется специалистами-технологами и широко применяется при моделировании сложных плохоформализуемых технологических процессов.

Параметры функции принадлежности. При построении функций принадлежности гауссового типа для термов, описывающих нечеткие входные и выходные параметры, их параметры определяются следующим образом:

c – центр, соответствующий максимальному значению лингвистического терма, на основе экспертной информации, операторы-технологи определили максимальное числовое значение параметров процесса, соответствующее каждому терму;

σ – ширина, определяющая степень перекрытия соседних функций принадлежности, по формуле $\sigma = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{m}$, где $x_{max}, x_{\min}$ – соответственно максимальное и минимальное

значение каждого параметра; m – количество термов, нечетко описывающие каждый параметр, в нашем случае $m = 3$.

Способ дефаззификации. Дефаззификация, т.е. преобразование результирующего нечеткого множества $y_j, j = \overline{1,3}$ в четкие числовые значения, выполнена методом центра тяжести (Centroid), который является стандартным методом дефаззификации в системах Мамдани и обеспечивает получение устойчивых и физически интерпретируемых результатов. При этом четкое значение выходной переменной вычислялось по выражению: $y_j^* = \frac{\int y_j \mu(y_j)\, dy_j}{\int \mu(y_j)\, dy_j}$.

Принципы формирования базы правил. База знаний сформирована совместно с экспертами-технологами на основе опыта эксплуатации УЗК, физико-химических закономерностей процесса коксования и анализа производственных данных. Так как каждая из трех входных переменных описывается тремя лингвистическими термами, полная база содержит $N = 3^3 = 27$, что соответствует полной комбинации всех возможных состояний процесса.

База правил формировалась совместно с операторами-технологами УЗК по следующим принципам:

– увеличение температуры способствует росту выхода кокса;

– чрезмерное давление ухудшает качество кокса;

– увеличение подачи сырья повышает производительность лишь до определенного предела;

– оптимальные значения температуры и давления обеспечивают минимальную зольность и летучесть кокса;

– каждое правило отражает реальные технологические закономерности процесса замедленного коксования.

Обоснование выбранных диапазонов входных и выходных переменных. На основе автоматизированного метода Дельфи с участием операторов-технологов УЗК были определены наиболее информативные входные параметры, определяющие качество работы реакторов коксования. Указанные диапазоны изменения входных и выходных параметров определены с учетом технологического режима работы УЗК и согласованы с действующими требованиями и нормативами УЗК Атырауского НПЗ.

Формирование экспертной базы правил производилось на основе автоматизированного метода Дельфи, который представляет собой метод сбора и обработки экспертных оценок, в которой привычные итерации анонимного анкетирования проводятся через специализированное программное обеспечение и возможности интернет связи. При этом использование IT технологии в расчете и анализе данных, исключает проблему конформизма экспертов, обеспечивает математическую точность. В экспертной оценки участвовали 8 экспертов (4 опытных операторы-технологи, управляющие режимами работы УЗК, 2 специалиста заводской лаборатории, начальник УЗК и 1 ученый-специалист, занимающийся моделированием и оптимизацией процесс замедленного коксования). Согласованность экспертных знаний в каждом туре экспертной оценки проверялась путем автоматизированного расчета коэффициента конкордации Кендалла. Согласованность мнений экспертов достигнута после 6-го тура. При этом рассчитанный коэффициент конкордации, оценивающий согласованность мнений экспертов, составил 0.97.

5. На основе базы правил построены нечеткие отображения $\tilde{R}_{ij}$, описывающие нечеткие связи между входными $\tilde{x}_i, i = \overline{1,3}$ и выходными $\tilde{y}_j, j = \overline{1,3}$ лингвистическими переменными. Формализация нечетких отображений выполнена с использованием функций принадлежности $\mu_{\tilde{R}_{ij}}(\tilde{x}_i, \tilde{y}_j)$:

6. На основе композиционного правила вывода $\tilde{B}_j = \tilde{A}_i \circ \tilde{R}_{ij}$, где $\tilde{A}_i \subset X$, $\tilde{B}_j \subset Y$, а X, Y – универсальные множества, определенные на этапе 2 для каждого терма $t = \overline{1,3}$ из терм-множеств $T(X, Y)$ нечеткое отображение определено декартовым произведением соответствующих универсальных множеств $\tilde{R}_{ij}^t = \tilde{A}_i^t \times \tilde{B}_j^t$.

7. Для проведения расчетов на основе функций принадлежностей нечеткого отображения $\tilde{R}_{ij}$ построена матрица нечетких отношений $\mu_{\tilde{R}_{ij}}(\tilde{x}_i, \tilde{y}_j)$, которая в общем виде на основе операции пересечения записывается в виде:

$$\mu^t_{\tilde{R}_{ij}}(\tilde{x}_i, \tilde{y}_j) = min\left[\mu^t_{\tilde{A}_i}(x_i), \mu^t_{\tilde{B}_j}(y_j)\right], t = \overline{1,3}, i = \overline{1,3}, j = \overline{1,3}. \quad (5)$$

8. На основе композиционного правила вывода и матрицы нечетких отношений (5) определены значения функций принадлежностей выходных параметров по формуле (4).

Затем в окне Rule Viewer Fuzzy Logic Toolbox проведено нечеткое моделирование различных режимов работы и определены оптимальные режимы работы реакторов коксования с учетом плана производства и рыночного спроса на объём и на качество нефтяного кокса.

9. Дефаззификация результатов, из множества нечетких решений реализована в Fuzzy Logic Toolbox методом центра тяжести.

10. На основе критерия оценки адекватности проверен и обеспечен необходимый уровень адекватности модельных результатов с их реальными значения не выше 3%.

Результаты моделирования. В таблице 1 приведены результаты сравнения дефазифицированных модельных и реальных значений выхода кокса, его зольности и летучести при одинаковых значениях входных параметров реакторов коксования.

Таблица 1 – Сравнение средних модельных и реальных значений выходных параметров реакторов коксования от их входных параметров

№ п/п	Наименование выходных параметров	Значения, полученные на основе модели	Реальные значения, полученные на исследуемой УЗК
1	y_1 – выход кокса, т/ч	21.500	20,950
2	y_2 – зольность кокса, %	0.320	0,328
3	y_3 – летучесть кокса; %	7.500	7.650

Примечание: Сравниваемые значения выходных параметров реакторов коксования получены при одинаковых значениях их входных параметров

Методика расчета ошибки. Для каждого выходного параметра рассчитывались:

1. Абсолютная ошибка: $\Delta_i = | y_i^{\text{мод}} - y_i^{\text{реал}} |$, где $y_i^{\text{мод}}$ – значение выходного параметра, полученное по модели; $y_i^{\text{реал}}$ – реальные значения выходного параметра УЗК.

2. Относительная ошибка $\delta_i = \frac{|y_i^{\text{мод}} - y_i^{\text{реал}}|}{y_i^{\text{реал}}} \times 100\%$, показывающая насколько результат моделирования отличается от фактического значения в процентах.

Для оценки адекватности разработанной нечеткой модели на основе данных таблицы 1 проведено сравнение расчетных значений выходных параметров реакторов коксования с экспериментальными данными, полученными на УЗК Атырауского НПЗ при одинаковых значениях входных технологических параметров. Точность моделирования оценивалась по абсолютной и относительной ошибкам. Абсолютная ошибка определялась как модуль разности между модельным и реальным значениями выходного параметра, а относительная ошибка – как отношение абсолютной ошибки к экспериментальному значению, выраженное в процентах. Полученные результаты показали, что относительная ошибка определения выхода кокса составила 2,63 %, зольности кокса – 2,44%, летучести кокса – 1,96%.

3. Средняя относительная ошибка модели составила $\delta_{\text{ср}} = \frac{2.63+2.44+1.96}{3} = 2.34\%$, что свидетельствует о достаточной точности и адекватности разработанной нечеткой модели для прогнозирования качественных показателей процесса замедленного коксования.

В окне Surface Viewer Fuzzy Logic Toolbox построены 3D поверхности “входы-выход” по результатам моделирования для визуального анализа зависимостей выходных параметров технологической системы от ее входных параметров. Построенные 3D поверхности на основе формированной базы правил приведены на рисунке 7.

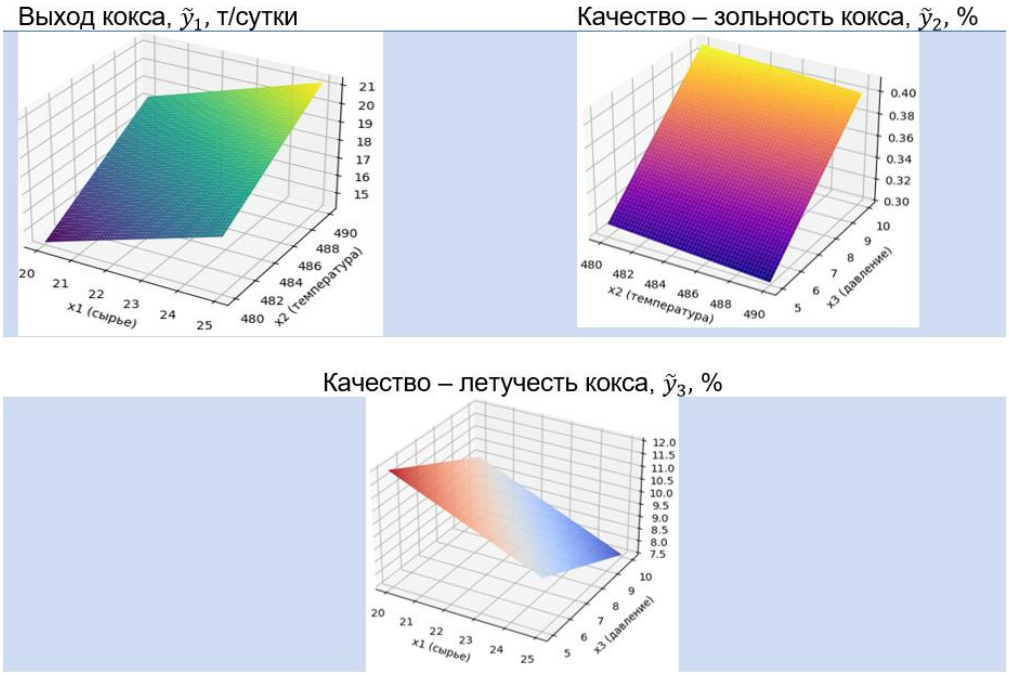


Рисунок 7 – Поверхность “входы-выходы” в окне Surface Viewer Fuzzy Logic Toolbox

Описание программной реализации СППР. Главное окно ИСППР для управления процессом производства нефтяного кокса содержит горизонтальную строку меню, расположенную в верхней части интерфейса систем. В строке меню представлены следующие разделы:

– «Схемы», предназначено для выбора общей технологической схемы УЗК или схем ее основных агрегатов;

– «Модели», содержит подменю «Управляющие воздействия»; «Расчет и просмотр результатов» и «Принятие решений»;

– «Протокол», предназначенный для заполнения и ведения режимного листа УЗК;

– «Аварийные ситуации», предназначены для просмотра возможных ситуаций на УЗК;

– «Нормы», позволяют вывести на экран монитора различные нормы производства;

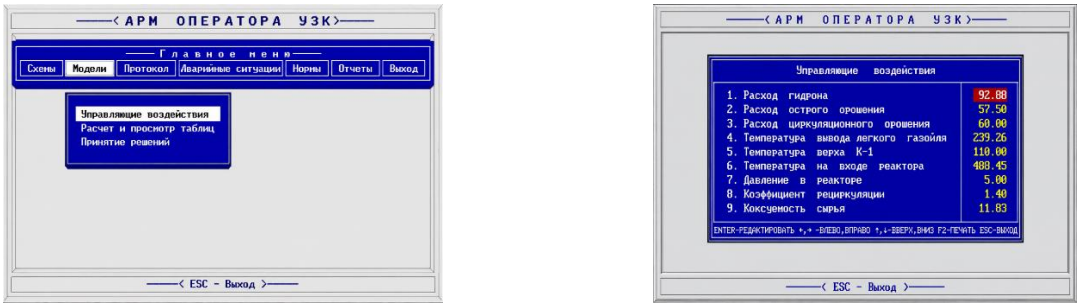
– «Отчеты», позволяют вывести на экран монитора и принтер отчет о переработке сырья и полученных продуктов по утвержденной форме.

В подменю «Модели» программно реализован разработанный пакет моделей УЗК, включающий модели печей первичного и вторичного подогрева П-1–П-4 основной ректификационной колонны К-1 УЗК и модели реакторов коксования Р-1 – Р-4. Здесь можно выбрать значения управляющих воздействий, моделировать режимы работы УЗК и вывести результаты моделирования (рисунок 8 а).

При выборе пункта «Управляющие воздействия» из меню «Модели» открывается наименование входных, режимных параметров, используемых в качестве управляющих воздействий для управления режимами работы УЗК и заданные их средние значения. Здесь предусмотрена возможность редактирования их значений (рис. 8 b).

После выбора необходимых значений управляющих воздействий нажимая на пункт «Расчет и просмотр таблиц» можно вывести на экран результаты моделирования в виде таблиц материального баланса и теплового баланса (рис. 9 а).

Пункт «Принятие решений» меню «Модели» на основе моделей позволяет оказать поддержку процессов подготовки и принятия решений. В данном пункте в диалоговом режиме «ЛПР-компьютер» решается задача принятия решений в нечеткой среде по управлению процессом производства качественного кокса. При нажатии на «Принятие решений» на экран монитора выводится интерфейс «Система принятия решений», предназначенный для поддержки процесса принятия решений для управления процессом производства кокса и других продуктов УЗК (рис. 10а).



a) b)

a) для моделирования режимов работы УЗК, просмотра результатов моделирования и выбора процедуры принятия решений на основе моделей и b) для просмотра, изменения значений управляющих воздействий

Рисунок 8 – Интерфейсы СППР



Рисунок 9 – Интерфейс АРМ оператора УЗК для вывода материального баланса УЗК по результатам моделирования

На рисунке 10 приведен интерфейс СППР по контролю и управлению выходом и качественными показателями кокса, определяемые на основе синтезированных лингвистических моделей.



Рисунок 10 – Интерфейсы СППР для управления выходом, летучестью и зольностью кокса

Обсуждение результатов исследования

Предложенный метод разработки лингвистических моделей плохоформализуемых процессов в нечеткой среде позволяет на основе экспертных знаний формировать лингвистические модели в виде полной базы нечетких правил, представляющих собой систему нечеткого вывода.

Основные технологические закономерности сформированной базы правил заключаются в том, что:

– повышение температуры приводит к увеличению выхода кокса и снижению содержания летучих веществ, тем самым улучшая его качество;

– при повышении давления зольность кокса увеличивается, т.е. его качество ухудшается;

– увеличение сырья приводит к повышению выхода кокса, а ее качество ухудшается.

На основе анализа построенной 3D поверхности «входы-выходы» можно отметить, что

– выход кокса растет при повышении температуры и при росте объема сырья и немного падает при повышении давления;

– зольность кокса увеличивается при повышении давления, а при повышении температуры зольность уменьшается;

– летучесть кокса снижается при росте температуры и при увеличении объема сырья,

Результаты исследования подтверждают высокую эффективность применения лингвистических моделей для управления процессами производства кокса. Основными преимуществами лингвистических моделей являются:

– возможность работы в условиях неопределенности и нечеткости данных за счет учета нечеткой информации, субъективной оценки, представляющей собой знания, опыт и интуицию ЛПР и экспертов;

– интеграция экспертных знаний на основе продукционной модели представления знании структурой «ЕСЛИ … –ТО …..» делает модели интерпретируемыми.

– гибкость и адаптивность лингвистических моделей, так как они могут легко модифицироваться при изменении условий.

К числу ограничений лингвистических моделей относятся: зависимость от качества экспертных оценок; сложность настройки функций принадлежности и ограниченная универсальность моделей.

Для оптимизации режимов работы УЗК, например, для максимизации выхода нефтяного кокса, необходимо с помощью клавиш ↑ или ↓ переместить выделение (красную рамку) к диаграмме «Кокс», после чего нажать клавишу X (максимизация) (рис. 10). В этом случае с использованием соответствующего алгоритма максимизируется данный критерий, при этом ограничения по другим критериям и показателям контролируются.

Заключение

Исследованы основные проблемы синтеза лингвистических моделей и создания системы принятия решений по управлению выходом и качеством нефтяного кокса в условиях неопределенности, а также предложены подходы к их решению. В результате проведенных исследований получены следующие основные результаты:

– на основе системного подхода, методов экспертной оценки и теорий нечетких множеств предложен метода синтеза лингвистических моделей плохоформализуемых процессов в нечеткой среде с использованием инструментария Fuzzy Logic Toolbox системы MATLAB;

– с использованием предложенного метода синтезированы лингвистические модели оценки выхода и качественных показателей кокса в нечеткой среде в виде полной базы нечетких правил;

– на основе синтезированных моделей построены функции принадлежности входных, выходных параметров реакторов коксования УЗК и поверхности «входы-выходы», визуализирующие зависимость выхода и качественных показателей кокса от входных, режимных параметров реакторов коксования;

– на основе разработанных моделей, эвристических методов решения задач принятия решений создана СППР для управления процессом производства качественного кокса, приведены и кратко описаны ее основные интерфейсы, позволяющие моделировать и принимать решения по управлению процессом производства кокса.

Можно заключить, что лингвистические модели могут быть эффективным инструментом для описания сложных технологических процессов в условиях неопределенности, а использование методов экспертных оценок и нечеткой логики позволяет формализовать экспертные знания и повысить точность управления в нечеткой среде. Предложенные методы обеспечивают эффективное решение задач управления процессом производства качественного кокса.

Список литературы

1. Карабасова Н.А. Анализ и прогнозирование процесса коксования нефтяных остатков Атырауского YGP / Н.А. Карабасова, Ф.Б. Кайрлиева // Вестник нефтегазовой отрасли Казахстана. – 2025. – Том 7, № 2. – P. 96-105. https://doi.org/10.54859/kjogi108825.
2. Methods for Modeling and Optimizing the Delayed Coking Process in a Fuzzy Environment / B. Orazbayev et al // Processes. – 2023. – № 11, vol. 450. – P. 1-19. https://doi.org/10.3390/pr11020450.
3. Witt A. Linguistic Modeling of Information and Markup Languages. In Contributions to Language Technology / A. Witt, D. Metzing // Springer Dordrecht. – 2020. – P. 33-48. https://doi.org/10.1007/978-90-481-3331-4.
4. Ishibuchi H. Design of Compact Linguistic Models. In: Classification and Modeling with Linguistic Information Granules / H. Ishibuchi, T. Nakashima, M. Nii // Advanced Information Processing. Springer, Berlin, Heidelberg. – 2020. – P. 181-198. https://doi.org/10.1007/3-540-26875-8_9.
5. Favre J.M. Modeling the Linguistic Architecture of Software Products / J.M. Favre, Lämmel R., Varanovich A. // Model Driven Engineering Languages and Systems. MODELS 2012. Lecture Notes in Computer Science, Springer, Berlin, Heidelberg. – 2022. – Vol 7590. – P. 151-167. https://doi.org/10.1007/978-3-642-33666-9_11.
6. Ishibuchi H. Multi-Objective Design of Linguistic Models. In: Classification and Modeling with Linguistic Information Granules. Advanced Information Processing / H. Ishibuchi // Springer, Berlin, Heidelberg. – 2021. https://doi.org/10.1007/3-540-26875-8_6.
7. Kickert W.J.M. Towards an Analysis of Linguistic Modelling / W.J.M. Kickert et al // Current Topics in Cybernetics and Systems. Springer, Berlin, Heidelberg. – 2022. – P. 369-371. https://doi.org/10.1007/978-3-642-93104-8_232.
8. Lukach M.O. Types of linguistic models and their application to solving linguistic tasks / M.O. Lukach // Lviv. – 2023. – 47 p.
9. Поликарпова О.Н. О типах лингвистического моделирования / О.Н. Поликарпова // Вестник Казанского гос. энергетического университета. – 2025. – Том 57, № 3. – С. 45-67.
10. Development and Synthesis of Linguistic Models for Catalytic Cracking Unit in a Fuzzy Environment / B. Orazbayev et al // Processes. – 2024. – № 12. – P. 1-22. https://doi.org/10.3390/pr12081543.
11. Садовникова Н.П. Системы поддержки принятия решений / Н.П. Садовникова, Д.С. Парыгин, М.В. Щербаков – ВолгГТУ. –Волгоград, 2021. –108 с.
12. Gupta N. Decision Support Systems for Industrial and Scientific Applications / N. Gupta, J.D.D. Roman // Springer Cham. – 2026. – 308 p. https://doi.org/10.1007/978-3-031-89700-9.
13. Decision Support Systems and Decision Trees: An Overview / S.A. Triantafyllou // Artificial Intelligence Algorithm Design for Systems. CSOC 2024. Lecture Notes in Networks and Systems, Springer, Cham. – 2024. – Vol. 1120. – P. 51-59. https://doi.org/10.1007/978-3-031-70518-2_5.
14. Sànchez-Marrè M. Intelligent Decision Support Systems / M. Sànchez-Marrè // Springer Int. Publ. – 2022. – 457 p.
15. Decision Making for Control of the Gasoline Fraction Hydrotreating Process in a Fuzzy Environment / B. Orazbayev et al // Processes. – 2024. – № 12. – P. 669. https:// doi.org/10.3390/pr12040669.
16. Krivonogov A.A. Application of the Method of Expert Assessments in Determining the Level of Criticality of the Information Security Vulnerability of Smart Contracts / A.A. Krivonogov, Y.N. Philippovich, S.A. Kesel // Software Engineering Application in Systems Design. CoMeSySo 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, Springer, Cham. – 2023. – Vol 596. – P. 512-530. https://doi.org/10.1007/978-3-031-21435-6_45.
17. Li F. Introduction to Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy Inference Systems / F. Li, Q. Shen // In: Fuzzy Rule-Based Inference. Springer, Singapore. – 2024. – P. 1-15. https://doi.org/10.1007/978-981-97-0491-0_1.
18. Сулейменов Е.Т. Технологический регламент установки замедленного коксования / Е.Т. Сулейменов, Ж.Н. Тулеуов. – Атырау: Изд-во Атырауского университета нефти и газа. – 2023, 118 с.

References

1. Karabasova N.A. Analiz i prognozirovanie protsessa koksovaniya neftyanykh ostatkov Atyrauskogo YGP / N.A. Karabasova, F.B. Kairlieva // Vestnik neftegazovoi otrasli Kazakhstana. – 2025. – Tom 7, № 2. – R. 96-105. https://doi.org/10.54859/kjogi108825. (In Russian).
2. Methods for Modeling and Optimizing the Delayed Coking Process in a Fuzzy Environment / B. Orazbayev et al // Processes. – 2023. – № 11, vol. 450. – R. 1-19. https://doi.org/10.3390/pr11020450. (In English).
3. Witt A. Linguistic Modeling of Information and Markup Languages. In Contributions to Language Technology / A. Witt, D. Metzing // Springer Dordrecht. – 2020. – R. 33-48. https://doi.org/10.1007/978-90-481-3331-4. (In English).
4. Ishibuchi H. Design of Compact Linguistic Models. In: Classification and Modeling with Linguistic Information Granules / H. Ishibuchi, T. Nakashima, M. Nii // Advanced Information Processing. Springer, Berlin, Heidelberg. – 2020. – R. 181-198. https://doi.org/10.1007/3-540-26875-8_9. (In English).
5. Favre J.M. Modeling the Linguistic Architecture of Software Products / J.M. Favre, Lämmel R., Varanovich A. // Model Driven Engineering Languages and Systems. MODELS 2012. Lecture Notes in Computer Science, Springer, Berlin, Heidelberg. – 2022. – Vol 7590. – R. 151-167. https://doi.org/10.1007/978-3-642-33666-9_11. (In English).
6. Ishibuchi H. Multi-Objective Design of Linguistic Models. In: Classification and Modeling with Linguistic Information Granules. Advanced Information Processing / H. Ishibuchi // Springer, Berlin, Heidelberg. – 2021. https://doi.org/10.1007/3-540-26875-8_6. (In English).
7. Kickert W.J.M. Towards an Analysis of Linguistic Modelling / W.J.M. Kickert et al // Current Topics in Cybernetics and Systems. Springer, Berlin, Heidelberg. – 2022. – R. 369-371. https://doi.org/10.1007/978-3-642-93104-8_232. (In English).
8. Lukach M.O. Types of linguistic models and their application to solving linguistic tasks / M.O. Lukach // Lviv. – 2023. – 47 p. (In English).
9. Polikarpova O.N. O tipakh lingvisticheskogo modelirovaniya / O.N. Polikarpova // Vestnik Kazanskogo gos. ehnergeticheskogo universiteta. – 2025. – Tom 57, № 3. – S. 45-67. (In Russian).
10. Development and Synthesis of Linguistic Models for Catalytic Cracking Unit in a Fuzzy Environment / B. Orazbayev et al // Processes. – 2024. – № 12. – R. 1-22. https://doi.org/10.3390/pr12081543. (In English).
11. Sadovnikova N.P. Sistemy podderzhki prinyatiya reshenii / N.P. Sadovnikova, D.S. Parygin, M.V. Shcherbakov – VolgGTU. –Volgograd, 2021. –108 s. (In Russian).
12. Gupta N. Decision Support Systems for Industrial and Scientific Applications / N. Gupta, J.D.D. Roman // Springer Cham. – 2026. – 308 p. https://doi.org/10.1007/978-3-031-89700-9. (In English).
13. Decision Support Systems and Decision Trees: An Overview / S.A. Triantafyllou // Artificial Intelligence Algorithm Design for Systems. CSOC 2024. Lecture Notes in Networks and Systems, Springer, Cham. – 2024. – Vol. 1120. – R. 51-59. https://doi.org/10.1007/978-3-031-70518-2_5. (In English).
14. Sànchez-Marrè M. Intelligent Decision Support Systems / M. Sànchez-Marrè // Springer Int. Publ. – 2022. – 457 p. (In English).
15. Decision Making for Control of the Gasoline Fraction Hydrotreating Process in a Fuzzy Environment / B. Orazbayev et al // Processes. – 2024. – № 12. – R. 669. https:// doi.org/10.3390/pr12040669. (In English).
16. Krivonogov A.A. Application of the Method of Expert Assessments in Determining the Level of Criticality of the Information Security Vulnerability of Smart Contracts / A.A. Krivonogov, Y.N. Philippovich, S.A. Kesel // Software Engineering Application in Systems Design. CoMeSySo 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, Springer, Cham. – 2023. – Vol 596. – R. 512-530. https://doi.org/10.1007/978-3-031-21435-6_45. (In English).
17. Li F. Introduction to Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy Inference Systems / F. Li, Q. Shen // In: Fuzzy Rule-Based Inference. Springer, Singapore. – 2024. – R. 1-15. https://doi.org/10.1007/978-981-97-0491-0_1. (In English).
18. Suleimenov E.T. Tekhnologicheskii reglament ustanovki zamedlennogo koksovaniya / E.T. Suleimenov, Zh.N. Tuleuov. – Atyrau: Izd-vo Atyrauskogo universiteta nefti i gaza. – 2023, 118 s. (In Russian).

Б.Б. Оразбаев[1], А.Т. Кишубаева[2]*, К.Н. Оразбаева[3], Л.М. Абдибекова[3], Б.Е. Утенова[4]
[1]Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
Z01A3D7, Қазақстан Республикасы, Астана қ., Қ. Сатпаев к-сі, 2
[2]Торайғыров Университет,
S14P3K7, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ., Ломов к-сі, 64
[3]Esil university,
Z01A3D8, Қазақстан Республикасы, Астана қ., Жубанов к-сі, 7
[4]Атырау мұнай және газ университеті,
E01Y6P0, Қазақстан Республикасы, Атырау қ., Баймуханов к-сі, 45,а
*e-mail: Altynai_999@mail.ru

МҰНАЙ КОКСЫ ШЫҒЫМЫ МЕН САПАСЫН БАСҚАРУҒА АРНАЛҒАН ЛИНГВИСТИКАЛЫҚ МОДЕЛЬДЕР МЕН ШЕШІМ ҚАБЫЛДАУДЫ ҚОЛДАУ ЖҮЙЕСІ

Мақалада шешім қабылдауды қолдау жүйесіне негізделген айқын емес ортада жоғары сапалы кокс өндіру процестерін лингвистикалық модельдеу және басқару мәселелері қарастырылады және оларды шешу тәсілдері ұсынылады. Эксперттік білімге және MATLAB жүйесінің Fuzzy Logic Toolbox қосымшасын пайдалануға негізделген, айқын емес кіріс және шығыс параметрлері бар күрделі технологиялық жүйелердің лингвистикалық модельдерін синтездеу тәсілі ұсынылған. Ұсынылған тәсіл негізінде, айқын емес қорытынды жүйесі түрінде, баяу кокстеу процесінде кокс шығымын және оның сапа көрсеткіштерін бағалау үшін лингвистикалық модельдер синтезделді. Жоғары сапалы кокс өндіру процесін басқару бойынша талдау және шешім қабылдауға мүмкіндік беретін баяу кокстеу процесінің кіріс және шығыс параметрлерінің тиістілік функциялары және 3D кіріс-шығыс беттері құрылды. Осы жұмыста синтезделген лингвистикалық модельдерге, авторлар әзірлеген және жариялаған баяу кокстеу қондырғысының ректификациялық колоннасы модельдерінің және шешім қабылдау есептерін шешуге арналған эвристикалық тәсілге негізделген интеллектуалды шешімді қолдау жүйесі жасалды. Кокс өндіру процесін тиімді басқару үшін модельдеу және шешім қабылдау процестерін жүзеге асыратын, әзірленген шешім қабылдауды қолдау жүйесінің негізгі интерфейстері келтіріліп, сипатталған. Алынған нәтижелердің жаңалығы мен артықшылығы олардың мүмкіндігінде жатыр. Алынған нәтижелердің жаңалығы мен артықшылығы олардың баяу кокстеу процесін модельдеу және оптимизациялау, сондай-ақ алынған кокстың сапасын айқынсыз ортада басқару мүмкіндігінде жатыр. Зерттеу нәтижелерінің практикалық маңыздылығы - олар анықсыздық пен бастапқы ақпараттың айқын еместігімен сипатталатын шынайы жағдайларда кокс өндіру процесін жедел және тиімді басқаруға мүмкіндік беруіндеі.

Түйін сөздер: *лингвистикалық модельдер, мұнай коксы, баяу кокстеу процесі, кокстеу реакторлары, шешім қабылдау.*

B. Orazbayev[1], A. Kishubayeva[2]*, K. Orazbayeva[3], Л. Abdibekova[3], B. Utenova[4]
[1]L.N. Gumilyov Eurasian National University,
Z01A3D7, Republic of Kazakhstan, Astana, Satpayev str., 2
[2]Toraighyrov University,
S14P3K7, Republic of Kazakhstan, Pavlodar, st. Lomov, 64
[3]Esil university, Z01A3D7, Kazakhstan, Astana, Zhubanova street 7
[4]Atyrau University of Oil and Gas,
060008, Kazakhstan, Atyrau, Baimukhanov St. 45,a
*e-mail: Altynai_999@mail.ru

LINGUISTIC MODELS AND DECISION SUPPORT SYSTEM FOR CONTROLING THE YIELD AND QUALITY OF PETROLEUM COKE

This paper examines the problems of linguistic modeling and process control for high-quality coke production in a fuzzy environment using a decision support system and proposes approaches to addressing them. A method for synthesizing linguistic models of complex process systems with fuzzy input and output parameters is proposed, drawing on expert knowledge and the Fuzzy Logic Toolbox application in MATLAB. Using the proposed method as a fuzzy inference system, linguistic models were synthesized to evaluate coke yield and its quality indicators during delayed coking. Membership functions for the input and output parameters of the delayed coking process and 3D input-output surfaces are constructed, enabling analysis and decision-making on the management of high-quality coke production. An intelligent decision support system was created based on the linguistic models synthesized in this paper, models of a distillation column for a delayed coking unit developed and published by the authors, and a heuristic method for solving decision-making problems. The main interfaces of the developed decision support system, implementing modeling and decision-making processes for the effective management of the coke production process, are presented and

described. The novelty and advantage of the obtained results lies in their ability to model and optimize the delayed coking process and manage the quality of the produced coke in a fuzzy environment. The practical significance of the research results lies in their ability to quickly and effectively manage the coke production process in real-world conditions characterized by uncertainty and ambiguity of the initial information.

Key words: *linguistic models, petroleum coke, delayed coking process, coking reactors, decision making.*

Сведения об авторах

Батыр Бидайбекович Оразбаев – доктор технических наук, профессор кафедры «Системный анализ и управления», Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Республика Казахстан; e-mail: batyr_o@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2109-6999.

Алтынай Тулпаровна Кишубаева* – докторант Торайгыров Университета, Павлодар, Казахстан; e-mail: Altynai_999@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-1125-8696.

Кульман Нахановна Оразбаева – доктор технических наук, профессор кафедры «Информационные системы и технологии», Esil university, Республика Казахстан; e-mail: kulman_o@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1741-7553.

Лязат Муратовна Абдибекова – магистр, старший преподаватель кафедры «Информационные системы и технологии», Esil university, Республика Казахстан; e-mail: Lazatabdibekova59@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-3690-3398.

Балбупе Есенжановна Утенова – кандидат технических наук, профессор факультета «Информационные технологии», Атырауский университет нефти и газа, Республика Казахстан; e-mail: balbupe_u_e@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-6705-5830.

Авторлар туралы мәліметтер

Батыр Бидайбекович Оразбаев – техника ғылымдарының докторы, «Жүйелік талдау және басқару» кафедрасының профессоры, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті; Қазақстан; e-mail: batyr_o@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2109-6999.

Алтынай Тулпаровна Кишубаева* – Торайгыров Университеті докторанты, Қазақстан; e-mail: Altynai_999@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-1125-8696.

Кульман Нахановна Оразбаева – техника ғылымдарының докторы, «Ақпараттық жүйелер және технологиялар» кафедрасының профессоры, Esil university, Қазақстан; e-mail: kulman_o@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1741-7553.

Лязат Муратовна Абдибекова – магистр, аға оқытушы, «Ақпараттық жүйелер және технологиялар» кафедрасының профессоры, Esil university, Қазақстан; e-mail: Lazatabdibekova59@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-3690-3398.

Балбупе Есенжановна Утенова – техника ғылымдарының кандидаты, «Ақпараттық технологиялар» факультетінің профессоры, Атырау мұнай және газ университеті, Қазақстан; e-mail: balbupe_u_e@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-6705-5830.

Information about the authors

Batyr Orazbayev – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of System Analysis and Management; L.N. Gumilyov Eurasian National University, Republic of Kazakhstan; e-mail: batyr_o@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2109-6999.

Altynay Kishubayeva* – doctoral student Toraigyrov University, Pavlodar, Kazakhstan; e-mail: Altynai_999@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-1125-8696.

Kulman Orazbayeva – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Information Systems and Technologies, Esil University, Republic of Kazakhstan; e-mail: kulman_o@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1741-7553.

Lyazat Abdibekova – doctor of philosophy, senior lecturer at the faculty of Physics, mathematics, and information technologies of M.Utemisov University, Republic of Kazakhstan; e-mail: Lazatabdibekova59@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-3690-3398.

Balbupe Utenova – Candidate of Technical Sciences, Professor of the Faculty of Information Technology; Atyrau University of Oil and Gas, Republic of Kazakhstan; e-mail: balbupe_u_e@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-6705-5830.

Поступила в редакцию 01.06.2026
Поступила после доработки 27.06.2026
Принята к публикации 30.06.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-11

МРНТИ: 50.47.00

CC BY 4.0
Check for updates

А.Н. Бақытжанов*, Д.К. Сатыбалдина[1], А.Ж. Закарина[1], Н.Б. Шмитов[1], Н.М. Тешебаев[2]
[1]Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
010008, Қазақстан Республикасы, Астана қ., Сәтбаев көшесі, 2
[2]Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,
050040, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Әл-Фараби даңғылы, 71
*e-mail: bakytzhanovansar4@gmail.com

КҮЛ МӨЛШЕРІ ЖОҒАРЫ ОТЫНДЫ ЖАҒУ КЕЗІНДЕ БАРАБАНДЫ БУ ҚАЗАНДЫҒЫНЫҢ ЖҰМЫС РЕЖИМІН ОТЫН ШЫҒЫНЫНЫҢ МИНИМУМЫ КРИТЕРИЙІ БОЙЫНША ОҢТАЙЛАНДЫРУ

Аңдатпа: *Жұмыста жұмыс күлділігі A^r 47%-ға дейін жететін экибастуз көмірін жағатын БҚЗ-320-140 ПТ барабанды бу қазандығының отын шығынын оңтайландыру мәселесі шешілді. Отын жұмсалуын, бу қыздырғыштан кейінгі артық оттегіні және қыздырылған будың артық шығарылымын тізбектеп азайтатын үш кезеңді лексикографиялық сызықтық бағдарламалау есебі ұсынылды. Есеп MATLAB ортасында linprog функциясы мен dual-simplex алгоритмі арқылы шешілді; бу шығару процесінің инкременттік формадағы сызықтық регрессиялық моделі пайдаланылды. Режим параметрлеріне қыздырылған будың температурасы (540-555°C), оттегі мөлшері (≥ 4,8 %) және бу шығарылымы (260-340 т/сағ) бойынша теңсіздік түріндегі технологиялық шектеулер қойылды. Параметрлердің рұқсат етілген шекаралары Астана қ. ТЭЦ-2 қазандығының 2023 жылғы қыркүйек–қазан айларындағы 1276 сағаттық жазбасын статистикалық өңдеу нәтижелері бойынша анықталды. Алынған нәтижелер бойынша отын шығыны қосымша күрделі шығынсыз сағатына 0,331 т-ға азайып, жылына 21,1 млн теңге үнемделеді. Қосымша нәтиже ретінде конвективті жылу алмасу беттері арқылы абразивті күл уносы сағатына 134 кг-ға, яғни жылыту маусымына шамамен 1005 т-ға кемиді, бұл экологиялық жүктемені айтарлықтай төмендетеді. Ұсынылған әдіс басқа барабанды қазандықтарға бейімделіп, нақты уақыттағы автоматтандырылған режимдік басқару жүйесіне енгізілуі мүмкін, бұл оны өндірісте практикалық қолдануға жарамды етеді.*

Түйін сөздер: *бу қазандығы, БҚЗ-320-140, экибастуз көмірі, күлі жоғары отын, абразивті тозу, оңтайлы басқару, сызықтық бағдарламалау, MATLAB.*

Кіріспе

Қазақстандағы электр энергиясының 70%-дан астамы жылу электр орталықтарында өндіріледі. Осы көлемнің басым бөлігі экибастуз тас көмірімен жұмыс істейтін шаңкөмірлі қазандық қондырғыларына тиесілі. Экибастуз көмірі абразивтілігі жағынан дүние жүзіндегі ең қиын энергетикалық отындардың қатарында: күлділігі A^r 38-ден 47%-ға дейін жетеді, жану жылуы $Q\_н^r$ шамамен 16,8 МДж/кг-ды құрайды, ал күлдегі SiO_2 үлесі 45-78% аралығында болады [1, 2].

Шаңкөмірлі қазандықтардың пайдалану практикасында жылу алмасу қабаттарының тозуы өзекті мәселе болып қала береді. Түтін газдарындағы қатты күл түйіршіктері бу қыздырғыш, экономайзер және түтікті ауа қыздырғыш құбырларына соғылып, олардың қабырғаларын үздіксіз жұқартады. Тозу қарқындылығы газ ағынының жылдамдығына текше дәрежеде, ал күл мөлшеріне сызықтық тәуелді. Осыдан шығатын қорытынды қарапайым: отын жағудың кез келген кемуі тозу үрдісін баяулатады [1, 3].

Күл жинақталуын бақылау мен болжау саласында белсенді зерттеулер жүргізілуде. Атап айтқанда, [4] жұмысында CEEMDAN сигнал ыдырауы NAR нейрондық желісімен біріктіріліп, 300 МВт қазандықтың экономайзеріндегі күл қабатын болжау моделі жасалды. Циркуляциялық қайнау қабатты қазандыққа арналған [5] зерттеуде Байес тәсілдері мен дірілдік сенсорлық деректерді ұштастыратын гибридті мониторинг жүйесі ұсынылды. Терең оқыту мүмкіндіктерін тереңірек пайдаланған [6] жұмыс CEEMDAN, KPCA және назар механизмі бар encoder-decoder архитектурасын жылу беру тиімділігін бағалауға бейімдеді.

©А.Н. Бақытжанов, Д.К. Сатыбалдина, А.Ж. Закарина, Н.Б. Шмитов, Н.М. Тешебаев, 2026

Сонымен қатар, [7] мақаласында CNN-BiGRU гибридті моделі арқылы қазандық жану жүйесі NO_x мен жылу тиімділігі бойынша бір мезгілде оңтайландырылды.

Аталған зерттеулердің көбі деректерге негізделген (data-driven) тәсілдерді қолданады, олар жоғары дәлдікті қамтамасыз етсе де, күрделі есептеу ресурстарын, үлкен деректер жиынтығын және арнайы аппараттық қамтамасыз етуді талап етеді. Алайда, стационарлы жұмыс режимі бар нақты өнеркәсіптік қазандыққа сызықтық регрессия мен сызықтық бағдарламалауды біріктіре отырып, отын шығынын оңтайландыру мәселесі бүгінгі күнге дейін тиісті деңгейде қарастырылмаған. Мұндай тәсілдің артықшылығы - есептеу қарапайымдылығы, нәтижелердің түсініктемелілігі және қосымша жабдықсыз іске асырылуы [8].

Жұмыстың негізгі мақсаты – барабанды бу қазандығына арналған оңтайлы басқару алгоритмін жасап, оны бағдарламалық іске асыру. Алгоритм берілген технологиялық шектеулер шеңберінде тұтынушыларға жеткізілетін бу бірлігіне шаққанда отын шығынының ең аз мәнін қамтамасыз етуге тиіс. Экибастуз көмірінің ерекшелігін ескерсек, отын жағуды азайту екі нәтиже бере алады: біріншіден, тікелей ақша үнемі; екіншіден, конвективті қабаттар арқылы ұшатын абразивті күл мөлшерін кемітіп, олардың тозу жылдамдығын баяулату.

Зерттеудің ғылыми жаңалығы бу қалыптастыру процесінің қосымша сызықтық регрессиялық моделін және сызықтық бағдарламалау мәселесінің үш сатылы лексикографиялық қойылымын бірлесіп пайдалануға негізделген бу қазандығының жұмыс режимдерін оңтайландырудың жаңа тәсілін әзірлеу болып табылады. Негізінен сызықтық емес модельдерге, нейрондық желілерге, терең оқыту әдістеріне немесе объектінің күрделі физикалық модельдеріне негізделген бу қазандықтарының жұмыс режимдерін оңтайландырудың қолданыстағы әдістерінен айырмашылығы, ұсынылған тәсіл технологиялық параметрлердің себеп-салдарлық байланыстарының С-графигі негізінде құрылған және пайдалану деректері бойынша анықталған сызықтық модельді қолданады. Әзірленген әдістің қосымша ерекшелігі-нақты пайдалану деректерінің 5-95 процентиль аралығы бойынша параметрлердің өзгеруінің рұқсат етілген диапазондарын анықтау, бұл шешімнің практикалық қолданылуын сақтай отырып, оның тұрақтылығын қамтамасыз етеді. Процесс моделін лексикографиялық оңтайландырумен біріктіру ресурстарды қажет ететін оқыту алгоритмдерін қолданбай отын шығынын азайтуды қамтамасыз ететін өнеркәсіптік бу қазандығының жұмыс режимдерін есептеуіш тиімді анықтауға мүмкіндік береді және әдісті қолданыстағы автоматтандырылған басқару жүйелерінде тікелей пайдалануға жарамды етеді.

Мақала келесідей ұйымдастырылған. 2-бөлімде зерттеу объектісі сипатталып, математикалық модель мен оңтайландыру есебінің қойылымы келтіріледі. 3-бөлімде MATLAB ортасындағы есептеу нәтижелері ұсынылады. 4-бөлімде экономикалық тиімділік пен абразивті тозуды кемітуге байланысты нәтижелер талқыланады. 5-бөлімде қорытынды тұжырымдалады.

Зерттеу жағдайлары мен әдістері

Сызықтық бағдарламалау есебінің қойылымы мен шешу әдісі

Сызықтық бағдарламалау (СБ) есебі келесі түрде тұжырымдалады: сызықтық мақсат функциясының минимумын (немесе максимумын) сызықтық теңсіздіктер мен теңдіктерден тұратын шектеулер жүйесін қанағаттандыратын айнымалылар жиынтығында табу. Жалпы түрдегі СБ есебі матрицалық жазбада келесідей жазылады. Табу қажет:

$$min\ c^{\mathrm{T}} * x$$

келесі шарттар орындалғанда:

$$A * x \leq b,\ A_{\mathrm{eq}} * x = b_{\mathrm{eq}},\ lb \leq x \leq ub$$

мұнда x – оңтайландыру айнымалыларының векторы (n×1); c – мақсат функциясының коэффициенттер векторы; A, b – теңсіздік шектеулерінің матрицасы мен векторы;$A_{\mathrm{eq}}, b_{\mathrm{eq}}$ – теңдік шектеулерінің матрицасы мен векторы; lb, ub - айнымалылардың төменгі және жоғарғы шекаралары.

Сызықтық бағдарламалау есебін келесідей де тұжырымдауға болады. Табу қажет:

$$max(c_1x_1 + c_2x_2 + \ldots + c_{\mathrm{n}}x_{\mathrm{n}})$$

немесе

$$min(c_1x_1 + c_2x_2 + \ldots + c_nx_n)$$

келесі шарттар орындалған жағдайда:

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \ldots + a_{1n}x_n \leq b_1$$
$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \ldots + a_{2n}x_n \leq b_2$$
$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$
$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \ldots + a_{mn}x_n \leq b_m$$
$$x_1 \geq 0,\ x_2 \geq 0,\ \ldots,\ x_n \geq 0$$

Бұл жағдайда барлық шектеулер теңсіздік түрінде болады. Кейде оларды араластыруға болады, яғни теңсіздіктер мен теңдіктер бірге:

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \ldots + a_{1n}x_n \leq b_1$$
$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \ldots + a_{2n}x_n = b_2$$
$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$
$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \ldots + a_{mn}x_n \geq b_m$$

Симплекс әдісі – сызықтық бағдарламалау есептерін шешуге арналған классикалық итерациялық алгоритм. Оның негізгі идеясы: рұқсат етілген облыс көпжақ (полиэдр) болғандықтан, оңтайлы шешім міндетті түрде осы полиэдрдың төбелерінің бірінде орналасады. Алгоритм бастапқы рұқсат етілген төбеден бастап, әр итерацияда мақсат функциясын жақсартатын көрші төбеге ауысады. Ешбір көрші төбе мақсат функциясын жақсартпағанда - оптимум табылды деп саналады.

Теңсіздік шектеулерін теңдікке айналдыру үшін бос айнымалылар $x_{n+1}, x_{n+2}, \ldots, x_{n+m}$ енгізіледі. Осылайша теңсіздік:

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \ldots + a_{1n}x_n \leq b_1$$
$$a_{11}x_1 + \ldots + a_{1n}x_n + x_{n+1} = b_1, \quad \textit{мұнда } x_{n+1} \geq 0$$

Бұл формадағы есеп кеңейтілген деп аталады.

MATLAB ортасындағы linprog функциясы dual-simplex алгоритмін іске асырады - бұл классикалық симплекс әдісінің қосарлы (дуальді) нұсқасы, ол ірі өлшемді сирек матрицалы есептерде тиімді жұмыс істейді. linprog функциясының шақыру синтаксисі:

$$x = linprog(c, A, b, A_{eq}, b_{eq}, lb, ub)$$

мұнда аргументтер жоғарыда сипатталған стандартты LP есебінің компоненттеріне сәйкес келеді [9].

Процестің математикалық моделі және қазандық жұмыс режимін оңтайландыру есебі

Зерттеу объектісі ретінде Барнаул қазандық зауытының («Сібенергомаш») өнімі - БҚЗ-320-140 ПТ бу қазандығы алынды. Қазандық бір барабанды, тік-түтікті, табиғи айналымды, П-тәріздес компоновкалы, қатты шлак шығарумен жұмыс істейді; жобалық бу өнімділігі 320 т/сағ, қыздырылған будың қысымы 140 кгс/см², температурасы 550°С, номиналды ПӘК шамамен 90 %. Зерттеу Астана қ. ТЭЦ-2-де орнатылған, СС маркалы экибастуз көмірін жағатын қазандық қондырғысының эксплуатациялық деректері негізінде жүргізілді.

Стационарлы режимдегі бу шығару процесінің математикалық моделі қазандық параметрлерінің С-графы негізінде құрылымдық-параметрлік сәйкестендіру әдісі арқылы алынды [8]. Регрессиялық талдау нәтижесінде процестің параметрлерін өзара байланыстыратын сызықтық қатынастар алынды:

$$B_о = 0{,}0435 * O_2(с) + 0{,}0587 * O_2(о) + 1{,}313 * D_{қ.б} + 0{,}0987 * P_{ББЖ} - 0{,}00162 * G_а \quad (1)$$
$$O_2 = 0{,}000919 * G_а + 0{,}274 * B_о + 0{,}0157 * P_{ББЖ} - 0{,}713 * D_{қ.б} \quad (2)$$
$$D_{қ.б} = 0{,}00139 * G_а - 0{,}0029 * G_{қ.с} - 0{,}0414 * T_{қ.с} + 0{,}00588 * P_{қ.с} + 0{,}0678 * B_о - D_{ө.қ} \quad (3)$$
$$T_{қ.б} = -25{,}329 * B_о + 4{,}2 * P_{ББЖ} + 4{,}19 * D_{қ.б} - 0{,}0199 * G_{қ.с} \quad (4)$$

Мұнда $B_о$ – отын шығыны, т/сағ; O_2 - бу қыздырғыштан кейінгі оттегі мөлшері, %; $D_{қ.б}$ – қыздырылған будың артық шығарылымы, т/сағ; $T_{қ.б}$ – қыздырылған будың температурасы, °С; $G_а$ – үрлеу ауасының шығыны, м³/сағ; $G_{қ.с}$ – қоректік судың шығыны, т/сағ; $D_{ө.қ}$ – өзіндік қажеттіліктерге кететін бу шығыны, т/сағ; $P_{ББЖ}$ – барабандағы қысым.

(1)-(4) теңдеулерімен ұсынылған алынған регрессиялық модельдің барабарлығы қазандықтың номиналды есептеу режиміндегі ауытқулардың шамасы бойынша бағаланады. Ол үшін Шығыс параметрлерінің өлшенген мәндері (1)-(4) теңдеулерімен есептелген мәндермен салыстырылды. Бағалау нәтижелері 1-кестеде келтірілген. Модельдің барлық теңдеулердегі салыстырмалы қателігі 2,5% - дан аспайды (орта есеппен шамамен 1,1 %), бұл

сызықтық регрессиялық модельдің барабарлығын және оның жұмыс нүктесінің маңындағы қазандықтың жұмыс режимін оңтайландыруға жарамдылығын растайды.

Кесте 1 – Регрессиялық модельдің номиналды режимдегі адекваттылығын бағалау

Шама (теңдеу)	Өлшенген	Есептік	Δ	δ, %
Bo, т/сағ (1)	43,566	42,843	−0,723	−1,66
O_2, % (2)	6,100	5,952	−0,148	−2,42
Dқ.б, т/сағ (3)	260,00	259,09	−0,91	−0,35
Тқ.б, °C (4)	547,0	547,7	+0,74	+0,14

Оңтайлы басқару есебі мынадай түрде тұжырымдалады: $G_{\text{а}}$, $G_{\text{қ.с}}$, $D_{\text{ө.қ}}$, $B_{\text{о}}$ басқарушы әсерлерінің мәндерін табу қажет, олар оттегі мен будың артық мөлшерін минимумға түсіре отырып, отын шығынының ең аз мәнін қамтамасыз етсін. Есептің көп критерийлі сипатын ескере отырып, ол лексикографиялық қойылымда үш кезеңде шешіледі:

$$B_{\text{о}} \rightarrow min \quad (5)$$

$$O_2 \rightarrow min, \quad \text{шарт: } B_{\text{о}} \leq B_0^* + \varepsilon_1 \quad (6)$$

$$D_{\text{қ.б}} \rightarrow min, \quad \text{шарт: } B_{\text{о}} \leq B_0^* + \varepsilon_1,\ O_2 \leq O_2^* + \varepsilon_2 \quad (7)$$

Әр кезеңде регрессиялық модельдің (1)-(3) теңдеулері инкременттік формадағы теңдік шектеулері ретінде қолданылады. Бұған қосымша, қазандықтың қауіпсіз жұмыс істеуін қамтамасыз ету мақсатында технологиялық теңсіздік шектеулері қойылады:

$$O_2 \geq 4{,}8\ \% \quad (8)$$

$$260 \leq D_{\text{қ.б}} \leq 340\ \text{т/сағ} \quad (9)$$

$$540 \leq T_{\text{қ.б}} \leq 555\ °C \quad (10)$$

ұнда $T_{\text{қ.б}}$ регрессиялық модельдің (4) теңдеуімен есептеледі. (8)-(10) шектеулер қыздырылған будың температурасын, оттегі мөлшерін және бу шығарылымын технологиялық рұқсат етілген аралықта ұстап тұруды қамтамасыз етеді. Бұл теңсіздіктер linprog функциясының $A_{ub} * x \leq b_{ub}$ аргументтері арқылы беріледі.

Шағын допусктар ε_1, ε_2 алдыңғы кезеңде табылған оптимумнан рұқсат етілген ауытқу ретінде түсіндіріледі; олар полиэдр төбесінің ауысуын жою үшін енгізілді, сандық мәндері ε_1 = 0,05 және ε_2 = 0,01 деп қабылданды.

Үш кезеңді оңтайландыру MATLAB ортасында Optimization Toolbox пакетінің linprog функциясы (dual-simplex алгоритмі) көмегімен бағдарламалық іске асырылды [9]. Регрессиялық модельдің (1)-(3) теңдеулері $A_{eq} * x = A_{eq} * x_0$ инкременттік түрінде қолданылды, бұл номиналды жұмыс нүктесі x_0 маңындағы модельдің қалдық қателігін дұрыс ескеруге мүмкіндік береді. Басқарылатын параметрлердің технологиялық шекаралары 2023 жылдың қыркүйек-қазан айларындағы қазандық жұмысының 1276 сағаттық жазбасын статистикалық өңдеу (5-ші және 95-ші процентіктер) арқылы анықталды.

Зерттеу нәтижелері

Оңтайландыру кезеңдері бойынша алынған технологиялық параметрлердің мәндері 2-кестеде келтірілген.

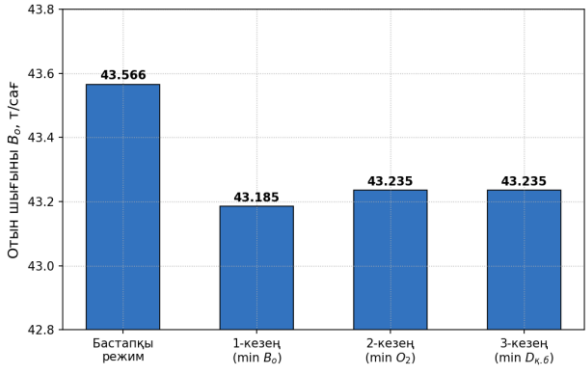
Кесте 2 – Оңтайландыру кезеңдері бойынша жұмыс режимінің параметрлері

Параметр	Бір.	Бастапқы	1-кезең	2-кезең	3-кезең
Отын шығыны $B_{\text{о}}$	т/сағ	43,566	43,185	43,235	43,235
Оттегі O_2	%	6,100	6,196	6,181	6,133
Артық бу $D_{\text{қ.б}}$	т/сағ	260,0	259,5	259,5	258,0
Ауа шығыны $G_{\text{а}}$	м³/сағ	192 901	192 730	192 700	191 484
Қоректік су $G_{\text{қ.с}}$	т/сағ	260,0	275,0	275,0	275,0
Бу ө.қ. $D_{\text{ө.қ}}$	т/сағ	2,00	2,19	2,16	1,97
Температура $T_{\text{қ.б}}$	°C	547	555,0	553,7	547,5

2-кестеден көрініп тұрғандай, бірінші кезеңде отын шығыны бастапқы 43,566 т/сағ мәнінен 43,185 т/сағ-ға дейін төмендейді, бұл ретте $T_{\text{қ.б}}$ температурасы жоғарғы рұқсат шегіне (555 °C) жетеді. Екінші кезеңде бу қыздырғыштан кейінгі оттегінің артық мөлшері нәзік түзетіледі (O_2 6,196-дан 6,181 %-ға кемиді). Үшінші кезең қыздырылған будың артық

шығарылымын $D_{қ.б}$ (259,5-тен 258,0 т/сағ-ға) кемітеді, ал $T_{қ.б}$ 547,5 °С-ға дейін түсіп, 540-555 °С шегінде қалады. Отын шығынын жалпы кемітуі ΔB_o = 0,331 т/сағ, бастапқы деңгейден шамамен 0,76 % құрайды.

1-суретте оңтайландырудың үш кезеңі бойынша отын шығынының кемуі көрсетілген. Әрбір кезеңнің нәтижесі алдыңғысынан айқын ерекшеленеді, бұл лексикографиялық қойылымның тиімділігін дәлелдейді.



Сурет 1 – Оңтайландыру кезеңдері бойынша отын шығыны Во

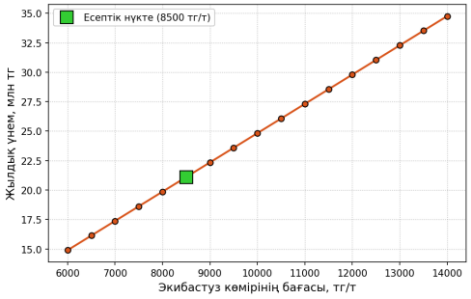
Ғылыми нәтижелерді талқылау

Экибастуз көмірінің көтерме бағасы 2025-2026 жылдардағы салалық статистика бойынша 8000-10000 тг/т аралығында; осы есептерде орташа мәні 8500 тг/т деп қабылданды. Қазандықтың жылдық жұмыс қоры h = 7500 сағ (жоспарлы жөндеулерді ескергендегі базалық режимнің типтік мәні) болғанда, сағаттық және жылдық үнем:

$$\Delta S_{\text{сағ}} = \Delta B_{\text{о}} * \text{Баға} = 0{,}331 * 8500 \approx 2814 \text{ тг/сағ} \quad (11)$$

$$\Delta S_{\text{жыл}} = \Delta S_{\text{сағ}} * \text{h} = 2814 * 7500 \approx 21{,}1 \text{ млн тг/жыл} \quad (12)$$

2-суретте көрсетілгендей, көмір бағасы 6000-14000 тг/т аралығында өзгерген кезде жылдық экономикалық тиімділік 14,9-дан 34,7 млн теңгеге дейін ауытқиды. Бұл тиімділік қосымша күрделі шығынсыз, тек бар жабдықтың режимдік параметрлерін оңтайландыру есебінен қол жеткізіледі.



Сурет 2 – Экибастуз көмірінің бағасына үнемнің сезімталдығы

Күлі жоғары экибастуз көміріне қатысты, отын шығынының кемуі тікелей экономикалық ғана емес, елеулі эксплуатациялық тиімділікке ие – конвективті жылу алмасу қабаттары арқылы абразивті күл уносының азаюы. Күл уносының сағаттық массалық шығыны мына өрнекпен бағаланады [1, 3]:

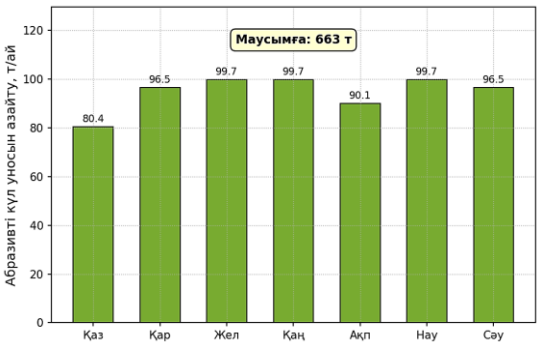
$$G_{\text{күл}} = B_{\text{о}} * A^{\text{r}} * \alpha_{\text{ұш}} \quad (13)$$

мұнда A^{r} - отынның жұмыс күлділігі (A^{r} = 0,45 деп қабылданды); $\alpha_{\text{ұш}}$ - топкадан ұшатын күлдің үлесі (қатты шлак шығаратын шаңкөмірлі қазандықтар үшін $\alpha_{\text{ұш}}$ ≈ 0,90). Онда режимді оңтайландыру кезіндегі күл уносының сәйкес кемуі:

$$\Delta G_{\text{күл}} = \Delta B_{\text{о}} * A^{\text{r}} * \alpha_{\text{ұш}} = 0{,}331 * 0{,}45 * 0{,}90 \approx 0{,}134 \text{ т/сағ} \quad (14)$$

яғни сағатына шамамен 134 кг. Ұзақтығы 7500 сағ болатын жылыту маусымында конвективті жылу алмасу қабаттары арқылы шамамен 1005 тонна абразивті күл кем өтеді.

3-суретте жылыту маусымының әрбір айындағы абразивті күл уносының кемуі көрсетілген. Абразивті тозу қарқындылығының газ ағыны жылдамдығына текше тәуелділігін және күл концентрациясына сызықтық тәуелділігін ескерсек, отын шығынының кемуі мен онымен қоса түтін газдарының массалық шығынының азаюы бу қыздырғыш, экономайзер және түтікті ауа қыздырғыш құбырларының тозу жылдамдығының одан да елеулі салыстырмалы кемуіне алып келеді [1, 10]. Бұл жылу алмасу қабаттарының жөндеу аралығын ұзартады және қазандық қондырғысының құбыр жарылулары мен жыланкөздерге байланысты апаттық тоқтаулар жиілігін азайтады.



Сурет 3 – Жылыту маусымының айлары бойынша абразивті күл уносын азайту

Алынған нәтижелерді қазандық жұмыс режимін оңтайландыруға арналған заманауи зерттеулермен салыстыруға болады. [4] және [6] жұмыстарда CEEMDAN-NAR және назар механизмі бар encoder-decoder архитектуралары негізінде жылу беру тиімділігі мен күл жинақталуы жоғары дәлдікпен болжанады; [7] мақалада CNN-BiGRU гибридті моделі NOx шығарылымы мен жылу тиімділігін бір мезгілде оңтайландырады, ал [11] зерттеуде циркуляциялық қайнаған қабатты қазандықтың негізгі басқару параметрлері машиналық оқыту әдістерімен таңдалады. Аталған тәсілдер жоғары дәлдікке қол жеткізгенімен, елеулі көлемдегі оқыту деректерін, есептеу ресурстарын, кейде қосымша сенсорлық жабдықты талап етеді әрі алынған модельдердің физикалық интерпретациясы шектеулі болады.

Осы зерттеуде ұсынылған сызықтық регрессия мен лексикографиялық сызықтық бағдарламалауды ұштастыратын тәсіл, аталған әдістермен салыстырғанда, есептеу жағынан едәуір қарапайым, толық интерпретацияланады және қосымша жабдықсыз, тек қолданыстағы телеметрия негізінде жүзеге асырылады. [3] жұмыста ұсынылған оттегі-температуралық реттеу арқылы шлактануды болдырмау тәсілінен айырмашылығы - мұнда режим құрылымдық өзгеріссіз, тікелей отын шығынының минимумы критерийі бойынша оңтайландырылады, ал абразивті күл уносының азаюы қосымша нәтиже ретінде алынады. Осылайша ұсынылған әдіс дәлдік пен есептеу қарапайымдылығы арасындағы практикалық теңгерімге бағытталып, оны жедел (real-time) режимде жұмыс істейтін автоматтандырылған басқару жүйелеріне енгізуге ыңғайлы етеді.

Қорытынды

Зерттеу барысында MATLAB ортасында linprog функциясы арқылы іске асырылған үш кезеңді сызықтық бағдарламалау алгоритмі барабанды бу қазандығының жұмыс режимін оңтайландыруға тиімді құрал бола алатындығы дәлелденді. Алгоритм отын шығынын, артық оттегіні және артық бу өндіруін бір мезгілде кемітеді, бұл ретте технологиялық шектеулер бұзылмайды.

Күлділігі 45% шамасындағы экибастуз көмірімен жұмыс істейтін БҚЗ-320-140 ПТ қазандығына қолданғанда, отын шығыны сағатына 0,331 т-ға кемиді. Бұл жылына 21,1 млн теңге шамасында үнемге баламалы. Маусымдық есеппен алғанда, конвективті қабаттар арқылы ұшатын абразивті күл 1005 тоннаға азаяды, бұл конвективті жылу алмасу беттерінің қызмет ету ресурсын арттыруға мүмкіндік береді.

Алынған нәтижелер сызықтық бағдарламалау әдістерін күлі жоғары отынмен жұмыс жасайтын энергетикалық қазандық қондырғыларына арналған интеллектуалды оңтайлы басқару жүйелерін жасауда қолдануға болатындығын растайды.

Ұсынылған алгоритмнің практикалық енгізілу перспективалары теплоэнергетикалық объектілердің автоматтандырылған басқару жүйелерімен (АБЖ ТП, SCADA) тікелей байланысты. Алгоритмнің есептеу қарапайымдылығы мен жоғары жылдамдығы оны бақылаушы (supervisory, set-point) деңгейде іске асыруға мүмкіндік береді: SCADA/АБЖ телеметриясынан алынған ағымдағы параметрлер бойынша оңтайлы тапсырма мәндері (отын шығыны, артық ауа, бу шығарылымы) есептеліп, төменгі деңгейдегі реттеу контурларына беріледі. Болашақ зерттеу бағыттары ретінде: регрессиялық модельді жаңа эксплуатациялық деректер бойынша мерзімді қайта баптау (адаптивті сәйкестендіру); алгоритмді жүктеменің айнымалы режимдеріне бейімдеу; басқа типтегі барабанды қазандықтарға тарату; сондай-ақ ұсынылған сызықтық тәсілді деректерге негізделген болжау модельдерімен біріктіріп, гибридті оңтайлы басқару жүйесін құру көзделеді. Мұндай енгізу қазандық қондырғысының энергетикалық тиімділігін арттырып, отын мен эксплуатациялық шығындарды төмендетуге және конвективті жылу алмасу беттерінің қызмет ету мерзімін ұзартуға мүмкіндік береді.

Әдебиеттер тізімі

1. Абразивный износ конвективных поверхностей энергетического котлоагрегата золой экибастузского угля / Л.В. Белоглазова и др. // Технические науки – от теории к практике. – 2016. – № 11. – С. 73-80.
2. A comprehensive review on efficient utilization methods of High-alkali coals combustion in boilers / C. Tang et al // Fuel. – 2022. – Vol. 316. – Article 123269. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.123269.
3. Numerical simulation of engineering application for a novel oxygen-temperature regulation combustion technology preventing fouling in high-alkali coal firing / S. Chen et al // Applied Thermal Engineering. – 2025. – Vol. 259. – Article 124923. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.124923.
4. Heat Transfer Efficiency Prediction of Coal-Fired Power Plant Boiler Based on CEEMDAN-NAR Considering Ash Fouling / Y. Shi et al // Energies. – 2021. – Vol. 14, № 13. – Article 4000. https://doi.org/10.3390/en14134000.
5. Fouling Monitoring in a Circulating Fluidized Bed Boiler Using Direct and Indirect Model-Based Analytics / E. Ikonen et al // Fuel. – 2023. – Vol. 346. – Article 128341. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128341.
6. Deep Learning-Based Approach for Heat Transfer Efficiency Prediction with Deep Feature Extraction / Y. Shi et al // ACS Omega. – 2022. – Vol. 7, № 35. – P. 31013-31035. https://doi.org/10.1021/acsomega.2c03052.
7. Intelligent Deep Learning Modeling and Multi-Objective Optimization of Boiler Combustion System in Power Plants / C. Huang et al // Processes. – 2025. – Vol. 13, № 8. – Article 2340. https://doi.org/10.3390/pr13082340.
8. Большаков Ф.Г. Синтез оптимального по минимуму расхода топлива алгоритма управления паровым котлом / Ф.Г. Большаков. – Братск: БрГУ, 2001. – 132 с.
9. MATLAB Optimization Toolbox. User's Guide. Linear Programming (linprog). – The MathWorks, Inc., 2024. https://www.mathworks.com/help/optim/ug/linprog.html.
10. Ash melting behaviors of high-sodium coal and its co-combustion with coal gangue to inhibit slagging / L. Zhang et al // Fuel. – 2024. – Vol. 367. – Article 131537. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131537.
11. Optimization of circulating fluidized bed boiler combustion key control parameters based on machine learning / L. Han et al // Energies. – 2023. – Vol. 16, № 15. – Article 5674. https://doi.org/10.3390/en16155674.

References

1. Abrazivnyi iznos konvektivnykh poverkhnostei ehnergeticheskogo kotloagregata zoloi ehkibastuzskogo uglya / L.V. Beloglazova i dr. // Tekhnicheskie nauki – ot teorii k praktike. – 2016. – № 11. – S. 73-80. (in Russian).
2. A comprehensive review on efficient utilization methods of High-alkali coals combustion in boilers / C. Tang et al // Fuel. – 2022. – Vol. 316. – Article 123269. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.123269. (in English).

3. Numerical simulation of engineering application for a novel oxygen-temperature regulation combustion technology preventing fouling in high-alkali coal firing / S. Chen et al // Applied Thermal Engineering. – 2025. – Vol. 259. – Article 124923. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.124923. (in English).
4. Heat Transfer Efficiency Prediction of Coal-Fired Power Plant Boiler Based on CEEMDAN-NAR Considering Ash Fouling / Y. Shi et al // Energies. – 2021. – Vol. 14, № 13. – Article 4000. https://doi.org/10.3390/en14134000. (in English).
5. Fouling Monitoring in a Circulating Fluidized Bed Boiler Using Direct and Indirect Model-Based Analytics / E. Ikonen et al // Fuel. – 2023. – Vol. 346. – Article 128341. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128341. (in English).
6. Deep Learning-Based Approach for Heat Transfer Efficiency Prediction with Deep Feature Extraction / Y. Shi et al // ACS Omega. – 2022. – Vol. 7, № 35. – P. 31013-31035. https://doi.org/10.1021/acsomega.2c03052. (in English).
7. Intelligent Deep Learning Modeling and Multi-Objective Optimization of Boiler Combustion System in Power Plants / C. Huang et al // Processes. – 2025. – Vol. 13, № 8. – Article 2340. https://doi.org/10.3390/pr13082340. (in English).
8. Bol'shakov F.G. Sintez optimal'nogo po minimumu raskhoda topliva algoritma upravleniya parovym kotlom / F.G. Bol'shakov. – Bratsk: BrGU, 2001. – 132 s. (in Russian).
9. MATLAB Optimization Toolbox. User's Guide. Linear Programming (linprog). – The MathWorks, Inc., 2024. https://www.mathworks.com/help/optim/ug/linprog.html. (in English).
10. Ash melting behaviors of high-sodium coal and its co-combustion with coal gangue to inhibit slagging / L. Zhang et al // Fuel. – 2024. – Vol. 367. – Article 131537. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131537. (in English).
11. Optimization of circulating fluidized bed boiler combustion key control parameters based on machine learning / L. Han et al // Energies. – 2023. – Vol. 16, № 15. – Article 5674. https://doi.org/10.3390/en16155674. (in English).

А.Н. Бакытжанов*, Д.К. Сатыбалдина[1], А.Ж. Закарина[1], Н.Б. Шмитов[1], Н.М. Тешебаев[2]
[1]Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева,
010008, Республика Казахстан, г. Астана, ул. Сатпаева, 2
[2]Казахский национальный университет им. аль-Фараби,
050040, Республика Казахстан, г. Алматы, пр. аль-Фараби, 71
*e-mail: bakytzhanovansar4@gmail.com

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА РАБОТЫ БАРАБАННОГО ПАРОВОГО КОТЛА ПРИ СЖИГАНИИ ВЫСОКОЗОЛЬНОГО ТОПЛИВА ПО КРИТЕРИЮ МИНИМУМА РАСХОДА ТОПЛИВА

В работе решена задача оптимизации расхода топлива барабанного парового котла БКЗ-320-140 ПТ, работающего на экибастузском угле с рабочей зольностью A^r до 47 %. Предложена трёхэтапная лексикографическая задача линейного программирования для последовательной минимизации расхода топлива, избытка кислорода за пароперегревателем и избыточной выработки перегретого пара. Задача решена в среде MATLAB с использованием функции linprog и алгоритма dual-simplex на основе линейной регрессионной модели процесса парообразования в инкрементальной форме. На параметры режима наложены технологические ограничения в виде неравенств по температуре перегретого пара (540-555°C), содержанию кислорода (≥ 4,8%) и выработке пара (260-340 т/ч). Допустимые диапазоны параметров определены по результатам статистической обработки 1276 часовых записей работы котлоагрегата ТЭЦ-2 г. Астаны за период сентябрь-октябрь 2023 г. Полученные результаты показывают, что расход топлива без дополнительных капитальных затрат снижается на 0,331 т/ч, что обеспечивает годовую экономию 21,1 млн тенге. В качестве дополнительного результата достигается снижение уноса абразивной золы через конвективные поверхности нагрева на 134 кг/ч, или около 1005 т за отопительный сезон, что существенно снижает экологическую нагрузку. Предложенный метод может быть адаптирован для других барабанных котлов и внедрён в автоматизированную систему режимного управления в реальном времени, что делает его пригодным для практического применения в производстве.

Ключевые слова: *паровой котёл, БКЗ-320-140, экибастузский уголь, высокозольное топливо, абразивный износ, оптимальное управление, линейное программирование, MATLAB.*

A.N. Bakytzhanov[*], D.K. Satybaldina[1], A.Zh. Zakarina[1], N.B. Shmitov[1], N.M. Teshebayev[2]
[1]L.N. Gumilyov Eurasian National University,
010008, Republic of Kazakhstan, Astana, 2 Satpayev St.
[2]Al-Farabi Kazakh National University, 050040, Republic of Kazakhstan, Almaty, 71 Al-Farabi Ave.
e-mail: bakytzhanovansar4@gmail.com

OPTIMIZATION OF THE OPERATING MODE OF A DRUM STEAM BOILER BURNING HIGH-ASH FUEL BY THE CRITERION OF MINIMUM FUEL CONSUMPTION

This paper addresses the fuel consumption optimization problem for a BKZ-320-140 PT drum steam boiler burning Ekibastuz coal with working ash content A^r up to 47%. A three-stage lexicographic linear programming problem is proposed for the sequential minimization of fuel consumption, excess oxygen downstream of the superheater, and excess superheated steam production. The problem is solved in MATLAB using the linprog function and the dual-simplex algorithm, based on an incremental linear regression model of the steam generation process. Technological inequality constraints are imposed on the operating parameters: superheated steam temperature (540-555 °C), oxygen content (≥ 4.8%), and steam output (260-340 t/h). Permissible parameter ranges are determined from statistical processing of 1276 hourly records of the CHP-2 Astana boiler unit for September-October 2023. The results show that fuel consumption is reduced by 0.331 t/h without additional capital expenditures, yielding annual savings of 21.1 million KZT. As an additional outcome, abrasive fly ash carryover through convective heating surfaces is reduced by 134 kg/h, or approximately 1005 tonnes per heating season, significantly lowering the environmental burden. The proposed method can be adapted for other drum boilers and integrated into a real-time automated mode control system, making it suitable for practical industrial application.

Key words: *steam boiler, BKZ-320-140, Ekibastuz coal, high-ash fuel, abrasive wear, optimal control, linear programming, MATLAB.*

Авторлар туралы мәліметтер

Ансар Нұржанұлы Бақытжанов* – «Автоматтандыру және басқару» мамандығы бойынша докторант, «Жүйелік талдау және басқару» кафедрасы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: bakytzhanovansar4@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/ 0009-0007-8210-9323.

Дана Каримтаевна Сатыбалдина – қауымдастырылған профессор, техника ғылымдарының кандидаты, «Жүйелік талдау және басқару» кафедрасының профессор м.а., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: satybaldina_dk@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5445-4516.

Айна Жанузаковна Закарина – PhD, «Жүйелік талдау және басқару» кафедрасының аға оқытушысы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: zakarina_azh@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-3875-2883.

Нурбол Бейбитович Шмитов – «Автоматтандыру және басқару» мамандығы бойынша докторант, «Жүйелік талдау және басқару» кафедрасы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: nurbol-970817@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6402-9633.

Нұрдаулет Мұратбекұлы Тешебаев – «Интеллектуалды басқару жүйелері» мамандығы бойынша докторант, Жасанды интеллект және Big Data кафедрасы, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: nurdauletteshebaev@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6560-6578.

Сведения об авторах

Ансар Нуржанович Бакытжанов* – докторант, специальность «Автоматизация и управление» кафедры «Системный анализ и управление», Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Республика Казахстан; e-mail: bakytzhanovansar4@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/ 0009-0007-8210-9323.

Дана Каримтаевна Сатыбалдина – ассоциированный профессор, кандидат технических наук, и.о. профессора кафедры «Системный анализ и управление», Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Республика Казахстан; e-mail: satybaldina_dk@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5445-4516.

Айна Жанузаковна Закарина – PhD, старший преподаватель кафедры «Системный анализ и управление», Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Республика Казахстан; e-mail: zakarina_azh@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-3875-2883.

Нурбол Бейбитович Шмитов – докторант, специальность «Автоматизация и управление» кафедры «Системный анализ и управление», Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Республика Казахстан; e-mail: nurbol-970817@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6402-9633.

Нұрдаулет Мұратбекұлы Тешебаев – докторант, специальность «Интеллектуальные системы управления» кафедры Искусственного интеллекта и Big Data, Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, Республика Казахстан; e-mail: nurdaulettеshebaev@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6560-6578.

Information about the authors

Ansar Nurzhanovich Bakytzhanov* – PhD student in Automation and Control, Department of Systems Analysis and Control, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Republic of Kazakhstan; e-mail: bakytzhanovansar4@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/ 0009-0007-8210-9323.

Dana Karimtaevna Satybaldina – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Acting Professor of the Department of Systems Analysis and Control, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Republic of Kazakhstan; e-mail: satybaldina_dk@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5445-4516.

Aina Zhanuzakovna Zakarina – PhD, Senior Lecturer of the Department of Systems Analysis and Control, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Republic of Kazakhstan; e-mail: zakarina_azh@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-3875-2883.

Nurbol Beibitovich Shmitov – PhD student in Automation and Control, Department of Systems Analysis and Control, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Republic of Kazakhstan; e-mail: nurbol-970817@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6402-9633.

Nurdaulet Muratbekuly Teshebayev – PhD student in Intelligent Control Systems, Department of Artificial Intelligence and Big Data, Al-Farabi Kazakh National University, Republic of Kazakhstan; e-mail: nurdaulettеshebaev@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6560-6578.

Редакцияға енуі 01.06.2026
Өңдеуден кейін түсуі 07.07.2026
Жариялауға қабылданды 17.08.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-12

МРТИ: 50.43.19

Б. Копабаева, А. Золотов*, И. Карымсакова, Д. Мясоедов, Р. Назаров
Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А
*e-mail: azol64@mail.ru

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ ВТОРОГО ПОДЪЕМА НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА И ПРЕДИКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Аннотация: *В статье рассматриваются вопросы математического моделирования и оптимизации режимов работы насосных станций второго подъёма в условиях переменного водопотребления городских систем водоснабжения. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения энергоэффективности, снижения потерь воды и обеспечения стабильности гидравлических параметров в условиях неравномерного потребительского спроса. В качестве объекта исследования выбран водозабор «Смычка» города Семей. Разработана динамическая математическая модель системы водоснабжения, включающая насосную станцию второго подъёма, резервуары чистой воды и хлорирования, трубопроводную сеть, модель водопотребления и цифровой двойник объекта. Для повышения точности оценки состояния системы использован фильтр Калмана, а прогнозирование водопотребления реализовано на основе нейронной сети LSTM. Предложена архитектура интеллектуального управления, основанная на консультативном модельно-предиктивном управлении (Advisory MPC), интегрированном с существующей инфраструктурой PLC/SCADA без вмешательства в действующие контуры автоматизации. Эффективность разработанного подхода исследована в трёх эксплуатационных сценариях: номинальном режиме, режиме пикового водопотребления и аварийной перегрузке. Результаты моделирования показали повышение устойчивости системы, снижение энергопотребления на 20-30%, уменьшение числа переключений насосов и улучшение качества поддержания давления. Полученные результаты подтверждают перспективность применения*

©Б. Копабаева, А. Золотов, И. Карымсакова, Д. Мясоедов, Р. Назаров, 2026

цифровых двойников и прогнозирующего управления для модернизации действующих систем водоснабжения.

Ключевые слова: *насосная станция второго подъёма, водоснабжение, математическое моделирование, цифровой двойник, модельно-предиктивное управление, MPC, фильтр Калмана, LSTM; прогнозирование водопотребления.*

Введение

В условиях глобального изменения климата и истощения природных ресурсов, обеспечение устойчивого функционирования систем городского водоснабжения становится одной из наиболее критических задач для мирового сообщества. Согласно прогнозам Организации Объединенных Наций, к 2050 году более 68% населения планеты будет проживать в городах, что создаст беспрецедентную нагрузку на существующую инженерную инфраструктуру [1]. В этом контексте вода перестает рассматриваться просто как товар и переходит в категорию стратегического ресурса, управление которым требует внедрения инновационных подходов и высокотехнологичных решений. Мировая практика показывает, что традиционные методы эксплуатации водопроводных сетей, основанные на реактивном подходе (устранение аварий по факту их возникновения), более не являются эффективными. Современные мегаполисы и индустриальные центры сталкиваются с комплексом взаимосвязанных проблем:

• Высокий уровень потерь воды, достигающий в некоторых регионах 30-50% [2].

• Чрезмерное энергопотребление насосных станций, составляющее до 40% от общих операционных расходов коммунальных предприятий.

• Физический и моральный износ распределительных сетей и оборудования.

• Необходимость обеспечения строгих стандартов качества воды в условиях меняющегося состава исходных источников.

Традиционно водозаборные и насосные станции оснащаются локальными системами автоматизации, основанными на ПИД-регуляторах, релейной логике или простых алгоритмах регулирования давления, реализованных в программируемых логических контроллерах (ПЛК). Эти системы в первую очередь предназначены для поддержания заданного уровня давления или уровня воды в резервуаре с использованием информации обратной связи от полевых датчиков.

Хотя такие решения широко применяются на практике благодаря своей простоте и надежности, в современных условиях эксплуатации они имеют существенные ограничения.

Во-первых, городские системы водоснабжения работают в условиях существенной неопределенности, вызванной постоянным изменением потребительского спроса. Суточный спрос, сезонные колебания, колебания промышленного потребления, аварийный отбор воды и утечки в сети приводят к возникновению крайне нестационарных гидравлических условий. Во многих муниципалитетах почасовая потребность может отличаться на 30-60% по сравнению со средними значениями, в то время как кратковременные периоды пикового потребления приводят к резким перепадам давления во всей сети.

Во-вторых, гидравлические возмущения распространяются по обширным трубопроводным системам, характеризующимся нелинейными потерями напора, изменяющимися рабочими точками и запоздалой реакцией. Следовательно, управляющие воздействия, применяемые на насосных станциях, могут повлиять на сеть только после значительных временных задержек, что затрудняет регулирование в режиме реального времени.

В-третьих, значительная часть действующей в настоящее время инфраструктуры водоснабжения была введена в эксплуатацию несколько десятилетий назад. На многих насосных станциях по-прежнему используются устаревшие насосы, приводы с регулируемой частотой вращения, изношенные трубопроводные системы и устаревшие архитектуры PLC/SCADA. В таких условиях полная замена инфраструктуры автоматизации зачастую экономически нецелесообразна.

В-четвертых, рост цен на энергоносители и ужесточение требований к экологичности превратили энергоэффективность в одну из основных задач эксплуатации. Поскольку на долю насосных станций приходится значительная доля общего потребления энергии муниципальными водоканалами, даже небольшие улучшения в управлении могут принести существенную экономическую выгоду.

Помимо технологических ограничений, станции второго водозабора сталкиваются с практическими проблемами эксплуатации.

Гидравлические удары. Из-за быстрого срабатывания клапанов и внезапных изменений расхода, на станциях второго водозабора часто возникают гидравлические удары, которые создают волны давления, распространяющиеся по системе. Эти волны могут достигать давлений, в несколько раз превышающих номинальное давление системы, что может привести к повреждению оборудования и утечкам в трубопроводах [3].

Нестабильность давления. Из-за переменного спроса и ограничений оборудования, давление в системе часто колеблется значительно. Это может привести к неудовлетворению потребителей (когда давление слишком низкое) или к повреждению оборудования (когда давление слишком высокое).

Энергонеффективность. Традиционные системы управления часто работают неоптимально с точки зрения энергопотребления. Например, система может поддерживать давление выше необходимого, чтобы гарантировать надежное водоснабжение, что приводит к избыточному энергопотреблению.

Утечки и потери воды. Из-за высокого давления и гидравлических ударов, в системе часто возникают утечки.

Современные системы управления должны одновременно:

– поддерживать требуемое давление и надежность подачи воды;
– удовлетворять эксплуатационным требованиям насосов и резервуаров;
– минимизировать потребление энергии;
– учитывать неопределенность спроса;
– работать в рамках существующей инфраструктуры промышленной автоматизации.

Обычные контроллеры с обратной связью не предназначены специально для решения таких задач многоцелевой оптимизации. Системы на основе ПИД-регуляторов реагируют только после возникновения отклонений и не учитывают в явном виде изменение спроса в будущем, гидравлические ограничения или прогнозируемые сбои. В результате часто происходит чрезмерное переключение насоса, ненужное потребление энергии, колебания давления и неоптимальное использование резервуара.

Исследования, опубликованные в научных журналах, подчеркивают, что переход к адаптивному управлению давлением является наиболее экономически эффективным способом борьбы с потерями воды в изношенных городских сетях [4, 5].

Однако, несмотря на значительный прогресс в исследованиях ПДК, практическое применение в муниципальных системах водоснабжения остается ограниченным. Большинство опубликованных исследований предполагают наличие современной инфраструктуры автоматизации и прямого доступа контроллера к полевому оборудованию. В отличие от этого, многие существующие насосные станции работают с устаревшими системами PLC/SCADA, где замена нижнего уровня управления потребовала бы значительных капиталовложений, обширных работ по вводу в эксплуатацию и повышенного эксплуатационного риска.

Таким образом, целью исследования является разработка интеллектуальной архитектуры управления, способной обеспечить преимущества прогнозирующего управления при сохранении существующей инфраструктуры промышленной автоматизации.

Для решения этой задачи в данной работе предлагается консультативная платформа MPC, интегрированная с цифровым двойником системы водоснабжения. Вместо прямой замены существующих контроллеров PLC, уровень MPC работает на диспетчерском уровне и генерирует оптимальные рекомендации по эксплуатации на основе прогнозируемого спроса, гидравлических условий и ограничений оборудования. Существующие контуры управления на базе ПЛК остаются неизменными, обеспечивая эксплуатационную надежность и облегчая постепенное внедрение в реальных промышленных условиях.

Для разработки предлагаемой стратегии управления необходимо создать математическую модель системы водоснабжения, включающая насосную станцию второго подъема, резервуары чистой воды, трубопроводную сеть и систему обеззараживания, обеспечивающая описание гидравлических и технологических процессов в динамике.

Республика Казахстан, являясь страной с дефицитом водных ресурсов и огромной территорией, сталкивается с уникальным набором проблем в секторе водоснабжения. Государственная политика Казахстана, отраженная в «Концепции попереходу к зеленой экономике» и национальном проекте «Сильные регионы – драйвер развития страны», ставит амбициозные цели по 100% обеспечению населения качественной питьевой водой к 2025-2026 годам [6].

В этом контексте город Семей представляет собой характерный пример крупного индустриально-административного центра, где проблемы водоснабжения требуют немедленного научного и инженерного вмешательства.

Объект исследования: Водозабор «Смычка» в г. Семей. Город Семей, расположенный в области Абай, является одним из ключевых узлов Восточного Казахстана. Его система водоснабжения базируется на нескольких крупных водозаборах, среди которых «Смычка» играет ведущую роль, обеспечивая водой значительную часть правобережной зоны города. Техническое состояние сетей Семея характеризуется высоким уровнем износа (64,5%), что приводит к частым авариям и значительным потерям воды [7].

Водозабор «Смычка», оснащенный насосными станциями первого и второго подъемов, является критическим объектом, от стабильности работы которого зависит жизнеобеспечение десятков тысяч граждан.

В последние годы на водозаборе «Смычка» были предприняты шаги по автоматизации: внедрена система АСУ ТП на базе контроллеров СТК-500 и установлены частотные преобразователи для мощных насосов Д1250-63 [8, 9]. Однако, несмотря на наличие аппаратной базы, потенциал системы используется не полностью. Отсутствие динамической математической модели, которая связывала бы режимы работы насосов с гидравлическим состоянием городской сети, не позволяет реализовать полноценное прогностическое управление.

Материалы и методы исследования. В работе использованы методы математического и имитационного моделирования, теория автоматического управления, модельно-предиктивное управление (MPC), фильтрация состояния на основе фильтра Калмана, методы машинного обучения (LSTM), технология цифровых двойников, сравнительный и сценарный анализ. Исследования выполнены в среде MATLAB/Simulink на основе разработанной динамической модели насосной станции второго подъёма системы городского водоснабжения.

Система водоснабжения представлена как взаимосвязанный набор динамических компонентов, состоящий из:

- насосных агрегатов насосной станции второй ступени;
- резервуар для хранения чистой воды;
- резервуар для хлорирования;
- трубопроводная сеть с учетом гидравлических потерь;
- модель потребительского спроса**.**

Для повышения точности цифрового двойника и обеспечения устойчивой работы MPC-регулятора в условиях шумов измерений в структуру системы управления включён фильтр Калмана. Фильтр выполняет оценивание вектора состояния объекта на основе математической модели и данных датчиков, обеспечивая подавление измерительных шумов, компенсацию неопределённостей и синхронизацию цифрового двойника с реальным объектом. Использование фильтра Калмана позволяет повысить точность прогнозирования состояний системы и улучшить качество модельно-предиктивного управления в условиях изменяющейся гидравлической нагрузки.

Структурная схема данной модели, состоящая из стандартных блоков Simulink MatLab представлена на рисунке 1.

Получаем следующую логику взаимодействия блоков в единой системе

1. Фильтр Калмана непрерывно вычисляет x^(t) по измерениям и модели.
2. Блок обнаружения утечек анализирует x^(t) и/или сырые расходы, вычисляя ΔQ, формирует leak_flag и dQ.
3. Сигнализация реагирует на leak_flag, оповещая оператора и записывая событие.
4. LSTM принимает x^(t) и dQ и выдаёт прогноз $ypred$.

5. Регулятор (MPC,ПИД) использует *ypred* для упреждающей коррекции управляющих воздействий.

Таким образом, система приобретает свойства интеллектуального цифрового двойника, способного не только оценивать текущее состояние, но и предвидеть будущие проблемы, активно на них реагируя.

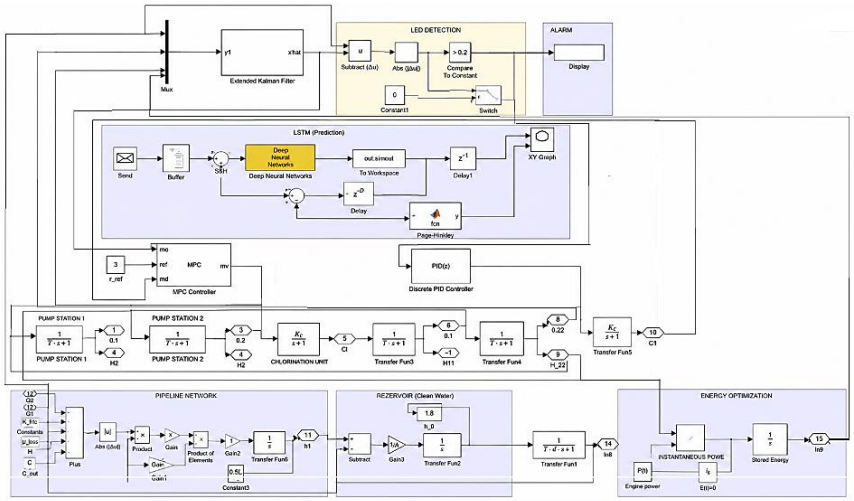


Рисунок 1 – Структурная схема системы водоснабжения

Цифровой двойник представляет собой математическую копию насосной станции.

На вход модели поступают:

$Q_{demand}(t)$ – текущее потребление воды,

f(t) – частота вращения насосов,

H(t) – измеренное давление.

На выходе вычисляются:

H^(t) – прогнозируемое давление,

Q^(t) – прогнозируемый расход,

P^(t) – ожидаемое энергопотребление.

Цифровой двойник позволяет прогнозировать поведение системы до фактического возникновения изменений режима.

Для прогнозирования будущего водопотребления используется LSTM-модель.

На её вход поступают:

- архив расхода воды из Excel файла;
- временные характеристики;
- сезонные факторы;
- статистика потребления.

На выходе формируется прогноз:

$Q_{forecast}(t+i)$ на горизонт прогнозирования.

Полученный прогноз является измеряемым возмущением для MPC-регулятора.

Центральным элементом интеллектуальной системы является MPC-регулятор.

Однако в предлагаемой архитектуре MPC не имеет прямого доступа к исполнительным механизмам.

На вход MPC поступают:

- текущее состояние системы;
- данные цифрового двойника;
- прогноз водопотребления;
- эксплуатационные ограничения.

На каждом шаге MPC решает задачу оптимизации

$$\min J = \sum_{k=1}^{N_p}(H(t+k) - H_{ref}(t+k))^2 + \lambda \sum_{k=0}^{N_c}(\Delta u(t+k))^2 \quad (1)$$

Где N_p горизонт прогноза,

N_c – горизонт управления

t – текущий момент времени, сек

H – уровень воды в резервуаре, м,

H_{ref}=2 м, эталонное значение уровня,

Δu – изменение частоты вращения насоса, об/сек,

λ – весовой коэффициент.

Весовой коэффициент λ, определяет влияние изменения управляющего воздействия на значение целевой функции MPC, выбирается на основании серии вычислительных экспериментов.

Для городской насосной станции с ЧРП и целью энергосбережения обычно выбирают λ=0,5-2 [10]. Анализ показал, что при λ=1 достигается наилучший компромисс между точностью поддержания давления и энергопотреблением насосных агрегатов. При меньших значениях наблюдались чрезмерно частые изменения частоты вращения насосов, тогда как увеличение λ свыше 2 приводило к заметному ухудшению качества регулирования давления. Поэтому во всех дальнейших исследованиях использовалось значение λ=1.

Функционал качества включает:

- отклонение уровня от заданного значения;
- энергопотребление насосов;
- плавность изменения управления.

Результатом решения является не управляющее воздействие на насосы, а рекомендуемая уставка рекомендации MPC регулирования частоты вращения насосов:

$$f_{set}^{MPC}$$

Информационный обмен в системе осуществляется следующим образом.

От объекта к цифровому двойнику

Передаются:

- давление;
- расход;
- состояние насосов;
- энергопотребление.

От цифрового двойника к MPC

Передаются:

- прогноз состояний;
- оценка гидравлического режима;
- ожидаемые ограничения.

От нейросети к MPC

Передаются:

$Q_{forecast}$ – прогноз будущего спроса.

От MPC к оператору

Передаются:

- рекомендуемые уставки;
- ожидаемое энергопотребление;
- прогноз давления;
- рекомендации по работе насосов.

От оператора к PLC

Передаются только подтверждённые уставки.

После подтверждения оператором новая уставка поступает в существующий ПИД-регулятор PLC.

Таким образом MPC функционирует как интеллектуальный советующий модуль.

Он анализирует состояние системы, прогнозирует развитие ситуации и предлагает оптимальные действия, но окончательное управление остаётся за существующей системой автоматизации.

Данное решение имеет принципиальное практическое значение.

Водозабор в городе Семей эксплуатируют: контроллеры Owen

Полная замена автоматизированной системы управления требует:

- остановки объекта;
- перепроектирования автоматики;

• повторной сертификации;
• значительных финансовых затрат.

Поэтому прямое внедрение MPC экономически нецелесообразно.

В предлагаемой работе интеллектуальный уровень располагается поверх существующей автоматизации и не требует изменения:

• PLC-программ;
• ПИД-контуров;
• схем электроснабжения;
• алгоритмов аварийной защиты.

Фактически модернизации подвергается только уровень поддержки принятия решений.

Ключевой особенностью разработанной системы является разделение функций прогнозирования и непосредственного управления.

MPC не управляет насосами напрямую.

Насосами по-прежнему управляет существующий PLC с традиционными ПИД-регуляторами.

MPC выполняет более высокий уровень интеллектуального управления:

• прогнозирует изменение спроса;
• рассчитывает оптимальный режим работы;
• оценивает энергопотребление;
• формирует рекомендации оператору.

Благодаря этому достигаются преимущества прогнозирующего управления – снижение энергопотребления, уменьшение числа переключений насосов и повышение стабильности давления – при полном сохранении существующей промышленной инфраструктуры и без вмешательства в критически важные контуры автоматизации. Именно это обстоятельство является главным практическим вкладом предлагаемой работы и обеспечивает её применимость для модернизации действующих систем водоснабжения.

Формирование сценариев испытаний

После разработки математической модели водозабора, цифрового двойника и алгоритма Advisory MPC необходимо оценить эффективность предложенной архитектуры в условиях, максимально приближенных к реальной эксплуатации городской системы водоснабжения.

Водозаборы функционируют в условиях постоянно изменяющегося водопотребления, неравномерного гидравлического режима и возможных аварийных ситуаций. Поэтому для объективной оценки работоспособности разработанной системы был сформирован набор сценариев, охватывающих основные режимы эксплуатации станции второго подъёма.

Выбранные сценарии позволяют последовательно исследовать поведение системы управления при нормальных условиях работы, при существенных изменениях нагрузки и при возникновении нештатных ситуаций. Такой подход обеспечивает оценку не только качества регулирования давления, но и способности системы сохранять энергоэффективность и устойчивость при различных внешних воздействиях.

Сценарий 1 – Номинальный режим эксплуатации

Первый сценарий соответствует штатной работе станции при среднесуточном водопотреблении.

В данном режиме расход воды изменяется незначительно и находится в пределах проектных значений. Основная задача эксперимента заключается в проверке способности системы поддерживать требуемое давление при минимальном энергопотреблении насосного оборудования.

Номинальный режим является базовым сценарием, относительно которого впоследствии оценивается влияние более сложных эксплуатационных условий. Кроме того, именно в этом режиме определяется исходный уровень энергопотребления и качество регулирования, используемые в дальнейшем для сравнительного анализа. Изменение параметров представлено на рисунке 2.

Сценарий 2 – Пиковое потребление воды

Второй сценарий моделирует характерные для городских систем водоснабжения утренние и вечерние пики водоразбора (рис. 3).

Согласно эксплуатационным данным водоканалов, в отдельные периоды суток расход воды может превышать среднее значение на 40–60 %. Подобные изменения приводят к быстрому снижению давления в распределительной сети и требуют оперативной коррекции режима работы насосов.

Цель данного сценария заключается в оценке способности системы управления компенсировать резкие изменения потребительского спроса без нарушения требований по давлению и без избыточного увеличения энергопотребления.

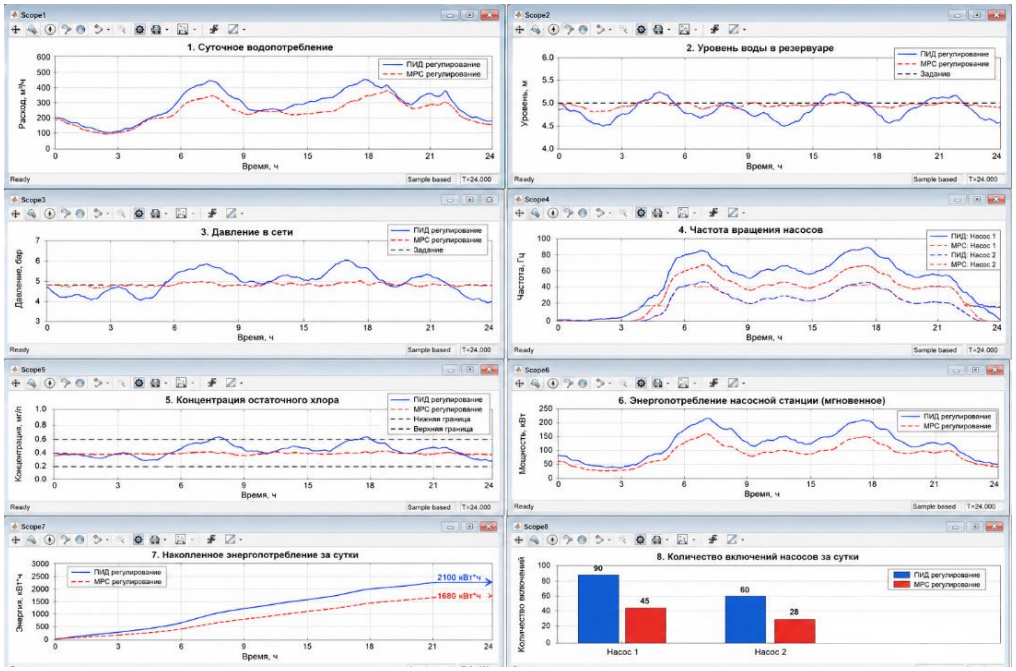


Рисунок 2 – Работа стации в номинальном режиме

Особый интерес представляет сравнение реактивного управления на основе ПИД-регулятора и прогнозирующего управления MPC, использующего информацию о будущем изменении нагрузки.

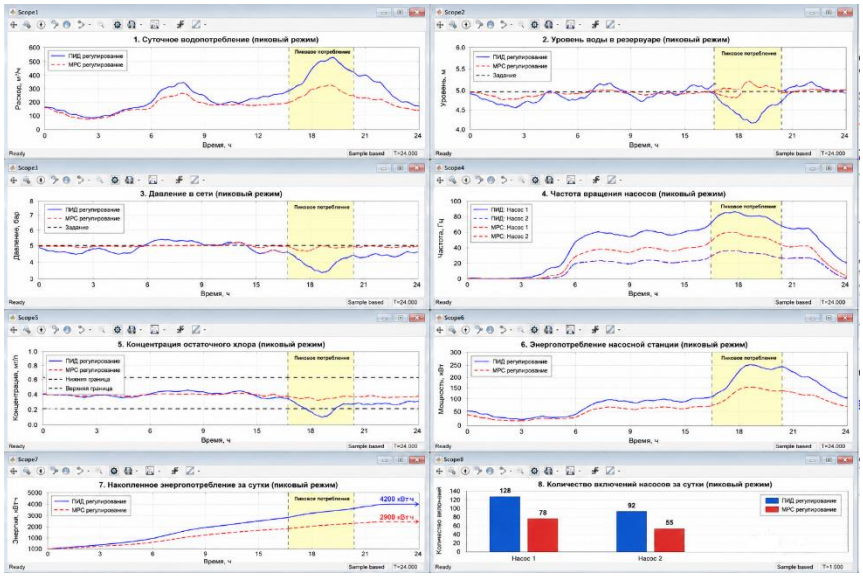


Рисунок 3 – Исследование работы интеллектуальной насосной станции второго подъёма в режиме пикового водопотребления

Сценарий 3 – Аварийная перегрузка

Третий сценарий предназначен для исследования устойчивости системы в условиях нештатных режимов эксплуатации (рис. 4).

В рамках моделирования рассматривается резкое увеличение потребления воды, сопровождающееся существенным отклонением гидравлических параметров от номинального режима. Подобные ситуации могут возникать при авариях на сетях, пожаротушении, технологических нарушениях или резком изменении схемы водоснабжения.

Аварийная перегрузка представляет собой наиболее сложный режим работы системы, поскольку одновременно требует поддержания допустимого давления, соблюдения ограничений насосного оборудования и предотвращения чрезмерного роста энергопотребления.

Результаты данного сценария позволяют оценить робастность предложенной архитектуры управления и определить её границы применимости в условиях значительных возмущений.

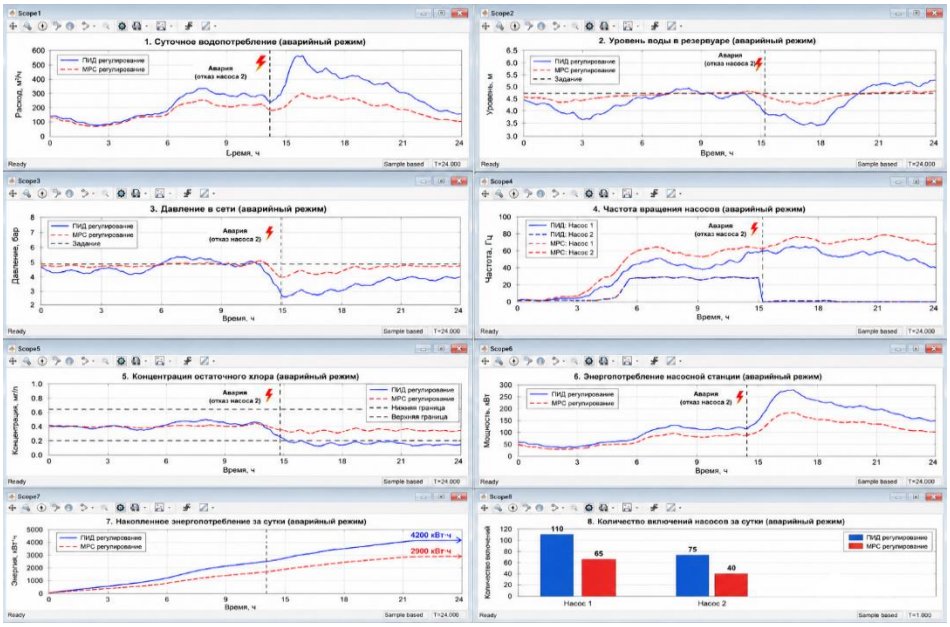


Рисунок 4 – Аварийный режим работы станции

Обсуждение результатов исследования.

Проведённые исследования интеллектуальной системы управления насосной станцией второго подъёма позволили оценить эффективность применения модельно-предиктивного управления (MPC) в различных режимах эксплуатации системы водоснабжения. Анализ результатов выполнен для трёх характерных сценариев функционирования: номинального суточного режима, режима пикового водопотребления и аварийного режима, связанного с отказом одного из насосных агрегатов.

Полученные результаты показывают, что эффективность системы управления существенно зависит от способности алгоритма учитывать будущие изменения нагрузки. В отличие от традиционного ПИД-регулятора, реагирующего только на уже возникшую ошибку регулирования, MPC использует математическую модель объекта и прогноз изменения водопотребления, что позволяет формировать управляющие воздействия заблаговременно.

В условиях нормального суточного режима оба алгоритма обеспечивают выполнение основных технологических требований. Однако даже в этом случае MPC демонстрирует более высокое качество регулирования. Колебания уровня воды в резервуаре уменьшаются в несколько раз, давление в сети поддерживается ближе к заданному значению, а частота вращения насосов изменяется более плавно. Это приводит к снижению количества коммутаций насосного оборудования и уменьшению механического износа агрегатов. Кроме того, за счёт оптимизации режимов работы насосов достигается снижение суточного энергопотребления примерно на 20 % по сравнению с традиционным управлением.

Наиболее заметные преимущества MPC проявляются в режиме пикового водопотребления. В данном сценарии нагрузка на насосную станцию возрастает на 50 %, что приводит к значительным возмущениям гидравлического режима. ПИД-регулятор реагирует

на увеличение расхода с запаздыванием, вследствие чего наблюдаются существенные отклонения уровня воды и давления в сети. В противоположность этому MPC использует прогноз водопотребления и заранее подготавливает систему к ожидаемому росту нагрузки. Это позволяет поддерживать давление практически на постоянном уровне, избегать глубокого опорожнения резервуара и существенно снизить максимальную потребляемую мощность насосов. Полученные результаты показывают, что использование прогнозирующего управления обеспечивает снижение энергозатрат примерно на 30 % даже при значительном росте водоразбора.

Особый интерес представляют результаты моделирования аварийного режима. Отказ одного из рабочих насосов является типичной нештатной ситуацией для систем водоснабжения и часто приводит к ухудшению качества предоставляемой услуги. Проведённое исследование показало, что традиционный ПИД-регулятор не способен эффективно компенсировать внезапное снижение производительности станции. После возникновения аварии наблюдаются значительные провалы давления, интенсивное опорожнение резервуара и резкое увеличение нагрузки на оставшееся оборудование. В случае применения MPC система сохраняет устойчивость благодаря быстрому перераспределению нагрузки между исправными насосами и использованию резервного объёма воды. Даже при частичной потере производительности насосной станции основные технологические параметры остаются в допустимых пределах.

Важным результатом исследования является обеспечение стабильности процесса обеззараживания воды. Во всех рассмотренных сценариях MPC поддерживает концентрацию остаточного хлора в нормативном диапазоне, тогда как при использовании ПИД-регулятора в режимах повышенной нагрузки и аварийных воздействий наблюдаются существенные отклонения от требуемых значений. Это свидетельствует о возможности применения единой прогнозирующей системы для комплексного управления как гидравлическими, так и технологическими параметрами водоснабжения.

Сравнение энергетических показателей во всех сценариях подтверждает высокую эффективность интеллектуального управления. Наибольшая экономия достигается в аварийных и пиковых режимах, когда традиционные методы управления вынуждены работать с большими запасами и значительными перегрузками оборудования. В среднем применение MPC обеспечивает снижение потребления электроэнергии на 20-30%, уменьшение числа переключений насосов на 40-60% и сокращение амплитуды отклонений основных технологических параметров в несколько раз.

Таким образом, результаты моделирования показывают, что интеграция прогнозирования водопотребления, математической модели насосной станции и алгоритма модельно-предиктивного управления позволяет существенно повысить эффективность функционирования насосной станции второго подъёма. Предложенный подход обеспечивает не только снижение эксплуатационных затрат, но и повышение надёжности системы водоснабжения, устойчивости к аварийным воздействиям и качества предоставляемых услуг потребителям.

Вывод

Комплексный анализ трёх сценариев эксплуатации показал, что интеллектуальная система управления на основе MPC превосходит традиционное ПИД-регулирование по всем исследованным показателям. Наибольший эффект достигается в условиях неопределённости и сильных возмущений, когда способность прогнозировать будущие изменения нагрузки становится критически важной. Полученные результаты подтверждают целесообразность внедрения прогнозирующего управления на насосных станциях второго подъёма городских систем водоснабжения как одного из ключевых элементов цифровой трансформации коммунальной инфраструктуры.

Список литературы

1. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. World Urbanization Prospects: The 2018 Revision (ST/ESA/SER.A/420). – New York : United Nations, 2019. – 103 p.

2. Liemberger R. Quantifying the global non-revenue water problem / R. Liemberger, A. Wyatt // Water Supply. – 2019. – Vol. 19, № 3. – P. 831-837. https://doi.org/10.2166/ws.2018.129.

3. Fuertes-Miquel V.S. Hydraulic Transients in Water Distribution Systems / V.S. Fuertes-Miquel // Water. – 2022. – Vol. 14, № 22. – Art. 3612. https://doi.org/10.3390/w14223612.
4. Li Q. Digital Twins for Water Utilities: Architectures, Calibration Workflows and Measured Benefits / Q. Li // International Journal of Mechanical and Electrical Engineering. – 2025. – Vol. 6, № 3. – P. 34-42. https://doi.org/10.62051/ijmee.v6n3.05.
5. Chung G. Reliable water supply system design under uncertainty / G. Chung, K. Lansey, G. Bayraksan // Environmental Modelling & Software. – 2009. – Vol. 24, № 4. – P. 449-462. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2008.08.007.
6. Назарбаев Н.А. Стратегия «Казахстан-2050»: новый политический курс состоявшегося государства: Послание Президента Республики Казахстан – Лидера Нации Н.А. Назарбаева народу Казахстана / Н.А. Назарбаев. – Астана, 14 декабря 2012 г.
7. Семей выходит на финишную прямую качественного водоснабжения в 2025 году [Электронный ресурс] // Yvision.kz. – 2025. – 24 сент. https://yvision.kz/post/semey-vyhodit-na-finishnuyu-pryamuyu-kachestvennogo-vodosnabzheniya-v-2025-godu-1017458 (дата обращения: 21.08.2026).
8. Лукин Н.А. Система управления скважинным водозабором «Смычка» г. Семей / Н.А. Лукин, А.П. Усачев, А.В. Гордейчик // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. – 2018. – № 5(125). – С. 46-51.
9. Ima naliyev, T. Automation of water facilities in Kazakhstan and its solutions / T. Imanaliyev et al // Dilemas Contemporáneos: Educación, Política y Valores. – 2019. – Vol. 7, № 1. – Art. 140.
10. Cahill J. MPC Control of Level and Other Integrating Processes [Электронный ресурс] / J. Cahill // Emerson Automation Experts. – 2010. – 1 Dec. https://www.emersonautomationexperts.com/2010/services-consulting-training/mpc_control_of/ (дата обращения: 21.08.2026).

References

1. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. World Urbanization Prospects: The 2018 Revision (ST/ESA/SER.A/420). – New York : United Nations, 2019. – 103 p.
2. Liemberger R. Quantifying the global non-revenue water problem / R. Liemberger, A. Wyatt // Water Supply. – 2019. – Vol. 19, № 3. – P. 831-837. https://doi.org/10.2166/ws.2018.129.
3. Fuertes-Miquel V.S. Hydraulic Transients in Water Distribution Systems / V.S. Fuertes-Miquel // Water. – 2022. – Vol. 14, № 22. – Art. 3612. https://doi.org/10.3390/w14223612.
4. Li Q. Digital Twins for Water Utilities: Architectures, Calibration Workflows and Measured Benefits / Q. Li // International Journal of Mechanical and Electrical Engineering. – 2025. – Vol. 6, № 3. – P. 34-42. https://doi.org/10.62051/ijmee.v6n3.05.
5. Chung G. Reliable water supply system design under uncertainty / G. Chung, K. Lansey, G. Bayraksan // Environmental Modelling & Software. – 2009. – Vol. 24, № 4. – P. 449-462. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2008.08.007.
6. Nazarbaev N.A. Strategiya «Kazakhstan-2050»: novyi politicheskii kurs sostoyavshegosya gosudarstva: Poslanie Prezidenta Respubliki Kazakhstan – Lidera Natsii N.A. Nazarbaeva narodu Kazakhstana / N.A. Nazarbaev. – Astana, 14 dekabrya 2012 g.
7. Semei vykhodit na finishnuyu pryamuyu kachestvennogo vodosnabzheniya v 2025 godu [Ehlektronnyi resurs] // Yvision.kz. – 2025. – 24 sent. https://yvision.kz/post/semey-vyhodit-na-finishnuyu-pryamuyu-kachestvennogo-vodosnabzheniya-v-2025-godu-1017458 (data obrashcheniya: 21.08.2026).
8. Lukin N.A. Sistema upravleniya skvazhinnym vodozaborom «Smychka» g. Semei / N.A. Lukin, A.P. Usachev A.V. Gordeichik // Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie. – 2018. – № 5(125). – S. 46-51.
9. Ima naliyev, T. Automation of water facilities in Kazakhstan and its solutions / T. Imanaliyev et al // Dilemas Contemporáneos: Educación, Política y Valores. – 2019. – Vol. 7, № 1. – Art. 140.
10. Cahill J. MPC Control of Level and Other Integrating Processes [Ehlektronnyi resurs] / J. Cahill // Emerson Automation Experts. – 2010. – 1 Dec. https://www.emersonautomationexperts.com/2010/services-consulting-training/mpc_control_of/ (data obrashcheniya: 21.08.2026).

Б. Көпабаева, А. Золотов*, И. Қарымсақова, Д. Мясоедов, Р. Назаров
Шәкәрім университеті, 071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинка к-сі, 20 А
*e-mail: azol64@mail.ru

ЦИФРЛЫҚ ЕГІЗ ЖӘНЕ ПРЕДИКТИВТІ БАСҚАРУ НЕГІЗІНДЕ ЕКІНШІ КӨТЕРІЛІМДЕГІ СОРҒЫ СТАНЦИЯЛАРЫНЫҢ ЖҰМЫС РЕЖИМДЕРІН ИНТЕЛЛЕКТУАЛДЫ БАСҚАРУ ЖӘНЕ ОҢТАЙЛАНДЫРУ

Мақалада қалалық сумен жабдықтау жүйелерінің ауыспалы су тұтынуы жағдайында екінші көтергіш сорғы станцияларының жұмыс режимдерін математикалық модельдеу және оңтайландыру мәселелері қарастырылады. Зерттеудің өзектілігі энергия тиімділігін арттыру, су шығынын азайту және біркелкі емес тұтынушылық сұраныс жағдайында гидравликалық параметрлердің тұрақтылығын қамтамасыз ету қажеттілігіне байланысты. Зерттеу нысаны ретінде Семей қаласының "садақ" су қабылдағышы таңдалды. Сумен жабдықтау жүйесінің динамикалық математикалық моделі жасалды, оған екінші көтеру сорғы станциясы, таза су және хлорлау цистерналары, құбыр желісі, суды тұтыну моделі және объектінің цифрлық егізі кіреді. Жүйенің күйін бағалаудың дәлдігін арттыру үшін Калман сүзгісі пайдаланылды және суды тұтынуды болжау lstm нейрондық желісі негізінде жүзеге асырылады. Қолданыстағы автоматтандыру тізбектеріне араласпай, қолданыстағы PLC/SCADA инфрақұрылымымен біріктірілген консультативтік модельдік-болжамды басқаруға (Advisory MPC) негізделген интеллектуалды басқару архитектурасы ұсынылған. Әзірленген тәсілдің тиімділігі үш пайдалану сценарийінде зерттелді: номиналды режим, суды тұтынудың ең жоғары режимі және апаттық шамадан тыс жүктеме. Модельдеу нәтижелері жүйенің тұрақтылығының жоғарылауын, қуат тұтынудың 20-30% төмендеуін, сорғылардың ауысу санының азаюын және қысымды ұстап тұру сапасының жақсарғанын көрсетті. Алынған нәтижелер қолданыстағы сумен жабдықтау жүйелерін жаңғырту үшін цифрлық егіздер мен болжамды басқаруды қолдану перспективасын растайды.

Түйін сөздер: *екінші көтеру сорғы станциясы; сумен жабдықтау; математикалық модельдеу; сандық егіз; модельдік болжамды басқару; MPC; Калман сүзгісі; LSTM; су тұтынуды болжау.*

B. Kopabayeva, A. Zolotov*, I. Karymsakova, D. Myasoedov, R. Nazarov
Shakarim University, 071412, Republic of Kazakhstan, Semey, Glinka str., 20A
*e-mail: azol64@mail.ru

INTELLIGENT CONTROL AND OPTIMIZATION OF SECOND-LIFT PUMPING STATION OPERATING MODES BASED ON A DIGITAL TWIN AND PREDICTIVE CONTROL

The article discusses the issues of mathematical modeling and optimization of the modes of operation of pumping stations of the second rise in conditions of variable water consumption of urban water supply systems. The relevance of the study is due to the need to increase energy efficiency, reduce water losses and ensure the stability of hydraulic parameters in conditions of uneven consumer demand. The Smychka water intake in Semey was chosen as the object of the study. A dynamic mathematical model of the water supply system has been developed, including a second-lift pumping station, clean water and chlorination tanks, a pipeline network, a water consumption model, and a digital twin of the facility. To improve the accuracy of the assessment of the system's condition, a Kalman filter was used, and water consumption forecasting was implemented based on the LSTM neural network. An intelligent control architecture based on advisory model-predictive control (Advisory MPC) is proposed, integrated with the existing PLC/SCADA infrastructure without interfering with existing automation circuits. The effectiveness of the developed approach has been investigated in three operational scenarios: nominal mode, peak water consumption mode and emergency overload. The simulation results showed an increase in the stability of the system, a reduction in energy consumption by 20-30%, a reduction in the number of pump switches and an improvement in the quality of pressure maintenance. The results obtained confirm the prospects of using digital twins and predictive management for the modernization of existing water supply systems.

Key words: *second-lift pumping station, water supply, mathematical modeling, digital twin, model-predictive control, MPC, Kalman filter, LSTM, energy efficiency, forecasting of water consumption.*

Сведения об авторах

Бахытгуль Кадырхановна Копабаева – докторант кафедры «Автоматизация и информационные технологии», Шәкәрім университет, Семей, Республика Казахстан; e-mail: kbahyt_73@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-5387-507X.

Александр Дмитриевич Золотов* – кандидат технических наук, ассоциированный профессор кафедры «Автоматизация и информационные технологии», Шәкәрім университет, Семей, Республика Казахстан; e-mail: azol64@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9751-8161.

Индира Бекеновна Карымсакова – PhD, ассоциированный профессор кафедры «Автоматизация и информационные технологии», Шәкәрім университет, Семей, Республика Казахстан; e-mail: indviki@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1496-3188.

Дмитрий Викторович Мясоедов – старший преподаватель кафедры «Автоматизация и информационные технологии», Шәкәрім университет, Семей, Республика Казахстан; e-mail: dmitriy880@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-3279-0994.

Рашид Нагимович Назаров – преподаватель кафедры «Автоматизация и информационные технологии», Шәкәрім университет, Семей. Қазақстан; e-mail: naz-2009@yandex.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9751-8161.

Авторлар туралы мәліметтер

Бақытгүл Қадырханқызы Копабаева – «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасының докторанты, Шәкәрім университеті, Семей, Қазақстан Республикасы; e-mail: kbahyt_73@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-5387-507X.

Александр Дмитриевич Золотов* – техника ғылымдарының кандидаты, «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Шәкәрім университеті, Семей, Қазақстан Республикасы; e-mail: azol64@mail.ru. ORCID:https://orcid.org/0000-0001-9751-8161.

Индира Бекенқызы Қарымсақова – PhD, «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Шәкәрім университеті, Семей, Қазақстан Республикасы; e-mail: indviki@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1496-3188.

Дмитрий Викторович Мясоедов – «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасының аға оқытушысы; Шәкәрім университеті, Семей, Қазақстан Республикасы; e-mail: dmitriy880@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-3279-0994.

Рашид Нағимұлы Назаров – «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасының оқытушысы, Shakarim university, Семей. Қазақстан; e-mail: naz-2009@yandex.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9751-8161.

Information about the authors

Bakhytgul Kopabayeva – doctoral student at the Department of Automation and Information Technologies, Shakarim University, Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: kbahyt_73@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-5387-507X.

Alexander Zolotov* – candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Automation and Information Technologies, Shakarim University, Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: azol64@mail.ru. ORCID:https://orcid.org/0000-0001-9751-8161.

Indira Karymsakova – PhD, associate professor at the department of Automation and Information Technologies, Shakarim University, Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: indviki@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1496-3188.

Dmitry Myasoedov – Senior Lecturer at the Department of Automation and Information Technology, Shakarim University, Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: dmitriy880@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-3279-0994.

Nazarov Rashid – Lecturer at the Department of Automation and Information Technology, Shakarim University, Semey. Kazakhstan; e-mail: naz-2009@yandex.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9751-8161.

Поступила в редакцию 01.06.2026
Поступила после доработки 01.08.2026
Принята к публикации 18.08.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-13

МРНТИ: 59.14.31

CC BY 4.0
Check for updates

Е. Жантлесов[*], С. Алтынбек[2], В. Грузин[1], А.Тогусов[3], М. Шекеев[4]
[1]ТОО «R&D Центр» «Казахстан инжиниринг»,
Республика Казахстан, г. Астана, улица Ауэзова 2, н.п.1.
[2]ESIL University-Astana, Республика Казахстан, г. Астана, ул. А. Жубанова, 7
[3]Департамент военного образования и науки МО РК,
010000, Республика Казахстан, г. Астана, пр. Достык, 14
[4]Школа № 220, Республика Казахстан, г. Алматы
[*]e-mail: Yerbolzh@mail.ru

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОЙ АРХИТЕКТУРЫ МНОГОКАНАЛЬНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО МОДУЛЯ СИНХРОННОЙ РЕГИСТРАЦИИ СИГНАЛОВ

Аннотация: *В статье представлена программно-аппаратная архитектура многоканального измерительного модуля, предназначенного для синхронной регистрации,*

©Е. Жантлесов, С. Алтынбек, В. Грузин, А.Тогусов, М. Шекеев, 2026

аппаратной обработки и передачи цифровых данных. Предложенная архитектура основана на использовании восьми аналого-цифровых преобразователей AD9226 и программируемой логической интегральной схемы Xilinx Spartan-6 XC6SLX9, обеспечивающей синхронный захват данных, формирование цифровых кадров и их передачу по двухпроводному интерфейсу DATA–CLK. Разработан кадровый протокол передачи данных, обеспечивающий контроль последовательности кадров, автоматическое восстановление синхронизации при ошибках передачи и возможность масштабирования системы. Изготовлен и экспериментально исследован прототип восьмиканального измерительного модуля, подтвердивший корректность синхронной регистрации сигналов, устойчивость передачи данных и работоспособность FPGA-алгоритмов и специализированного программного обеспечения. Полученные результаты подтверждают возможность применения предложенной архитектуры при создании масштабируемых многоканальных информационно-измерительных систем для цифровой обработки сигналов.

Статья подготовлена в рамках выполнения научного проекта грантового финансирования на 2024-2026 годы ИРН AP 234042/0223 «Обоснование параметров и разработка системы обнаружения и визуализации источников радиоизлучения» (исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан).

Ключевые слова: *программно-аппаратная архитектура, многоканальный измерительный модуль, синхронная регистрация сигналов, FPGA; Xilinx Spartan-6, аналого-цифровое преобразование, цифровая обработка сигналов, кадровый протокол, многоканальные информационно-измерительные системы.*

Введение

Развитие цифровых информационно-измерительных систем сопровождается увеличением требований к скорости регистрации сигналов, объёму обрабатываемой информации и точности пространственного анализа. Многоканальная синхронная регистрация данных сегодня является основой работы широкого класса технических систем, включая ультразвуковую диагностику, средства неразрушающего контроля, интеллектуальные транспортные комплексы, робототехнические системы, беспилотные транспортные средства, цифровые антенные решётки, системы радиочастотного мониторинга и оборудование для настройки базовых станций беспроводной связи.

Объединяющим признаком таких систем является наличие нескольких пространственно разнесённых приёмных каналов, данные с которых должны регистрироваться одновременно с высокой временной точностью [1]. Только при выполнении этого условия становится возможным применение методов цифрового формирования диаграммы направленности, пространственной фильтрации, корреляционной обработки, когерентного накопления и определения координат источников сигналов. Поэтому качество синхронизации измерительных каналов и стабильность их характеристик оказывают непосредственное влияние на точность последующей обработки.

В настоящее время доступны различные платформы сбора данных и программно-определяемые радиосистемы, однако большинство из них рассчитано либо на небольшое число каналов, либо требует применения дорогостоящих высокоскоростных аналого-цифровых преобразователей и программируемых логических интегральных схем. Кроме того, коммерческие решения нередко содержат функции, не востребованные в специализированных измерительных комплексах, что приводит к увеличению стоимости оборудования и ограничивает возможности его адаптации под конкретные задачи.

Одним из эффективных способов построения многоканальных измерительных систем является использование модульной архитектуры. В этом случае отдельные измерительные модули выполняют синхронную регистрацию сигналов, формирование цифровых кадров и передачу информации в вычислительную систему. Такой подход позволяет рационально использовать аппаратные ресурсы, упростить модернизацию комплекса и при необходимости увеличить количество измерительных каналов без изменения принципов построения всей системы.

В настоящей работе рассматривается архитектура восьмиканального измерительного модуля, предназначенного для синхронной регистрации промежуточных сигналов с частотой до 5 МГц [2]. При разработке устройства были определены основные параметры системы, включая частоту дискретизации, разрядность аналого-цифрового преобразования, объём регистрируемых данных и аппаратную платформу цифровой обработки. Все операции синхронного захвата информации, формирования цифровых кадров и передачи данных

реализованы аппаратно на базе программируемой логической интегральной схемы, что обеспечивает детерминированное время обработки и позволяет использовать модуль в составе масштабируемых многоканальных измерительных комплексов.

Целью работы является разработка и экспериментальная проверка восьмиканального измерительного модуля, обеспечивающего синхронную регистрацию промежуточных сигналов, аппаратное формирование цифровых кадров и передачу данных в вычислительную систему для их последующей пространственной обработки и анализа.

Методы и материалы

Методика разработки измерительного модуля предусматривает синхронную регистрацию аналоговых сигналов по нескольким измерительным каналам с их последующим аналого-цифровым преобразованием, аппаратной обработкой и передачей результатов в вычислительную систему. Такой подход предназначен для построения многоканальных измерительных комплексов, в которых пространственная обработка сигналов требует высокой точности определения амплитудных и фазовых соотношений между каналами. Достижение необходимой точности обеспечивается синхронной регистрацией сигналов и идентичностью характеристик всех измерительных трактов [3-5].

Разработка измерительного модуля проводилась поэтапно. На первом этапе были определены требования к параметрам регистрации сигналов и сформированы основные технические характеристики системы. Далее выполнен выбор элементной базы, после чего разработана аппаратная архитектура устройства и изготовлен экспериментальный образец. Заключительным этапом стали экспериментальные исследования, направленные на проверку работоспособности разработанного модуля.

Структурная схема измерительной системы представлена на рисунке 1.

Разработанный модуль включает восемь независимых каналов аналого-цифрового преобразования, синхронизируемых общим источником тактовой частоты. В каждом канале используется аналого-цифровой преобразователь AD9226, обеспечивающий регистрацию входных сигналов. Управление процессом синхронного сбора данных, их временное буферизование, формирование цифровых кадров и организация последовательной передачи информации реализованы аппаратно на программируемой логической интегральной схеме Xilinx Spartan-6 XC6SLX9, установленной на плате Mojo FPGA [6].

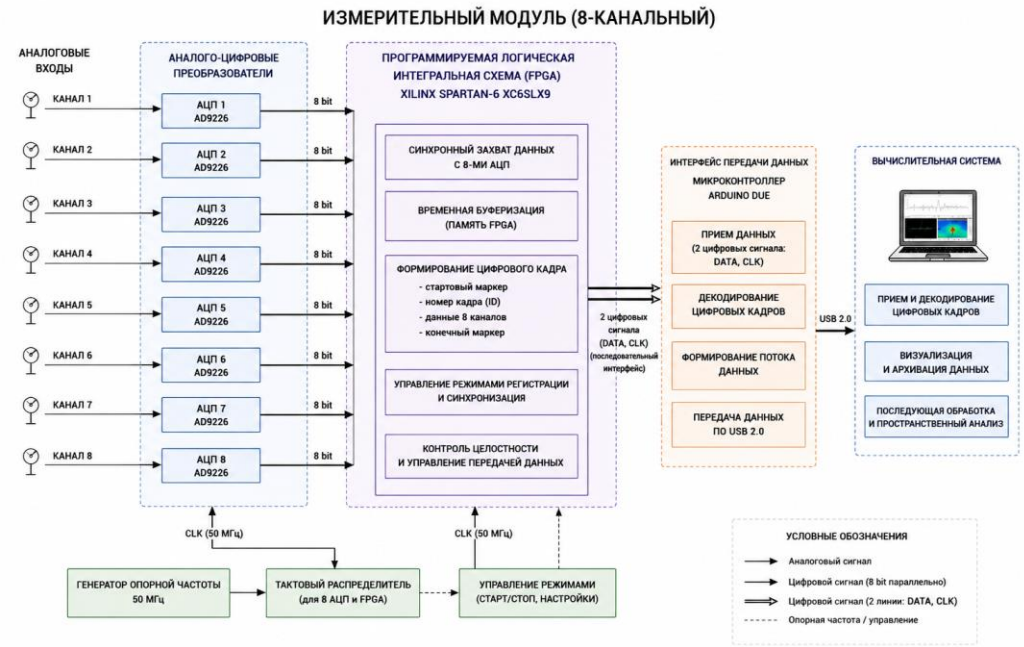


Рисунок 1 – Структурная схема измерительной электроники

При проектировании измерительного модуля особое внимание уделялось обеспечению синхронной регистрации сигналов во всех измерительных каналах. С этой целью все аналого-цифровые преобразователи работают от общего источника тактовой

частоты 50 МГц, что обеспечивает совпадение моментов дискретизации и исключает временные рассогласования между каналами. После преобразования цифровые данные одновременно поступают в FPGA, где выполняются их синхронный захват, временная буферизация и объединение в единый цифровой кадр.

Формирование кадров осуществляется аппаратными средствами FPGA без участия центрального процессора. Каждый кадр содержит стартовый маркер, номер кадра, данные восьми измерительных каналов и конечный маркер. Использование уникального номера кадра позволяет контролировать последовательность передаваемой информации и обеспечивает корректную синхронизацию программного обеспечения при её приёме.

Обмен данными между измерительным модулем и микроконтроллером организован по двум цифровым линиям: линии передачи данных (DATA) и линии синхронизации (CLK). Такое решение позволило существенно сократить количество межсоединений без нарушения временной согласованности передаваемой информации. Приём последовательного потока выполняет микроконтроллер Arduino Due, который декодирует сформированные FPGA кадры и передаёт их в персональный компьютер по интерфейсу USB.

При создании многоканальных измерительных комплексов важным требованием является возможность увеличения числа измерительных каналов без изменения архитектуры аппаратной и программной частей системы. В задачах цифрового формирования диаграммы направленности, цифровой фокусировки и пространственной реконструкции количество одновременно работающих каналов может достигать 128–256 и более. Реализация подобных систем на одной печатной плате значительно усложняет трассировку высокоскоростных соединений, снижает технологичность изготовления и затрудняет дальнейшую модернизацию.

Поэтому разработанная система имеет модульную структуру [7]. Её базовым элементом является восьмиканальный измерительный модуль, включающий восемь аналого-цифровых преобразователей и программируемую логическую интегральную схему, выполняющую регистрацию, буферизацию и передачу данных. Расширение системы достигается простым добавлением новых идентичных модулей, что позволяет наращивать количество измерительных каналов без изменения принципов построения комплекса.

Вместе с тем модульная архитектура требует обеспечения единого временного основания для всех модулей. Каждый FPGA запускается внешним триггерным сигналом, однако различия во времени его распространения по соединительным линиям, а также особенности инициализации отдельных устройств могут привести к смещению начала регистрации данных. Даже рассогласование в один такт способно существенно снизить эффективность последующей когерентной обработки сигналов.

Для обеспечения синхронной работы всех измерительных модулей используется отдельная линия синхронизации, по которой одновременно передаётся общий тактовый сигнал частотой 50 МГц. Передача каждого информационного бита осуществляется относительно этого сигнала, благодаря чему для всех модулей формируется единая временная шкала независимо от момента их запуска. По второй цифровой линии последовательно передаются данные, сформированные FPGA [8].

При передаче больших объёмов цифровой информации возможны одиночные ошибки или потеря отдельных битов. В непрерывном последовательном потоке такие нарушения приводят к смещению границ кадров и потере синхронизации между передающей и принимающей сторонами.

Для повышения помехоустойчивости разработан собственный кадровый протокол передачи данных, обеспечивающий автоматическое восстановление синхронизации после возникновения ошибок. Каждый кадр имеет фиксированный формат и включает пять последовательных полей (рис. 2).

В качестве признака начала кадра используется уникальная двоичная последовательность 01100, за которой передаётся двенадцатиразрядный идентификатор кадра FRAME_NUMBER[11:0]. После него следует разделительный маркер 0011100, однозначно обозначающий начало информационной части. Полезные данные имеют длину 64 бита, что соответствует одновременной передаче результатов измерений восьми каналов. Завершает кадр стоп-маркер 00111111111100, используемый для определения окончания передачи и контроля корректности приёма.

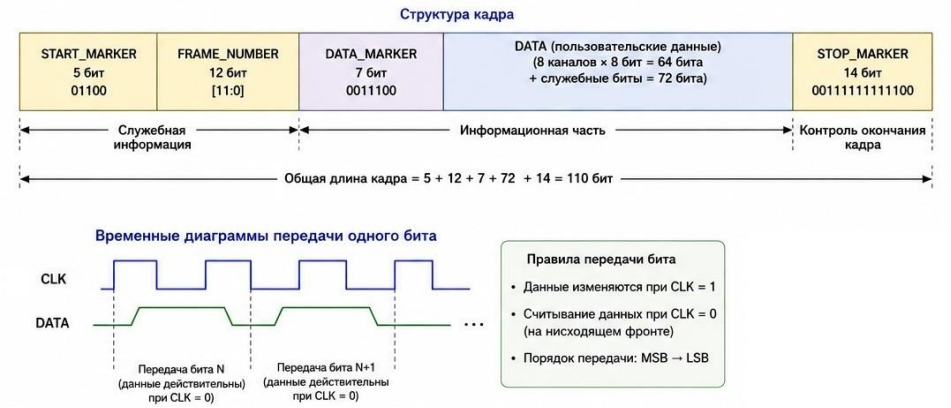


Рисунок 2 – Протокол передачи данных

Применение уникальных стартового, разделительного и конечного маркеров позволяет автоматически восстановить синхронизацию при возникновении ошибок передачи отдельных битов. В случае потери синхронизации принимающее программное обеспечение анализирует входной поток до обнаружения очередного стартового маркера, после чего корректно определяет границы кадра и продолжает приём данных без остановки измерительной системы.

Разработанный кадровый протокол обеспечивает возможность масштабирования системы, повышает устойчивость передачи данных к ошибкам и поддерживает синхронную работу большого количества измерительных модулей. Это позволяет использовать предложенную архитектуру при построении распределённых измерительных комплексов, содержащих 64, 128, 256 и более измерительных каналов.

Выбор основных параметров измерительного модуля осуществлялся с учётом необходимости достижения баланса между точностью регистрации сигналов, объёмом передаваемых данных, вычислительной нагрузкой и стоимостью аппаратной реализации. В качестве промежуточной частоты принято значение 5 МГц, широко используемое в радиотехнических и измерительных системах. Частота дискретизации 50 Мвыб/с обеспечивает десять отсчётов на период сигнала, что является достаточным для реализации алгоритмов корреляционной обработки, когерентного накопления и пространственного анализа. Применение восьмиразрядного аналого-цифрового преобразования обеспечивает необходимый динамический диапазон при умеренном объёме цифровой информации, а глубина регистрации 4096 отсчётов позволяет повысить достоверность результатов последующей обработки.

Для проверки работоспособности предложенной архитектуры был изготовлен опытный образец измерительного модуля [9]. В ходе испытаний одновременно регистрировались промежуточные сигналы по восьми измерительным каналам, оценивалась корректность синхронной работы аналого-цифровых преобразователей, проверялись алгоритмы формирования цифровых кадров и исследовалась устойчивость передачи данных в вычислительную систему. Проведённые эксперименты подтвердили работоспособность разработанного решения и возможность его использования в составе масштабируемых многоканальных измерительных комплексов.

Проведённые исследования показали, что требуемые характеристики измерительной системы достигаются при рациональном выборе частоты дискретизации, разрядности аналого-цифрового преобразования, глубины регистрации данных и аппаратной платформы цифровой обработки. Основные параметры разработанного измерительного модуля приведены в таблице 1.

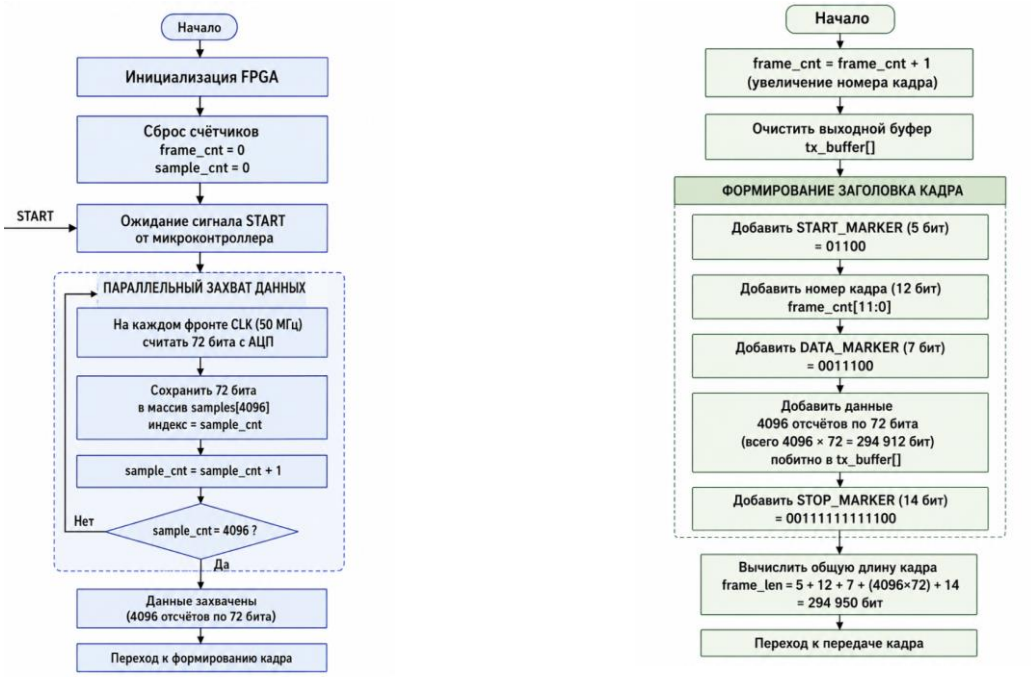
Представленные в таблице 1 параметры были реализованы в экспериментальном образце измерительного модуля и положены в основу алгоритмов функционирования программируемой логической интегральной схемы. Выбранные параметры обеспечивают достаточную точность регистрации промежуточных сигналов при сохранении умеренного

объёма передаваемых данных и позволяют реализовать обработку информации в режиме реального времени без существенного усложнения аппаратной части.

Таблица 1 – Параметры измерительного модуля

№	Параметр	Значение
1	Количество каналов:	8
2	Промежуточная частота:	5 МГц
3	Частота дискретизации:	50 Мвыб/с
4	Разрядность:	8 бит
5	Глубина регистрации:	4096 отсчётов
6	FPGA	Xilinx Spartan-6 XC6SLX9
7	Интерфейс	FPGA → МК: DATA + CLK
8	Интерфейс ПК:	USB

Основными задачами FPGA являются синхронная регистрация данных со всех измерительных каналов, аппаратное формирование цифровых кадров и организация их последовательной передачи в вычислительную систему [10]. Для реализации указанных функций разработаны специализированные алгоритмы управления процессом сбора и передачи данных, представленные на рисунках 3 и 4. На рисунке 3 приведены алгоритмы запуска измерения и формирования цифрового кадра, а на рисунке 4 – алгоритм последовательной передачи данных по двухпроводному интерфейсу DATA-CLK.



а б

а – алгоритм старта измерения; б – алгоритм формирования кадра

Рисунок 3 – Алгоритм работы программы прошивки ПЛИС по сбору данных

Как следует из рисунка 3, работа FPGA начинается после поступления сигнала запуска измерения [9]. На первом этапе выполняется инициализация внутренних счётчиков и буферов памяти, после чего осуществляется синхронный захват данных одновременно со всех восьми аналого-цифровых преобразователей. Зарегистрированные значения последовательно записываются во внутреннюю память FPGA до достижения заданной глубины регистрации. После завершения сбора данных автоматически формируется цифровой кадр передачи, включающий стартовый маркер, номер кадра, разделительный маркер, информационную часть и конечный маркер. Аппаратная реализация алгоритма обеспечивает детерминированное время обработки, исключает влияние программных задержек и гарантирует синхронность регистрации по всем измерительным каналам. После формирования кадра FPGA переходит к его последовательной передаче по двухпроводному цифровому интерфейсу DATA-CLK. Алгоритм передачи данных представлен на рисунке 4.

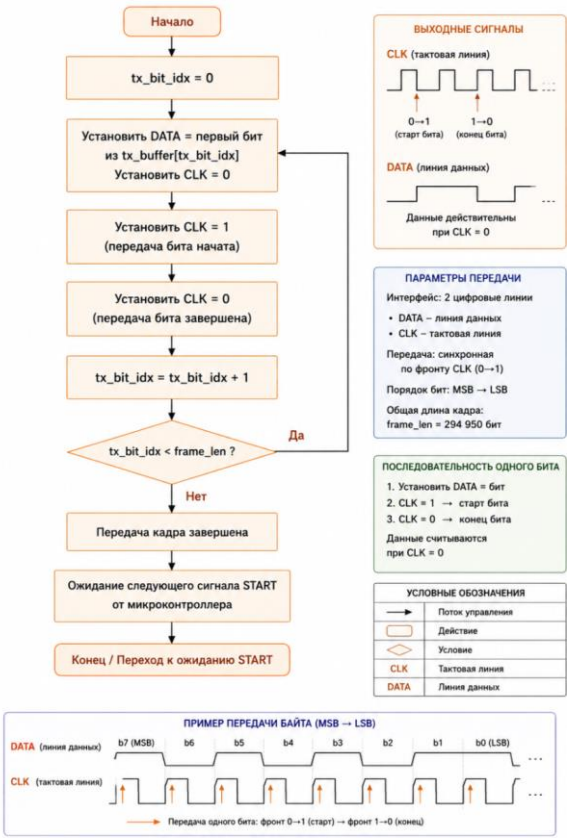


Рисунок 4 – Алгоритм передачи данных по двум цифровым линиям

Результаты

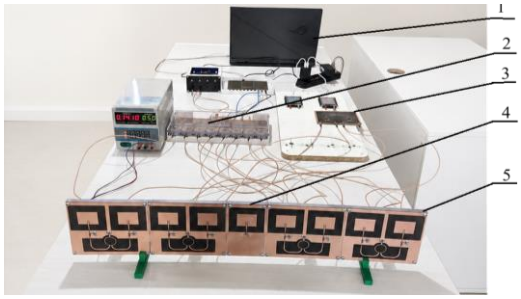
Экспериментальные исследования проводились на изготовленном восьмиканальном измерительном модуле, предназначенном для синхронной регистрации промежуточных сигналов, их аппаратной обработки и последующей передачи в вычислительную систему. В отличие от универсальных систем сбора данных, разработанное устройство ориентировано на одновременную регистрацию сигналов по нескольким каналам в режиме реального времени и может применяться в составе многоканальных измерительных комплексов, использующих методы пространственной обработки информации.

Внешний вид экспериментального образца приведён на рисунке 5. Измерительный модуль выполнен в виде компактной печатной платы, на которой размещены восемь аналого-цифровых преобразователей AD9226, программируемая логическая интегральная схема Xilinx Spartan-6 XC6SLX9, узел распределения тактовой частоты и микроконтроллер Arduino Due, осуществляющий передачу сформированных данных в персональный компьютер по интерфейсу USB.



Рисунок 5 – Экспериментальный образец восьмиканального измерительного модуля.

Для оценки практической применимости разработанный измерительный модуль был интегрирован в экспериментальный радиолокационный комплекс, предназначенный для регистрации промежуточных сигналов приёмных каналов. Структура экспериментальной установки представлена на рисунке 6.

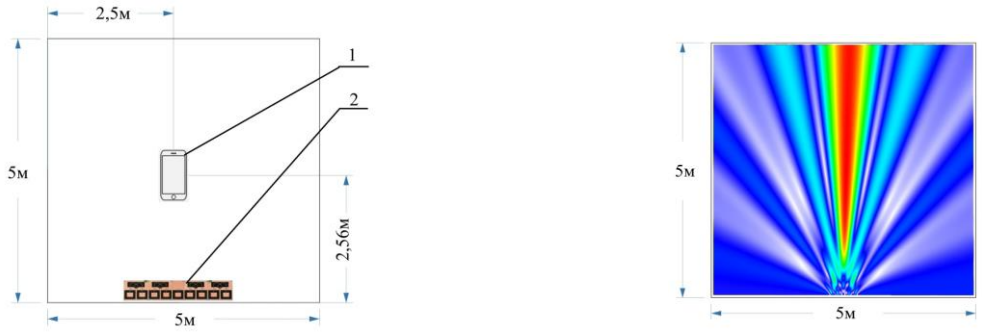


1 – вычислительный модуль для регистрации и обработки промежуточных сигналов; 2 – измерительная электроника; 3 – модуль распределения мощности; 4 – центральный излучающий элемент; 5 – восьмиканальная антенная система

Рисунок 6 – Размещение измерительного модуля в составе экспериментального радиолокационного комплекса.

В качестве источника радиоизлучения использовался смартфон Samsung S25, функционирующий в режиме точки доступа стандарта IEEE 802.11 (Wi-Fi) (рисунок 7, а). Принимаемые сигналы регистрировались восьмиканальной антенной системой и после гетеродинного преобразования поступали на разработанный измерительный модуль. В каждом измерительном канале выполнялось аналого-цифровое преобразование промежуточного сигнала, после чего FPGA обеспечивала синхронный захват данных, формирование цифровых кадров и их передачу в вычислительный модуль для последующей обработки.

Полученные экспериментальные данные обрабатывались разработанным специализированным программным обеспечением, реализующим приём кадров, их декодирование и алгоритмы пространственной обработки многоканальных сигналов [10]. По результатам обработки была сформирована карта пространственного распределения интенсивности принимаемого радиоизлучения, позволившая определить направление на источник излучения (рис. 7, б).



а б

а – схема проведения эксперимента; б – реконструкция изображения;
1 – сотовый телефон в качестве источника радиоизлучения; 2 – 8-канальный антенный модуль

Рисунок 7 – Схема проведения пилотных экспериментов и результаты пространственной обработки зарегистрированных сигналов

Проведённые испытания подтвердили устойчивую работу измерительного модуля при длительной непрерывной регистрации сигналов. Специализированное программное обеспечение обеспечивало приём и декодирование цифровых кадров, автоматическое восстановление синхронизации при ошибках передачи, визуализацию зарегистрированных данных и их пространственную обработку в режиме реального времени.

Модульная архитектура системы позволяет увеличивать количество измерительных каналов путём подключения дополнительных измерительных модулей без изменения принципов функционирования аппаратной и программной частей комплекса. Использование унифицированного формата цифровых кадров обеспечивает совместимость всех элементов системы и упрощает её масштабирование. Благодаря этому предложенное решение может применяться при создании многоканальных измерительных комплексов различного назначения, включая системы пространственной обработки радиосигналов, акустические массивы, ультразвуковые диагностические комплексы, системы неразрушающего контроля и интеллектуальные транспортные системы.

Заключение

В статье разработана и экспериментально проверена программно-аппаратная архитектура восьмиканального измерительного модуля для синхронной регистрации промежуточных сигналов и передачи цифровых данных в вычислительную систему. Аппаратная реализация на базе восьми аналого-цифровых преобразователей AD9226 и FPGA Xilinx Spartan-6 XC6SLX9 обеспечила одновременный захват данных по всем измерительным каналам, их временную буферизацию и формирование цифровых кадров с детерминированными временными параметрами.

Разработанный кадровый протокол с использованием стартового, разделительного и конечного маркеров, а также идентификатора кадра обеспечивает контроль последовательности передаваемых данных и автоматическое восстановление синхронизации после возникновения ошибок. Передача информации по двухпроводному интерфейсу DATA-CLK позволила сократить количество соединений при сохранении временной согласованности цифрового потока.

Экспериментальные исследования подтвердили устойчивую работу измерительного модуля при длительной регистрации сигналов, корректное функционирование FPGA-алгоритмов и специализированного программного обеспечения. В ходе пилотного эксперимента обеспечены приём, декодирование, визуализация и пространственная обработка зарегистрированных многоканальных данных в режиме реального времени.

Модульный принцип построения позволяет увеличивать количество измерительных каналов путём объединения нескольких идентичных модулей в единую синхронизированную систему. Полученные результаты показывают возможность применения предложенной архитектуры при создании масштабируемых информационно-измерительных комплексов для пространственной обработки радиосигналов, акустических массивов, ультразвуковой диагностики, неразрушающего контроля и интеллектуальных транспортных систем.

Список литературы

1. Жантлесов Е.Ж. Обоснование параметров и разработка аппаратно-программного комплекса радио- и акустической томографии статических объектов: диссертация на соискание степени доктора философии (PhD) / Е.Ж. Жантлесов // Национальный университет обороны Республики Казахстан. – Астана, 2020. – 151 с. ()
2. Грузин В.В. Классификация методов определения, измерения и обработки пространственных координат источника радиоизлучения / В.В. Грузин, Е.Ж. Жантлесов, А.В. Доля: свидетельство о внесении сведений в Государственный реестр прав на объекты, охраняемые авторским правом, № 56103. Дата регистрации: 27.03.2025.
3. Die getaktete Gruppenstrahlertechnik und ihre Anwendungen / A. Bulavinov et al // Moderne Systemtechnik bei Prüfungen mit Ultraschall : Seminar des FA Ultraschall, 12–13 November 2007. – Berlin: Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung, 2007. – 16 S. https://www.ndt.net/article/dgzfp-ut-2007/Inhalt/v08.pdf (дата обращения: 24.08.2026).
4. Джусупбеков Т.Х. Структура комплекса технических средств обнаружения и формирования радиолокационного портрета военной техники / Т.Х. Джусупбеков, Е.Ж. Жантлесов, А.Т. Бердибеков // Вестник Национального университета обороны Республики Казахстан. – 2022. – № 4 (95). – С. 99-103.
5. Жантлесов Е.Ж. Обоснование параметров и создание радиолокационного прибора разведки: монография / Е.Ж. Жантлесов, Т.Х. Джусупбеков, Е.Л. Макаров. – Астана: Национальный университет обороны Республики Казахстан, 2024. – 100 с.
6. Bernstein J.B. Reliability prediction with MTOL / J.B. Bernstein, A. Bensoussan, E. Bender // Microelectronics Reliability. – 2017. – Vol. 68. – P. 91-97. https://doi.org/10.1016/j.microrel.2016.09.005.
7. Oztekin H.A modular approach to FPGA-based microcomputer architecture design for educational purpose / H. Oztekin, F. Temurtas, A. Gulbag // Computer Applications in Engineering Education. – 2014. – Vol. 22, № 2. – P. 272-282. https://doi.org/10.1002/cae.20553.
8. Control and diagnostics system generator for complex FPGA-based measurement systems / W.M. Zabołotny et al // Sensors. – 2021. – Vol. 21, № 21. – Art. 7378. https://doi.org/10.3390/s21217378.
9. Жантлесов Е.Ж. Научно-техническое обоснование параметров специализированной радиостанции для задач обнаружения и пространственной визуализации источников радиоизлучения в интересах гражданской защиты и радиоэлектронной разведки / Е.Ж. Жантлесов, А.К. Тогусов, А.В. Доля // Сардар. – 2025. – № 3(51). – С. 111-120.

10. Жантлесов Е.Ж. Программное обеспечение измерительного модуля для регистрации и передачи многоканальных сигналов источников радиоизлучения : компьютерная программа / Е.Ж. Жантлесов: свидетельство о внесении сведений в Государственный реестр прав на объекты, охраняемые авторским правом, № 121996. Дата регистрации: 08.07.2026.

References

1. Zhantlesov E.Zh. Obosnovanie parametrov i razrabotka apparatno-programmnogo kompleksa radio- i akusticheskoi tomografii staticheskikh ob"ektov: dissertatsiya na soiskanie stepeni doktora filosofii (PhD) / E.Zh. Zhantlesov // Natsional'nyi universitet oborony Respubliki Kazakhstan. – Astana, 2020. – 151 s. (In Russian).
2. Gruzin V.V. Klassifikatsiya metodov opredeleniya, izmereniya i obrabotki prostranstvennykh koordinat istochnika radioizlucheniya / V.V. Gruzin, E.Zh. Zhantlesov, A.V. Dolya: svidetel'stvo o vnesenii svedenii v Gosudarstvennyi reestr prav na ob"ekty, okhranyaemye avtorskim pravom, № 56103. Data registratsii: 27.03.2025. (In Russian).
3. Die getaktete Gruppenstrahlertechnik und ihre Anwendungen / A. Bulavinov et al // Moderne Systemtechnik bei Prüfungen mit Ultraschall : Seminar des FA Ultraschall, 12–13 November 2007. – Berlin: Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung, 2007. – 16 S. https://www.ndt.net/article/dgzfp-ut-2007/Inhalt/v08.pdf (data obrashcheniya: 24.08.2026). (In English).
4. Dzhusupbekov T.Kh. Struktura kompleksa tekhnicheskikh sredstv obnaruzheniya i formirovaniya radiolokatsionnogo portreta voennoi tekhniki / T.Kh. Dzhusupbekov, E.Zh. Zhantlesov, A.T. Berdibekov // Vestnik Natsional'nogo universiteta oborony Respubliki Kazakhstan. – 2022. – № 4 (95). – S. 99-103. (In Russian).
5. Zhantlesov E.Zh. Obosnovanie parametrov i sozdanie radiolokatsionnogo pribora razvedki: monografiya / E.Zh. Zhantlesov, T.Kh. Dzhusupbekov, E.L. Makarov. – Astana: Natsional'nyi universitet oborony Respubliki Kazakhstan, 2024. – 100 s. (In Russian).
6. Bernstein J.B. Reliability prediction with MTOL / J.B. Bernstein, A. Bensoussan, E. Bender // Microelectronics Reliability. – 2017. – Vol. 68. – P. 91-97. https://doi.org/10.1016/j.microrel.2016.09.005. (In English).
7. Oztekin H.A modular approach to FPGA-based microcomputer architecture design for educational purpose / H. Oztekin, F. Temurtas, A. Gulbag // Computer Applications in Engineering Education. – 2014. – Vol. 22, № 2. – P. 272-282. https://doi.org/10.1002/cae.20553. (In English).
8. Control and diagnostics system generator for complex FPGA-based measurement systems / W.M. Zabołotny et al // Sensors. – 2021. – Vol. 21, № 21. – Art. 7378. https://doi.org/10.3390/s21217378. (In English).
9. Zhantlesov E.Zh. Nauchno-tekhnicheskoe obosnovanie parametrov spetsializirovannoi radiostantsii dlya zadach obnaruzheniya i prostranstvennoi vizualizatsii istochnikov radioizlucheniya v interesakh grazhdanskoi zashchity i radioehlektronnoi razvedki / E.Zh. Zhantlesov, A.K. Togusov, A.V. Dolya // Sardar. – 2025. – № 3(51). – S. 111-120. (In Russian).
10. Zhantlesov E.Zh. Programmnoe obespechenie izmeritel'nogo modulya dlya registratsii i peredachi mnogokanal'nykh signalov istochnikov radioizlucheniya : komp'yuternaya programma / E.Zh. Zhantlesov: svidetel'stvo o vnesenii svedenii v Gosudarstvennyi reestr prav na obekty, okhranyaemye avtorskim pravom, № 121996. Data registratsii: 08.07.2026. (In Russian).

Источник финансирования: *Статья подготовлена в рамках выполнения научного проекта грантового финансирования на 2024-2026 годы ИРН AP 234042/0223 «Обоснование параметров и разработка системы обнаружения и визуализации источников радиоизлучения» (исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан).*

Е. Жантлесов[*], С. Алтынбек[2], В. Грузин[1], А. Тогусов[3], М. Шекеев[4]
[1]«Kazakhstan Engineering» R&D орталығы» ЖШС,
Қазақстан Республикасы, Астана қ., Әуезов көшесі 2, н. Т. 1.
[2]ESIL University-Astana, Қазақстан Республикасы, Астана қ., а. Жұбанов к-сі, 7
[3]ҚР Қорғаныс министрлігінің Әскери білім және ғылым департаменті,
010000, Қазақстан Республикасы, Астана қ., Достық даңғылы, 14
[4]Алматы қ. № 220 мектеп
[*]e-mail: Yerbolzh@mail.ru

СИГНАЛДАРДЫ СИНХРОНДЫ ТІРКЕУГЕ АРНАЛҒАН КӨПАРНАЛЫ ӨЛШЕУ МОДУЛІНІҢ БАҒДАРЛАМАЛЫҚ-АППАРАТТЫҚ АРХИТЕКТУРАСЫН ӘЗІРЛЕУ

Аңдатпа: *Мақалада синхронды тіркеуге, аппараттық өңдеуге және цифрлық деректерді беруге арналған көпарналы өлшеу модулінің бағдарламалық-аппараттық архитектурасы ұсынылған. Ұсынылған архитектура сегіз AD9226 аналогтық-цифрлық түрлендіргіші мен Xilinx Spartan-6 XC6SLX9 бағдарламаланатын логикалық интегралдық схемасын пайдалануға негізделген. Бұл шешім деректерді синхронды қабылдауды, цифрлық кадрларды қалыптастыруды және оларды екі сымды DATA–CLK интерфейсі арқылы беруді қамтамасыз етеді. Кадрлардың реттілігін бақылауды, деректерді беру кезіндегі қателер туындаған жағдайда синхрондауды автоматты түрде қалпына келтіруді және жүйені ауқымдауға мүмкіндік беретін кадрлық деректерді беру хаттамасы әзірленді. Сегіз арналы өлшеу модулінің прототипі дайындалып, эксперименттік зерттеулер жүргізілді. Зерттеу нәтижелері сигналдарды синхронды тіркеудің дұрыстығын, деректерді берудің тұрақтылығын, FPGA алгоритмдері мен мамандандырылған бағдарламалық қамтамасыз етудің жұмысқа қабілеттілігін растады. Алынған нәтижелер ұсынылған архитектураны сигналдарды цифрлық өңдеуге арналған ауқымдалатын көпарналы ақпараттық-өлшеу жүйелерін құру кезінде қолдануға болатынын көрсетеді.*

Мақала 2024-2026 жылдарға арналған гранттық қаржыландыру бойынша ИРН AP234042/0223 «Радиоизлучение көздерін анықтау және визуализациялау жүйесінің параметрлерін негіздеу және әзірлеу» ғылыми жобасы аясында дайындалды (зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті тарапынан қаржыландырылады).

Түйін сөздер: *бағдарламалық-аппараттық архитектура; көпарналы өлшеу модулі; сигналдарды синхронды тіркеу; FPGA; Xilinx Spartan-6; аналогтық-цифрлық түрлендіру; сигналдарды цифрлық өңдеу; кадрлық хаттама; көпарналы ақпараттық-өлшеу жүйелері.*

Y. Zhantlessov[*], S. Altynbek[2], V. Gruzin[1], A. Togusov[3], M. Shekeev[4]
[1]R&D Center «Kazakhstan Engineering» LLP,
Republic of Kazakhstan, Astana, Auezov Street, 2, p. 1.
[2]ESIL University, Republic of Kazakhstan, Astana, A. Zhubanov Street, 7
[3]Department of Military Education and Science of the Ministry of Defense of the Republic of Kazakhstan,
010000, Republic of Kazakhstan, Astana, Dostyk Avenue, 14
[4]School № 220 in Almaty, Republic of Kazakhstan
[*]e-mail: Yerbolzh@mail.ru

DEVELOPMENT OF A HARDWARE–SOFTWARE ARCHITECTURE FOR A MULTICHANNEL MEASUREMENT MODULE FOR SYNCHRONOUS SIGNAL ACQUISITION

Abstract: *The article presents the hardware and software architecture of a multi-channel measurement module designed for synchronous data acquisition, hardware signal processing, and digital data transmission. The proposed architecture is based on eight AD9226 analog-to-digital converters and a Xilinx Spartan-6 XC6SLX9 field-programmable gate array (FPGA), which provides synchronous data acquisition, digital frame generation, and data transmission via a two-wire DATA-CLK interface. A frame-based data transmission protocol has been developed to ensure frame sequence control, automatic synchronization recovery in the event of transmission errors, and system scalability. A prototype of the eight-channel measurement module was developed and experimentally evaluated. The experimental results confirmed the correctness of synchronous signal acquisition, the reliability of data transmission, and the proper operation of the FPGA algorithms and the dedicated software. The obtained results demonstrate the feasibility of applying the proposed architecture to the development of scalable multi-channel data acquisition systems for digital signal processing.*

This study was carried out within the framework of the grant-funded research project for 2024-2026, IRN AP234042/0223, «Substantiation of Parameters and Development of a System for Detection and Visualization of Radio Emission Sources», funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan.

Key words: *hardware-software architecture; multichannel measurement module; synchronous signal acquisition; FPGA; Xilinx Spartan-6; analog-to-digital conversion; digital signal processing; frame transmission protocol; multichannel information and measurement systems.*

Сведения об авторах

Ербол Жангабулович Жантлесов[*] – PhD, ведущий научный сотрудник ТОО «R&D Центр» «Казахстан инжиниринг», г. Астана, Республика Казахстан.

Серик Атаконысулы Алтынбек – PhD, ассоцированный профессор кафедры «Информационные системы и технологии» Esil University, Астана, Казахстан, e-mail: Serik_aa@bk.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8435-7773.

Владими Васильевич Грузин – доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник ТОО «R&D Центр» «Казахстан инжиниринг», г. Астана, Республика Казахстан.

Амангельды Курамангажинович Тогусов – кандидат технических наук, профессор, заместитель начальника Департамента военного образования и науки МО РК, г. Астана, Республика Казахстан.

Мағауия Қайратұлы Шекеев – ученик 11-го класса 220 школы г. Алматы.

Авторлар туралы мәліметтер

Ербол Жанғабылұлы Жантлесов* – философия докторы (Ph.D), «Kazakhstan Engineering» R&D орталығы» ЖШС жетекші ғылыми қызметкері, Астана қ., Қазақстан Республикасы.

Серік Атаконысұлы Алтынбек – PhD, «Ақпараттық жүйелер және технологиялар» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Esil University, Астана, Қазақстан, e-mail: Serik_aa@bk.ru**.** ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8435-7773.

Владимир Васильевич Грузин – техника ғылымдарының докторы, профессор, «Kazakhstan Engineering» R&D орталығы» ЖШС жетекші ғылыми қызметкері, Астана қ., Қазақстан Республикасы.

Амангелді Құраманғажынұлы Тогусов – техника ғылымдарының кандидаты, профессор, Қазақстан Республикасы Қорғаныс министрлігінің Әскери білім және ғылым департаменті бастығының орынбасары, Астана қ., Қазақстан Республикасы.

Мағауия Қайратұлы Шекеев – Алматы қаласындағы №220 мектептің 11-сынып оқушысы.

Information about the authors

Yerbol Zhangabulovich Zhantlessov* – Ph.D., Leading Researcher, R&D Center «Kazakhstan Engineering» LLP, Astana, Republic of Kazakhstan.

Serik Atakonyssuly Altynbek – PhD, Associate Professor of the Department of Information Systems and Technologies, Esil University, Astana, Kazakhstan, e-mail: Serik_aa@bk.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8435-7773.

Vladimir Vasilyevich Gruzin – Doctor of Technical Sciences, Professor, Leading Researcher, R&D Center «Kazakhstan Engineering» LLP, Astana, Republic of Kazakhstan.

Amangeldy Kuramangazhinovich Togusov – Candidate of Technical Sciences, Professor, Deputy Head of the Department of Military Education and Science, Ministry of Defense of the Republic of Kazakhstan, Astana, Republic of Kazakhstan.

Magauiya Qairatuly Shekeev – is an 11th-grade student at School No. 220 in Almaty.

Поступила в редакцию 19.06.2026
Поступила после доработки 01.07.2026
Принята к публикации 22.08.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-14

МРНТИ: 87.45.45

CC BY 4.0
Check for updates

Д.Т. Беккасимова, К.Ю. Дербышев, Ә.М. Сүгірбай, Д.О. Кожахметова, А.Д. Золотов*
Шәкәрім университет, 071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А
*e-mail: azol64@mail.ru

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ КУЛЬТИВИРОВАНИЯ CHLORELLA VULGARIS В ЗАКРЫТЫХ ФОТОБИОРЕАКТОРАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Аннотация: *В работе проведён анализ современных математических моделей роста* Chlorella vulgaris *в закрытых фотобиореакторах, применяемых для исследования, прогнозирования и управления процессами культивирования микроводорослей. Рассмотрены основные классы моделей, включая эмпирические и кинетические модели роста, модели светового затухания и распределения освещённости, модели фотоакклимации клеток, а также комплексные динамические модели, учитывающие совместное влияние интенсивности света, концентрации углекислого газа, массопереноса CO_2, уровня pH, температуры, перемешивания среды и других технологических факторов. Особое внимание уделено оценке точности, вычислительной сложности и практической применимости данных моделей для задач автоматизированного управления, мониторинга состояния культуры и оптимизации технологических режимов. Проанализированы возможности интеграции математических моделей с методами оптимального управления, предиктивного*

©Д.Т. Беккасимова, К.Ю. Дербышев, Ә.М. Сүгірбай, Д.О. Кожахметова, А.Д. Золотов, 2026

управления на основе модели (MPC), а также с современными метаэвристическими алгоритмами оптимизации. Выполнен критический анализ преимуществ и ограничений существующих подходов, включая проблемы параметрической идентификации и масштабирования моделей от лабораторных установок к промышленным фотобиореакторам. Показано, что использование комплексных динамических моделей в сочетании с интеллектуальными системами автоматизированного управления способствует повышению продуктивности биомассы, устойчивости технологического процесса, снижению энергозатрат и улучшению эффективности промышленного культивирования Chlorella vulgaris*. Результаты исследования могут быть использованы при разработке и совершенствовании современных автоматизированных систем управления фотобиореакторами.*

Ключевые слова: *Chlorella vulgaris, фотобиореактор, математическое моделирование, автоматизированное управление, оптимизация.*

Введение

Chlorella vulgaris – одноклеточная зелёная микроводоросль, обладающая уникальными свойствами, делающими её ценным ресурсом для различных отраслей промышленности. Она способна эффективно фиксировать CO_2, продуцировать большое количество белка (до 50-60% сухой массы), липидов, витаминов, минералов и биологически активных веществ. Благодаря высокой скорости роста и неприхотливости Chlorella vulgaris широко используется в медицине, косметологии, пищевой промышленности, производстве биотоплива, биопластиков, кормовых добавок и биоудобрений [1].

Моделирование роста Chlorella vulgaris в фотобиореакторах позволяет прогнозировать продуктивность биомассы, оптимизировать режимы освещения, подачи CO_2, питательных веществ, температуры и pH, а также служит научной основой для разработки автоматизированных систем управления технологическим процессом. В современных исследованиях применяются как относительно простые эмпирические и кинетические модели, так и сложные динамические модели, учитывающие процессы массопереноса, светового затухания, фотоакклимации и физиологического отклика клетки [2-5].

Особую роль играют модели, учитывающие совместное влияние интенсивности света и концентрации растворённого неорганического углерода (Dissolved Inorganic Carbon – DIC) на кинетику роста хлореллы и фиксацию CO_2 одноклеточной водорослью [4]. Не менее важны комплексные модели, описывающие одновременно фиксацию углерода и биологическое удаление азота и фосфора из сточных вод [5]. Сравнительный анализ кинетических моделей, основанных на интенсивности света и концентрации биомассы, показывает, что модели учитывающие совокупное влияние факторов часто демонстрируют наилучшую прогностическую способность в сравнении с моделями сосредоточенными на изучении влияния факторов без учета их взаимовлияния [3].

В последние годы активно развивается направление интеграции математических моделей с системами автоматического управления. Оптимизация параметров непрерывных фотобиореакторов с использованием математических моделей и алгоритмов оптимизации позволяет существенно повысить продуктивность и энергоэффективность процесса [2].

Актуальность настоящей работы обусловлена необходимостью создания эффективных инструментов управления культивированием Chlorella vulgaris в закрытых фотобиореакторах. Переход к автоматизированным системам на основе точных математических моделей позволит повысить стабильность процесса, минимизировать энергозатраты и обеспечить требуемое качество биомассы при масштабировании производства.

Условия и методы исследования. Анализ проводился на основе научных публикаций за период 2012-2025 годов, отобранных из международных баз, данных Scopus, Web of Science, ScienceDirect, и других источников. Было изучено значительное количество работ, из которых детально проанализированы наиболее релевантные публикации, посвящённые кинетическому моделированию, световому затуханию, массопереносу CO_2, оптимизации параметров и автоматизированному управлению процессом культивирования. Методы исследования включали: сравнительный анализ различных типов математических моделей (эмпирические кинетические, модели Моно, Ферхюльста, Гомперца, комплексные динамические модели); классификацию моделей по уровню сложности и учитываемым параметрам; анализ моделей светового затухания и фотоакклимации; оценку применимости

моделей для оптимизации технологических режимов и автоматизированного управления (оптимальное управление, нечёткая логика, метаэвристические алгоритмы, «мягкие датчики»); критический анализ сильных и слабых сторон моделей, а также возможностей их масштабирования от лабораторных условий к пилотным и промышленным. Отбор литературы проводился по следующим критериям: присутствие в работах экспериментально подтверждённых математических моделей роста Chlorella vulgaris; анализ влияния ключевых параметров (интенсивности освещения, концентрации CO2/DIC, уровня pH, температуры, концентрации биомассы и массопереноса); демонстрация применения моделей в закрытых фотобиореакторах разных конструкций (трубчатых, эрлифтных, плоских, мембранных); оценка перспектив интеграции этих моделей в системы автоматического управления. Для систематизации материала использовались методы литературного обобщения, табличного и графического представления данных.

В таблице 1 приведён сравнительный анализ основных типов математических моделей, применяемых для описания роста Chlorella vulgaris в закрытых фотобиореакторах. Для каждой модели указаны математический аппарат, преимущества, недостатки и рекомендуемая область применения.

Таблица 1 – Сравнительный анализ основных типов математических моделей роста Chlorella vulgaris

Тип модели	Основные уравнения/подход	Преимущества	Недостатки	Лучшее применение	Источники
Эмпирически, кинетические (Логистическая, Гомперца)	Эмпирические S-образные кривые	Простота, хорошая аппроксимация экспериментальных данных	Не учитывают физиологические механизмы	Прогрназировани е кривых роста биомассы	[6, 7]
Модель Моно	$\mu = \mu_{max}\frac{S}{K_s + S}$	Учитывает лимитирование субстратом	Не описывает лаг-фазу и ингибирование	Ограниченный рост по одному субстрату	[2, 3, 5, 7]
Модель Ферхюльста	$\frac{dX}{dt} = \mu X(1 - \frac{X}{E_n})$	Хорошо описывает ограниченный рост	Не учитывает влияние внешних факторов	Описание общей динамики биомассы	[6, 7]
Модель Гомперца	$N(t) = N_0\exp(\frac{\mu_x}{k}(1 - e^{-kt}))$	Лучше описывает лаг-фазу и ассиметрию	Эмпирическая, слабая связь с механизмами	Точное описание S-образных кривых роста	[7]
Комплексные динамические	Системы ОДУ (свет+ CO_2+ pH+температура)	Учитывают множества факторов одновременно	Высокая сложность, требует больших вычислений	Оптимизация и автоматизированн ное управление	[2, 4, 5, 8, 9]

Одним из важных этапов исследования являлась классификация математических моделей роста Chlorella vulgaris по уровню сложности и перечню учитываемых параметров. Данный подход позволил систематизировать значительный объём моделей, выявить закономерности их развития и определить наиболее подходящие модели для задач оптимизации технологических режимов и автоматизированного управления. В результате анализа были выделены пять основных уровней моделей, различающихся по математическому аппарату, количеству учитываемых факторов и степени применимости в практических целях. Сравнительная характеристика данных моделей представлена в таблице 2.

Анализ моделей светового затухания и фотоакклимации заключался в изучении математических подходов, описывающих уменьшение интенсивности света по глубине культуры (световое затухание) и адаптацию клеток Chlorella vulgaris к изменяющимся условиям освещения (фотоакклимация). Особое внимание уделялось моделям, основанным на законе Бера–Ламберта, а также более сложным моделям, учитывающим влияние концентрации биомассы, спектральный состав света и физиологическую адаптацию микроводорослей. Такой анализ позволил оценить точность передачи реальных условий освещения внутри фотобиореактора и их влияние на продуктивность культивирования. Основные модели светового затухания и фотоакклимации, рассмотренные в ходе исследования, представлены в таблице 3.

Таблица 2 – Классификация математических моделей роста Chlorella vulgaris по уровню сложности и учитываемым параметрам

Уровень сложности	Характеристика модели	Учитываемые параметры	Примеры применения	Источники
Простые модели	Не учитывают внутреннюю структуру объекта	Основные входные параметры (время, начальная биомасса)	Базовые расчёты, прогноз кривых роста	[6, 7]
Кинетические модели	Учитывают лимитирование субстратом и рост популяции	Субстрат, удельная скорость роста, ёмкость среды	Описание роста биомассы и накопления липидов	[3, 6, 7]
Нелинейные модели	Описывают нелинейные зависимости и S-образные кривые	Свет, биомасса, фотоакклимация	Моделирование влияния освещённости	[3, 9, 10]
Комплексные динамические модели	Учитывают множество взаимосвязанных процессов	Свет, CO_2/DIC, pH, температура, массоперенос	Оптимизация и прогнозирование в фотобиореакторах	[2, 4, 5, 8, 9]
Модели с элементами управления	Интегрируют модели с алгоритмами управления	Параметры моделей и управляющие воздействия	Автоматизированные системы управления	[13, 15, 20]

Таблица 3 – Основные модели светового затухания и фотоакклимации, применяемые для Chlorella vulgaris

Модель / Подход	Основные особенности	Учитываемые параметры	Преимущества	Недостатки	Источ-ники
Закон Бера-Ламберта	Экспоненциальное затухание интенсивности света	Свет, биомасса, глубина	Простота и универсальность	Не учитывает адаптацию клеток	[9,10]
Модели Bannister и Grima	Улучшенные модели светового затухания	Свет, биомасса, коэффициент затухания	Хорошая точность для густых культур	Ограниченный учёт спектра	[3]
Модели фотоакклимации	Динамическая адаптация клеток к освещению	Световая история клетки	Учитывает физиологическую адаптацию	Требует много экспериментальных данных	[3, 19]
Гибридные модели	Комбинация затухания света и фотоакклимации	Свет, биомасса, DIC, фотоакклимация	Наиболее полное описание реальных условий	Высокая вычислительная сложность	[9, 19]

В работах ряда авторов показано, что комплексные динамические модели обладают существенным потенциалом для оптимизации технологических режимов и автоматизированного управления культивированием Chlorella vulgaris. Эти модели успешно интегрируются с методами оптимального управления (model-based optimal control), позволяющими рассчитывать оптимальные траектории подачи CO_2, освещения и аэрации, а также с нечёткой логикой, которая эффективно справляется с неопределённостями биологических процессов. Метаэвристические алгоритмы, в частности Particle Swarm Optimization (PSO), демонстрируют высокую эффективность при многокритериальной оптимизации, а технологии «мягких датчиков» (soft sensors) дают возможность оценивать в реальном времени ненаблюдаемые параметры культуры. В целом, сочетание таких моделей с современными интеллектуальными методами управления создаёт прочную основу для масштабирования производства микроводорослей [2, 15].

Рассмотренные математические модели обладают рядом сильных сторон, но также имеют существенные ограничения. К ключевым преимуществам следует отнести способность комплексных динамических моделей одновременно учитывать множественные факторы окружающей среды (освещение, CO_2, pH, температуру и питательные вещества) и успешно интегрироваться с системами автоматизированного управления [4, 5, 8]. Кроме того, эмпирические и простые кинетические модели демонстрируют высокую точность аппроксимации экспериментальных данных и простоту практического применения в строго контролируемых лабораторных условиях [6, 7]. Однако существенным недостатком большинства моделей является их ограниченная валидация в условиях, приближенных к

реальным. Многие модели разработаны и откалиброваны исключительно на лабораторных масштабах, где гидродинамика, распределение света и массоперенос значительно отличаются от пилотных и промышленных фотобиореакторов. Слабой стороной также является недостаточный учёт пространственной неоднородности параметров внутри крупных аппаратов, эффектов биообрастания, долгосрочной стабильности культуры и влияния внешних возмущений. Вопрос масштабирования остаётся одним из наиболее сложных. Переход от лабораторных установок к пилотным и промышленным масштабам требует существенной доработки моделей, особенно в части описания светового поля, гидродинамики и газообмена. В настоящее время лишь небольшое число исследований демонстрирует успешную адаптацию моделей на более крупных масштабах, что указывает на необходимость разработки гибридных и масштабируемых моделирующих подходов.

Результаты исследований. Анализ научной литературы показал, что математическое моделирование культивирования Chlorella vulgaris в закрытых фотобиореакторах развивается по нескольким основным направлениям. Современные модели можно условно разделить на три основные группы: эмпирические и простые кинетические модели (логистическая, Гомперца, Моно, Ферхюльста и их модификации), которые успешно описывают S-образные кривые роста биомассы и используются для прогнозирования продуктивности [6, 7]; модели, учитывающие влияние света, включающие зависимость удельной скорости роста от интенсивности освещения и концентрации биомассы, где наилучшие результаты в сравнительных исследованиях показали модели Bannister и Grima [3]; а также комплексные динамические модели, одновременно описывающие массоперенос CO_2, световое затухание, динамику pH, температуру и потребление питательных веществ [4, 5, 8].

Согласно таблице 4, математические модели роста Chlorella vulgaris в основном ориентированы на учёт ключевых лимитирующих факторов окружающей среды и физиологических процессов. Наиболее проработанными направлениями являются моделирование светового режима и светового затухания, динамики CO_2 и растворённого неорганического углерода (DIC), а также вопросы автоматизированного управления. Остальные факторы (температура, pH, питательные вещества и накопление липидов) освещены в литературе заметно слабее.

Таблица 4 – Основные факторы, учитываемые в математических моделях роста Chlorella vulgaris

Фактор	Подход моделирования	Основные источники
Освещение и световое затухание	Закон Бера-Ламберта, фотоакклимация	[3, 9, 10]
CO_2 и DIC	Массоперенос, ионное равновесие	[4, 5, 8]
Температура	Кардинальные модели, тепловые поля	[11, 7],
pH и питательные вещества	Кинетика потребления N и P	[5, 13]
Накопление липидов	Модели под стрессовыми условиями	[18]
Автоматизированное управление	Оптимизация, нечёткая логика, PSO	[2, 15]

В процессе разработки математических моделей важным этапом является их последующая оптимизация. Так, в работе Брянкина К.В. и соавт. [6] была предложена математическая модель кинетики роста Chlorella vulgaris, основанная на уравнениях Моно и Ферхюльста. Модель продемонстрировала высокую адекватность экспериментальным данным (максимальное отклонение составило 3,1 %). Применение методов оптимизации позволяет существенно повысить продуктивность культивирования. Например, оптимизация ключевых параметров непрерывного фотобиореактора (pH, концентрация CO_2 и уровень освещённости) обеспечила достижение продуктивности ≈ $4{,}03 \cdot 10^9$ клеток/(л·ч) [2]. В пилотных трубчатых фотобиореакторах оптимизация циклов освещения и начальной концентрации биомассы привела к увеличению продуктивности на 35% [12]. Оптимизация геометрии и светового режима в эрлифтном фотобиореакторе позволила повысить прирост биомассы на 41,8% [9].

Значительное внимание в современных исследованиях уделяется разработке и апробации систем автоматического и интеллектуального управления процессом культивирования Chlorella vulgaris. В литературе представлены различные технические и алгоритмические решения, позволяющие обеспечить стабильность параметров среды и

повысить эффективность производства. В частности, были разработаны и успешно апробированы модульные пилотные системы на базе Python, обеспечивающие мониторинг и контроль температуры, интенсивности освещения, фотопериода и уровня pH [14]; полуиндустриальные модульные эрлифтные фотобиореакторы объёмом до 1000 л с динамическим LED-освещением и автоматизированным дозированием CO_2 [16]; регуляторы на основе нечёткой логики, использующие производную pH для управления временем удержания биомассы [13]; а также системы, построенные на метаэвристических алгоритмах (Particle Swarm Optimization) и технологиях «мягких датчиков», реализующие прогнозирующее управление [15].Важным элементом автоматизированных систем управления является конструкция самого закрытого фотобиореактора. На рисунке 1 представлено общее устройство фотобиореактора, оснащённого системой световодов для равномерного освещения, датчиками pH, температуры, оптической плотности и механическим перемешиванием.

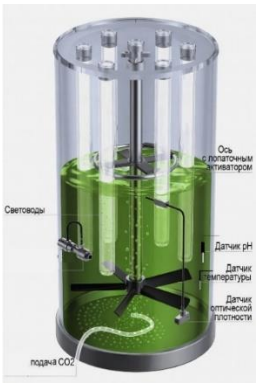


Рисунок 1 – Конструкция закрытого фотобиореактора с системой световодов и датчиками контроля параметров для культивирования Chlorella vulgaris

Данная конструкция позволяет в реальном времени передавать данные от датчиков в контроллер. На основе математической модели контроллер формирует управляющие воздействия на исполнительные устройства (подача CO_2, регулировка интенсивности и спектра освещения, скорость перемешивания). Такой подход обеспечивает автоматическое поддержание оптимальных условий культивирования и минимизирует влияние человеческого фактора.

Обсуждение научных результатов

Анализ научной литературы показывает, что математические модели являются ключевой основой для разработки автоматизированных систем управления культивированием Chlorella vulgaris в закрытых фотобиореакторах. Современные исследования демонстрируют переход от простых кинетических моделей [6, 7] к комплексным динамическим системам, учитывающим взаимодействие нескольких факторов окружающей среды [3, 4, 5, 8, 9, 10].

Особое значение имеют модели, учитывающие совместное влияние интенсивности света и концентрации растворённого неорганического углерода (DIC) [4], процессы массопереноса и биофиксации CO_2 [5, 8], а также световое затухание в густых суспензиях [9, 10]. Экспериментально подтверждённая простая кинетическая модель роста Chlorella vulgaris, разработанная Брянкиным К.В. и соавторами на основе модифицированных уравнений Моно и Ферхюльста [6], продемонстрировала высокую адекватность экспериментальным данным (максимальное относительное отклонение составило 3,1%). Полученные результаты свидетельствуют о надёжности модели и подтверждают перспективы её практического применения для оперативного прогнозирования накопления биомассы и оптимизации технологических режимов культивирования.

Оптимизационные исследования [2, 9, 11, 12] доказывают, что использование математических моделей позволяет существенно повысить продуктивность биомассы и энергоэффективность процесса. Работы [17, 18] подчёркивают важность энергетического и технико-экономического анализа при выборе стратегий управления и типа фотобиореактора.

В сфере автоматизированного управления наблюдается активное внедрение интеллектуальных методов. Разработаны пилотные и полуиндустриальные системы [14, 16], нечётко-логические регуляторы [13], метаэвристические алгоритмы и мягкие датчики [15, 20]. Анализ чувствительности моделей фотоакклимации [19] также вносит важный вклад в понимание поведения культуры в непрерывных режимах.

Вместе с тем, сохраняются определённые ограничения. Большинство моделей разрабатывалось в контролируемых лабораторных условиях и требует дальнейшей валидации в промышленных масштабах при переменных внешних воздействиях [11, 12]. Высокая вычислительная сложность комплексных динамических моделей остаётся одним из ключевых ограничений для их внедрения в системах реального времени. Ввиду большого количества взаимосвязанных уравнений, описывающих одновременно световое затухание, массоперенос CO_2, фотоакклимацию, динамику pH и температуру, такие модели требуют существенных вычислительных мощностей и могут быть затруднительны для оперативного решения на типовых промышленных контроллерах и микроконтроллерах. В ряде случаев для их работы необходимы высокопроизводительные вычислительные модули или использование методов упрощения модели (model order reduction). Поэтому интеграция математических моделей с автоматизированными системами управления (включая нечёткую логику, метаэвристические алгоритмы и мягкие датчики) является перспективным направлением. Создание гибридных моделей, сочетающих кинетическое описание, CFD-моделирование и элементы искусственного интеллекта, позволит перейти к стабильным и высокоэффективным промышленным технологиям культивирования Chlorella vulgaris.

Заключение

Математические модели культивирования Chlorella vulgaris в закрытых фотобиореакторах в сочетании с автоматизированными системами управления представляют собой перспективный инструмент повышения эффективности производства микроводорослей. Проведённый анализ показал, что современные модели эволюционировали от простых кинетических уравнений к комплексным динамическим системам, учитывающим взаимодействие ключевых факторов: освещения, массопереноса CO_2, pH, температуры и светового затухания.

Экспериментально подтверждённые модели демонстрируют достаточную точность для практического применения. Использование математических моделей позволяет оптимизировать технологические режимы, повышать продуктивность биомассы и улучшать энергоэффективность процесса. Значительный прогресс наблюдается в интеграции моделей с системами автоматического управления, включая нечётко-логические регуляторы, метаэвристические алгоритмы и мягкие датчики.

Однако для широкого промышленного внедрения необходимо решение ряда задач: снижение вычислительной сложности моделей, повышение их устойчивости к нестационарным внешним условиям, а также разработка гибридных интеллектуальных систем, объединяющих кинетическое моделирование, CFD-подходы и элементы искусственного интеллекта.

В заключение можно отметить, что дальнейшее развитие математического моделирования и автоматизированных систем управления позволит создать эффективные промышленные технологии культивирования Chlorella vulgaris, сочетающие высокую продуктивность, экологическую безопасность и экономическую эффективность.

Исследовательская работа проводилась в условиях проекта «Разработка автоматизированной линии биореакторов для непрерывного производства биогаза и удобрений» ИРН № AP26195367, по вопросу альгофиторемедиации жидкой фракции переработки субстрата».

Список литературы

1. Knyazeva O.E. Chlorella vulgaris kak tsennyi resurs v razlichnykh otraslyakh / O.E. Knyazeva, E.A. Lyashenkova // Problemy regional'noi ehkologii, 2025. https://doi.org/10.24412/1728-323X-2025-1-30-33. (In Russian).

2. Abu-Reesh I.M. Mathematical Model-Based Optimization of Continuous Flow Photobioreactor Operating at Steady State Using MATLAB Optimization Function / I.M. Abu-Reesh // Arab J Sci Eng. – 2025. – T. 50, № 6. – P. 3779-3792. https://doi.org/10.1007/s13369-024-09155-7.

3. Comparative assessment of microalgal growth kinetic models based on light intensity and biomass concentration / A.F. Esteves et al // Bioresource Technology. – 2024. – T. 394. – P. 130167. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.130167.
4. Kinetic characteristics and modeling of microalgae Chlorella vulgaris growth and CO2 biofixation considering the coupled effects of light intensity and dissolved inorganic carbon / H.X. Chang et al // Bioresource Technology. – 2016. – T. 206. – P. 231-238. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.01.087.
5. Al Ketife A.M.D. A mathematical model for carbon fixation and nutrient removal by an algal photobioreactor / A.M.D. Al Ketife, S. Judd, H. Znad // Chemical Engineering Science. – 2016. – T. 153. – P. 354-362. https://doi.org/10.1016/j.ces.2016.07.042.
6. Bryankin K.V. Matematicheskoe modelirovanie protsessa kul'tivirovaniya mikrovodorosli Chlorella / K.V. Bryankin, A.K. Bryankina, M.A. Es'kova // TRNiO. – 2023. – T. 93, № 9. – S. 15-18. (In Russian).
7. Growth of Chlorella vulgaris Under Atmospheric CO2 in Lab-Scale Photobioreactors: Effects of Aeration Rate and Growth Model Comparison / V.A. Pavlov et al // Bioengineering. – 2025. – T. 12, № 12. – P. 1294. https://doi.org/10.3390/bioengineering12121294.
8. Experimental analysis and novel modeling of semi-batch photobioreactors operated with Chlorella vulgaris and fed with 100% (v/v) CO2 / A. Concas et al // Chemical Engineering Journal. – 2012. – T. 213. – P. 203-213. https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.09.119.
9. Numerical Simulation of Radiation Transport to Improve Microalgae Cultivation in an Air-Lift Photobioreactor / X. Zhang et al // J. Therm. Sci. – 2025. – T. 34, № 1. – P. 62-76. https://doi.org/10.1007/s11630-024-2046-5.
10. Growth kinetic model of Chlorella vulgaris in a dark biogas slurry culture system based on a light attenuation model / X. Liu et al // Algal Research. – 2025. – T. 85. – P. 103821. https://doi.org/10.1016/j.algal.2024.103821.
11. Modelling and Simulation of the Effect of Irradiance Related Temperature on Microalgae Cell Growth in an Outdoor Culture for a Horizontal Loop Tubular Photobioreactor / Md.K.H. Chowdury et al // Contemp. Math. – 2025. – P. 425-441. https://doi.org/10.37256/cm.6120253205.
12. Weise T. Experimental and Model-Based Analysis to Optimize Microalgal Biomass Productivity in a Pilot-Scale Tubular Photobioreactor / T. Weise, C. Grewe, M. Pfaff // Front. Bioeng. Biotechnol. – 2020. – T. 8. – P. 453. https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00453.
13. Towards Optimisation of Microalgae Cultivation through Monitoring and Control in Membrane Photobioreactor Systems / J.F. Mora-Sánchez et al // Water. – 2023. – T. 16, № 1. – P. 155. https://doi.org/10.3390/w16010155.
14. Pulido-Aponte Á. Monitoring and Control System for Closed Microalgae Cultures at Pilot Scale / Á. Pulido-Aponte, V. Sangregorio-Soto, C.L. Garzón-Castro // 2023 13th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE). Bucharest, Romania: IEEE, 2023. – P. 1-6. https://doi.org/10.1109/atee58038.2023.10108267.
15. Minzu V. Control of Microalgae Growth in Artificially Lighted Photobioreactors Using Metaheuristic-Based Predictions / V. Minzu, G. Ifrim, I. Arama // Sensors. – 2021. – T. 21, № 23. – P. 8065. https://doi.org/10.3390/s21238065.
16. Novel, automated, semi-industrial modular photobioreactor system for cultivation of demanding microalgae that produce fine chemicals – The next story of H. pluvialis and astaxanthin / D. Borowiak et al // Algal Research. – 2021. – T. 53. – H. 102151. https://doi.org/10.1016/j.algal.2020.102151.
17. Dynamic Modeling of the Microalgae Cultivation Phase for Energy Production in Open Raceway Ponds and Flat Panel Photobioreactors / M. Marsullo et al // Front. Energy Res. – 2015. – T. 3. https://doi.org/10.3389/fenrg.2015.00041.
18. Techno-economic modelling of high-value metabolites and secondary products from microalgae cultivated in closed photobioreactors with supplementary lighting / S. Rezvani et al // Algal Research. – 2022. – T. 65. – H. 102733. https://doi.org/10.1016/j.algal.2022.102733.
19. Dynamical Simulation, Sensitivity, and Productivity Analysis of a Light-Photoacclimation Model for Microalgae-Based Carbohydrate Production in Continuous Photobioreactors / A. Guzmán-Palomino et al // Processes. – 2023. – T. 11, № 7. – H. 1866. https://doi.org/10.3390/pr11071866.
20. Model Based Optimal Control of the Photosynthetic Growth of Microalgae in a Batch Photobioreactor / G.A. Ifrim et al // Energies. – 2022. – T. 15, № 18. – H. 6535. https://doi.org/10.3390/en15186535.

Д.Т. Беккасимова, К.Ю. Дербышев, Д.О. Кожахметова, Ә.М. Сүгірбай, А.Д. Золотов*
Шәкәрім университеті, 071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинка к-сі 20 А
*e-mail: azol64@mail.ru

АВТОМАТТАНДЫРЫЛҒАН БАСҚАРУ ЖҮЙЕСІН ПАЙДАЛАНА ОТЫРЫП, ЖАБЫҚ ФОТОБИОРЕАКТОРЛАРДА CHLORELLA VULGARIS ӨСІРУДІҢ МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛЬДЕРІ

Бұл жұмыста микробалдырларды өсіру процестерін зерттеу, болжау және басқару үшін қолданылатын жабық фотобиореакторлардағы Chlorella vulgaris өсуінің заманауи математикалық модельдеріне талдау жүргізілді. Өсудің эмпирикалық және кинетикалық модельдері, жарықтың әлсіреуі мен таралу модельдері, фотоакклимация модельдері, сондай-ақ жарық қарқындылығының, көмірқышқыл газы концентрациясының, CO_2 массалық тасымалының, pH деңгейінің, температураның, ортаны араластырудың және басқа да технологиялық факторлардың бірлескен әсерін ескеретін кешенді динамикалық модельдер қарастырылды. Бұл модельдердің автоматтандырылған басқару, дақыл күйін мониторингтеу және технологиялық режимдерді оңтайландыру міндеттеріндегі дәлдігіне, есептеу күрделілігіне және практикалық қолданылуына ерекше назар аударылды. Математикалық модельдерді оңтайлы басқару әдістерімен, модельге негізделген болжамды басқарумен (MPC), сондай-ақ заманауи метаэвристикалық оңтайландыру алгоритмдерімен біріктіру мүмкіндіктері талданды. Қолданыстағы тәсілдердің артықшылықтары мен шектеулеріне, оның ішінде параметрлерді сәйкестендіру және модельдерді зертханалық деңгейден өнеркәсіптік фотобиореакторлар деңгейіне дейін масштабтау мәселелеріне сыни талдау жасалды. Кешенді динамикалық модельдерді интеллектуалды автоматтандырылған басқару жүйелерімен бірге қолдану биомасса өнімділігін арттыруға, технологиялық процестің тұрақтылығын қамтамасыз етуге, энергия шығындарын азайтуға және Chlorella vulgaris өсірудің жалпы тиімділігін жоғарылатуға мүмкіндік беретіні көрсетілді. Зерттеу нәтижелері фотобиореакторларды басқарудың заманауи автоматтандырылған жүйелерін әзірлеу және жетілдіру барысында пайдаланылуы мүмкін.

Түйін сөздер: *Chlorella vulgaris, фотобиореактор, математикалық модельдеу, автоматтандырылған басқару, оңтайландыру.*

D. Bekkassimova, K. Derbyshev, D. Kozhakhmetova, A. Sugirbay, A. Zolotov*
Shakarim University, 071412, Republic of Kazakhstan, Semey, Glinka St., 20A
*e-mail: azol64@mail.ru

MATHEMATICAL MODELS OF CHLORELLA VULGARIS CULTIVATION IN CLOSED PHOTOBIOREACTORS USING AN AUTOMATED CONTROL SYSTEM

This paper presents an analysis of modern mathematical models describing the growth of Chlorella vulgaris in closed photobioreactors used for the study, prediction, and control of microalgae cultivation processes. The main classes of models are considered, including empirical and kinetic growth models, light attenuation and light distribution models, photoacclimation models, and comprehensive dynamic models that account for the combined effects of light intensity, carbon dioxide concentration, CO_2 mass transfer, pH level, temperature, mixing conditions, and other technological factors. Particular attention is paid to evaluating the accuracy, computational complexity, and practical applicability of these models for automated control, culture monitoring, and process optimization. The possibilities of integrating mathematical models with optimal control methods, Model Predictive Control (MPC), and modern metaheuristic optimization algorithms are analyzed. A critical assessment of the advantages and limitations of existing approaches is performed, including issues related to parameter identification and model scaling from laboratory-scale systems to industrial photobioreactors. The analysis demonstrates that the use of comprehensive dynamic models combined with intelligent automated control systems can improve biomass productivity, process stability, reduce energy consumption, and enhance the overall efficiency of industrial Chlorella vulgaris cultivation. The results of this study can be applied to the development and improvement of advanced automated control systems for photobioreactors.

Key words: *Chlorella vulgaris, photobioreactor, mathematical modeling, automated control, optimization.*

Сведения об авторах

Данар Талгатовна Беккасимова – магистр естественных наук, докторант кафедры «Автоматизация и информационные технологии», Шәкәрім Университет, Республика Казахстан; e-mail: Dantal1976@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-0994-9793.

Камиль Юрьевич Дербышев – старший научный сотрудник ShakarimLab, Шәкәрім Университет, Республика Казахстан; e-mail: kamil.derbyshev@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6308-020X.

Динара Ошановна Кожахметова – PhD, ассоциированный профессор кафедры «Автоматизация и информационные технологии», Шәкәрім Университет, Республика Казахстан; e-mail: d.kojahmetova@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4327-3899.

Әділет Мұхитұлы Сүгірбай – PhD, Руководитель конструкторского бюро ShakarimLab, Шәкәрім Университет, Республика Казахстан; e-mail: Adulet_s_93@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3637-2749.

Александр Дмитриевич Золотов* – к.т.н., ассоциированный профессор кафедры «Автоматизация и информационные технологии», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: azol64@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9751-8161.

Авторлар туралы мәліметтер

Данар Талгатовна Беккасимова – жаратылыс ғылымдарының магистрі, «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасының докторанты, Шәкәрім Университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: Dantal1976@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-0994-9793.

Камиль Юрьевич Дербышев – ShakarimLab, «Агротехнопарк» аға ғылыми қызметкері, Шәкәрім Университет, Қазақстан Республикасы; e-mail: kamil.derbyshev@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6308-020X.

Динара Ошановна Кожахметова – PhD, «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: d.kojahmetova@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4327-3899.

Әділет Мұхитұлы Сүгірбай – PhD, ShakarimLab конструкторлық бюро жетекшісі, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: Adulet_s_93@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3637-2749.

Александр Дмитриевич Золотов* – т.ғ.к., «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: azol64@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9751-8161.

Information about the authors

Danar Bekkassimova – Master of Science, doctoral student of the Department «Automatization and Information Technology», Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: Dantal1976@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-0994-9793.

Kamil Derbyshev – Senior Researcher at ShakarimLab, Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: kamil.derbyshev@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6308-020X.

Dinara Kozhakhmetova – PhD, Associate Professor of the Department «Automation and Information Technologies», Shakarim University, Semey, Kazakhstan; e-mail: d.kojahmetova@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4327-3899.

Adilet Sugirbay – PhD, Head of the design bureau ShakarimLab, Shakarim University, Semey, Kazakhstan; e-mail: Adulet_s_93@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3637-2749.

Alexandr Zolotov* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department «Automatization and Information Technology», Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: azol64@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9751-8161.

Поступила в редакцию 08.06.2026
Поступила после доработки 27.06.2026
Принята к публикации 01.07.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-15

ҒТАХР: 20.53.19

А.М. Қасенхан, Ә.Т. Аяпбергенова*, Н.С. Байгаринова, Ә.М. Аманғосов, Ж.Н. Исабеков
Satbayev University,
050013 Қазақстан Республикасы, Алматы қаласы, Сатпаев көшесі, 22
*e-mail: a.ayapbergenova@satbayev.university

ОРТА БІЛІМ БЕРУ ҰЙЫМДАРЫНДА СЫНИ ТҰРҒЫДАН ОЙЛАУДЫ ДАМЫТУҒА АРНАЛҒАН ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ НЕГІЗІНДЕГІ ҚҰРАЛДЫ ӘЗІРЛЕУ: КЕЙС-СТАДИ

Аңдатпа: *Қазіргі білім беру жүйесінде сыни ойлау дағдыларын дамыту басты басымдықтардың біріне айналды, әсіресе күрделі мәселелерді шешуге, саналы шешім қабылдауға және өмір бойы білім алуға оқушыларды даярлау тұрғысынан. Бұл мақалада орта мектеп оқушылары арасында сыни ойлауды дамытуға бағытталған жасанды интеллектке негізделген білім беру құралының жобалануы мен алғашқы енгізілуі ұсынылады. Қосымша табиғи тілдерді өңдеу және машиналық оқыту технологияларын пайдалана отырып, көркем немесе оқу мәтіндерін талдайды және Блум таксономиясына сәйкес сұрақтар құрастырады. Бұл сұрақтар когнитивтік деңгейлердің барлығын қамтиды – қарапайым есте сақтаудан бастап талдау, бағалау және шығармашылық синтезге дейін.*

Жүйе мұғалімдерге немесе оқушыларға кез келген мәтіндік материалды жүктеуге мүмкіндік береді, соның негізінде жасанды интеллект автоматты түрде құрылымдалған, белгілі бір деңгейге сәйкес сұрақтарды жасайды. Құрамдастырылған бағалау және кері байланыс тетігі қалыптастырушы бағалауды қолдайды және өзіндік реттелетін оқуды ынталандырады. Пилоттық сынақ орта буын сыныптарында, жасы 11-13 аралығындағы оқушылармен фокус-топ форматында басталды. Негізгі деректерді жинау қазіргі уақытта жүргізілуде, бұл болашақта салыстырмалы талдау жасауға және құралдың сыни ойлауды дамытудағы ықпалын бағалауға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: *Жасанды интеллект (ЖИ), сыни ойлау, Блум таксономиясы, геймификация, мобильді оқыту.*

Кіріспе. Соңғы жылдары білім беру саласына жасанды интеллектті (ЖИ) және геймификацияны енгізу оқушылардың мотивациясын, оқу процесіне тартылуын және жоғары деңгейлі ойлау дағдыларын арттыруда айтарлықтай әлеует көрсетіп отыр. Солардың ішінде сыни ойлау оқушыларға күрделі әрі ақпаратқа бай әлемде тиімді навигация жасауға мүмкіндік беретін негізгі құзырет болып қала береді. Мұндай дағдыларды дамыту қажеттігі көптеген зерттеулерде, әсіресе жоғары цифрлық сауаттылықты және интерактивті, технологиямен жақсартылған білім беру тәжірибесіне сұранысты көрсететін Z буын оқушыларының контекстінде атап өтілді.

Геймификация оқушылардың ынтасын, интерактивтілігін және мазмұнның қабылданатын өзектілігін арттыру арқылы оқу процесіне одан әрі ықпал етеді. Зерттеулер геймификацияланған платформаларды пайдалану оқушылардың ғылым, тілді меңгеру және денсаулықты оқыту сияқты салалардағы белсенділігі мен оқу өнімділігін айтарлықтай жақсарта алатынын көрсетті.

Негізгі ережелер. Әдеби және оқу мәтіндерінің негізінде Блум тексономиясына сәйкес сұрақтарды автоматты түрде генерациялайтын пилоттық ЖИ-қосымша әзірленіп, енгізілді. Жүйе екі тілді (қазақ және орыс тілдері) қолдауды қамтамасыз етеді, бұл оны жергілікті білім беру контекстінде қолжетімді етеді. Геймификация және мобильді оқыту элементтерін пайдалану оқушылардың мотивациясы мен оқу процесіне тартылуын арттырады. Алғашқы пилоттық тестілеу нәтижелері оқушылардың когнитивтік дағдыларын және сыни тұрғыдан ойлау қабілеттерін дамыту әлеуетін көрсетеді [1, 2]. Қосымшаның архитектурасы микросервистік принциптерге негізделген және әртүрлі білім беру контексттеріне бейімделуді қамтамасыз етеді.

Материалдар мен әдістер. Білім беру саласына технологияны енгізудің артуы оқушылардың оқу процесіне тартылуын, когнитивтік дамуын және оқу нәтижелерін жақсартуға бағытталған жаңа стратегияларды алға шығарды. Солардың ішінде геймификация, мобильді

©А.М. Қасенхан, Ә.Т. Аяпбергенова, Н.С. Байгаринова, Ә.М. Аманғосов, Ж.Н. Исабеков, 2026

оқыту және ЖИ-ны қолданатын құралдар әсіресе мектеп жасындағы оқушылар арасында сыни ойлау және өзіндік реттелетін оқуды дамытуда айтарлықтай әлеует көрсетті.

Геймификация, атап айтқанда, тиімді педагогикалық тәсіл ретінде кеңінен зерттелген. Зерттеулер көрсеткендей, ойынға негізделген оқу ортасы оқушылардың мотивациясын және академиялық нәтижелерін жақсарта алады. Мысалы, Cattoni және басқалар (2024) жүргізген зертеу көрсеткендей, геймификацияланған оқыту бастауыш сынып оқушыларының оқу және жазу дағдыларын жақсартқан, оқушылар дәстүрлі әдістермен салыстырғанда көбірек қызығушылық танытып, белсенділік көрсеткен. Ұқсас оң нәтижелерді Al Ghawail және Ben Yahia (2022) университеттегі химия курсында Kahoot! қолданған зерттеуінде анықтады; бұл оқушылардың оқу процесіне тартылуын және түсінігін арттырған [3, 4].

Сандық трансформация контекстінде геймификацияны виртуалды шындық және жасанды интеллект сияқты жаңа технологиялармен біріктіру қарқынды жүріп жатыр. Мысалы, Bucchiarone (2022) оқыту жүйелерінің тиімділігін арттыру үшін геймификация элементтерін цифрлық егіз (digital twin) симуляцияларына енгізуді ұсынған [5]. Сонымен қатар, геймификацияланған мобильді қосымшалар денсаулық сақтау саласындағы білім беру (Roncal-Belzunce және басқалар, 2024) және ерте жастағы когнитивтік даму (Annuar және басқалар, 2025) сияқты әртүрлі салаларда сәттілігін көрсетті, бұл жақсы жобаланған ойын механикалары әртүрлі жас топтары мен пәндер бойынша дағдыларды дамытуға қолайлы екенін көрсетеді.

Геймификацияның өсуімен тығыз байланысты тағы бір тенденция — мобильді оқытудың дамуы, ол білімге қолжетімділікті және дараландыруды түбегейлі өзгертті. Көбінесе смартфондар немесе планшеттер арқылы жеткізілетін мобильді оқыту мультимодальды құралдарды – аудио, видео және интерактивті мазмұндарды пайдалана отырып, оқушылардың қанағаттануын және академиялық нәтижелерін жақсартады. Yuan және басқалар (2025) мұндай платформалрдың тартылуды едәуір арттыратынын хабарлаған, ал Lai және басқалар (2022) оларды өзіндік бағытталған оқытуды дамытудағы рөліне, әсіресе тіл үйрену контекстінде, оқушылардың өздерінің оқу прогресін тәуелсіз басқаруына ерекше көңіл бөлген.

Білім беруде жасанды интеллектті қолдану дараланған оқыту мен когнитивтік дамуға жаңа өлшемдер енгізеді. Блум таксономиясына сәйкес сұрақ генерациялайтын ЖИ құралдары жоғары деңгейлі ойлауды дамытуда тиімділігін көрсетті. Kwan және басқалар (2025), Ahmed және басқалар (2024) генеративті ЖИ тест тапсырмаларын әртүрлі қиындық деңгейлері мен когнитивтік талаптарға сай жасауға қабілетті екенін көрсетеді, бұл оқушылардың материалмен сыни түрде жұмыс істеуін ынталандырады [4, 5]. Сонымен қатар, Chardonnens (2025) ЖИ дараландыру мен кері байланысты қолдайтынын атап өтса да, оның педагогикалық құндылығы өзін-өзі реттеу және сыни ойлауды дамытуға бағытталған метакогнитивтік стратегияларды біріктіруге тәуелді екенін көрсетеді. Блум таксономиясының практикалық тиімділігі кеңірек оқу контекстінде де расталған. Мысалы, Craig және Karabas (2025) жаңартылған таксономияны қолдана отырып, тұрақты даму ғылымы саласындағы интердисциплинарлық MBA курсын құрылымдаған.

Блум негізіндегі дизайн бастауыш деңгейде де қолданыста бар. Diab және басқалар (2024) үшінші сыныптағы ғылым сабағында сұраққа негізделген оқытуды қолдау үшін PhET интерактивті симуляцияларын қолдануды зерттеген. Оқу тапсырмаларын Блумның когнитивтік деңгейлеріне сәйкес үйлестіру арқылы олар студенттердің түсінуін, қолдануын және пайымдауын жүйелі түрде бағалай алған. Симуляцияға негізделген тапсырмаларға қатысқан оқушылар мазмұнды меңгеру мен мәселені түсіндіру бойынша өз әріптестерінен озық нәтиже көрссеткен, бұл когнитивтік таксономияларға негізделген цифрлық құралдардың ерте кезеңдегі сыни ойлау дағдыларын дамытудағы құндылығын көрсетеді [6].

Осы көзқарасты онлайн оқытуға кеңейтетін болсақ, Vijayakumar және басқалар (2023) Блум таксономиясының жоғары деңгейлі ойлаау дағдыларын мақсат ететін компьютерлік бағалауды жобалаудағы рөлін зерттеген. Ауызша және презентациялық дағдылар курсында жүргізілген зерттеу құрылымдалған, Блумға сәйкес тапсырмалар сыни ойлау, аналитикалық пайымдау және шығармашылық қабілетті айтарлықтай жақсартатынын көрсетті. Оқушылар бұл тапсырмаларды когнитивтік тұрғыдан ынталандыратын деп бағалап, цифрлық білім беру орталарында таксономияға негізделген бағалау модельдерінің тиімділігін көрсетті.

Farinetti және Cagliero (2025) оқушыларды SQL тапсырмалары кезінде ChatGPT жауаптарын мақсатты түрде сынауға шақыра отырып, рефлексивтік, ізденуге негізделген тәсілді ұсынған. Оқушылар қате нәтижелерді құжаттап, олардың табиғатын түсініп, жүйенің пайымдауын сынға алуы тиіс болған. Бұл геймификацияланған стратегия ChatGPT-ны мазмұн жеткізушіден когнитивтік зерттеу объектісіне айналдырды [7].

Қарастырылған әдебиеттің тақырыптық үйлесімділігін қоосымша көрсету үшін, таңдалған академиялық деректердің аннотациялары мен автор ұсынған кілттік сөздері негізінде екі сөз бұлттары жасалды. 1-суретте көрсетілгендей, оқыту, сыни ойлау, геймификация, мобильді, ЖИ және білім беру сияқты басым терминдер зерттеу қауымдастығының педагогикалық практикаға интеллектуалды технологиялар мен ойынға негізделген тәсілдерді енгізуге деген қызығушылығының артып келе жатқанын көрсетеді. Бұл визуалды көрсеткіштер ағымдағы ғылыми дискурс пен осы зерттеудің концептуалды құрылымы арасындағы күшті сәйкестікті нығайтады.



Сурет 1 – Таңдалған рецензияланған мақалалардың (2022-2025) аннотациялары негізінде жасалған сөз бұлты

Жиі кездесетін терминдерге білім беру, геймификация, мобильді оқыту, жобалық оқыту және жасанды интеллект жатады, бұл технологиялық тұрғыдан жетілдірілген педагогикалық стратегиялардың өзектілігін одан әрі растайды.

Бұл бөлім орта мектеп оқушылары арасында сыни ойлауды дамытуға арналған ЖИ-мен басқарылатын білім беру қосымшасының құрылымы, логикасы және іске асырылуын сипаттайды. Қосымша әдеби мазмұнды талдау және Блум таксономиясына сәйкес кезеңді сұрақтар генерациялау үшін табиғи тілдерді өңдеуді (Natural Language Processing) қолданады. Төменде жүйенің негізгі компоненттері, архитектуресы және пайдаланушы интерфейсі сипатталған.

1. Жүйе архитектурасы және логикасы.

Қосымшаны әзірлеу заманауи бағдарламалық инженерия тәсілін қолдана отырып, Agile принциптеріне негізделді. Жоба Agile/Scrum әдістемесі бойынша басқарылды, апталық спринт жоспарлау сессиялары және кезеңдік жаңартулар арқылы техникалық даму мен білім беру мақсаттарының үздіксіз сәйкестігі қамтамасыз етілді.

Жылдам әзірлеу, тестілеу және енгізуді қолдау үшін CI/CD (Continuous Integration / Continuous Deployment) инфрақұрылымы құрылды. Бұл инфрақұрылым кодты автоматты біріктіру, тестілеу және әзірлеу, сынақ және өндірістік ортаға енгізуді қамтамасыз етеді.

Жүйе қолданбаны модульдік, еркін байланысқан қызметтерге бөлетін микросервис архитектурасына сәйкес жасалған. Бұл қызметтер RESTful API арқылы байланысады, келешекте қосымша модульдердің ауқымдылығын, техникалық қызмет көрсетуін және икемді интеграциясын қамтамасыз етеді.

Технологиялық тұрғыдан алғанда, қосымша келесі негізгі компоненттерден тұрады:

1) Бэкэнд: Kotlin тілінде Spring Boot фреймворкін пайдаланып жүзеге асырылған. Бэкэнд бизнес-логиканы өңдеу, мазмұнды талдау және деректер базасымен өзара әрекеттесуді қамтамасыз етеді. Барлық деректер PostgreSQL реляциялық деректер базасында сақталады, ол құрылымдық мазмұн мен өнімділікті оңтайландырады.

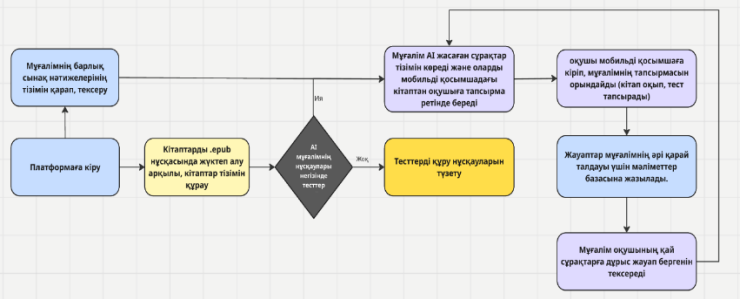
2) Фронтэнд: Web интерфейс Angular және TypeScript пайдалану арқылы жасалған, ал мобильді нұсқасы Flutter арқылы жүзеге асырылған, бұл кросс-платформалық енгізу және құрылғылар арасында біркелкі пайдаланушы тәжірибесін қамтамасыз етеді.

3) API қабаты: RESTful API клиент интерфейстері мен бэкэнд қызметтері арасындағы байланысты қамтамасыз етеді, деректерді қауіпсіз және тиімді алмастыру процесін қамтамасыз етеді.

Бұл қабаттық архитектура білім беру мазмұнын және бағалау құралдарын сенімді әрі масштабталатын түрде жеткізуге мүмкіндік береді. Сонымен қатар, ол Блум таксономиясына негізделген табиғи тілдерді өңдеу және сұрақ генерациялау сияқты жетілдірілген ЖИ модульдерін интеграциялауға негіз болып қызмет етеді, бұл келесі бөлімдерде талқыланады.

2. Жұмыс үрдісінің дизайны.

Қосымшаның жұмыс процесі мұғалімдер, оқушылар және ЖИ жүйесі арасында үздіксіз өзара әрекеттесуді қамтамасыз ету үшін жобаланған. Процесс мұғалім платформасына кіріп, тест генерациясы үшін пайдаланылатын әдеби мәтінді (.epub форматында) жүктеуден басталады. Жүйе содан кейін ЖИ негізіндегі генераторға арналған нақты нұсқауларды енгізу интерфейсін ұсынады (мысалы, сұрақ түрлері, Блум деңгейіне бағыттау немесе тақырыптық фокус). Нұсқаулар жіберілгеннен кейін ЖИ модулі автоматты түрде тест жасауды орындайды. Мұғалімдер әрбір оқушының нәтижелерін – дұрыс жауаптардың саны, шешілген сұрақтардың когнитивтік деңгейі және өнімділік тенденцияларын – нәтижелер тақтасы арқылы көре алады. Төмендегі 2-сурет жұмыс процесінің толық логикасын көрсетеді: жүйеге кіруден және мазмұн жүктеуден бастап, ЖИ негізіндегі сұрақ генерациясы, оқушының өзара әрекеті және мұғалімнің талдауына дейінгі кезеңдер.



Сурет 2 – ЖИ-мен басқарылатын білім беру жүйесінің жұмыс процесі

Диаграмма мұғалім, ЖИ модулі, оқушы және тест генерациясы, тапсырмаларды тапсыру және өнімділікті талдау үшін жауапты бэкэнд компоненттері арасындағы өзара әрекеттесу ағынын көрсетеді. Жұмыста алдын-ала және қорытынды тестілеумен (pre-test/post-test design) квази-эксперименттік дизайн қолданылды.

Зерттеу төрт кезеңнен тұрды:

– Дайындық кезеңі-жасанды интеллект негізінде құралды әзірлеу, диагностикалық материалдарды дайындау және қатысушыларға нұсқау беру.

– Алдын ала диагностика – эксперименттік және бақылау топтары оқушыларының сыни ойлауының бастапқы деңгейін анықтау.

– Апробация кезеңі-оқу іс-әрекеті аясында 8 апта ішінде әзірленген құралды пайдалану. Эксперименттік топтың оқушылары ақпаратты талдау, дереккөздердің дұрыстығын бағалау, дәлелдеу және интеллектуалды жүйені қолдана отырып проблемалық жағдайларды шешу бойынша тапсырмаларды орындады. Бақылау тобы осындай тапсырмаларды дәстүрлі әдістермен орындады.

– Қорытынды диагностика және нәтижелерді талдау-қайта тестілеу және алынған деректерді салыстырмалы талдау.

3. ЖИ негізіндегі тест генерациялау қозғалтқышы.

ЖИ-мен басқарылатын тест генерациялау модулі қосымшаның педагогикалық ядросын құрайды. Ол соңғы табиғи тілдерді өңдеу (NLP) әдістері мен ірі тілдік модельдерге (LLM) негізделіп жасалған және таңдалған әдеби мәтіндерге сәйкес оқу мақсаттарына бағытталған мағыналы сұрақтарды автоматты түрде өндіруге арналған. Жүйе бағалау мазмұнын оқушылардың когнитивтік деңгейлері мен мұғалімдер анықтаған оқу мақсаттарына бейімдейді.

ЖИ модулі Retrieval-Augmented Generation (RAG) технологиясын пайдаланады. Бастапқы мәтіннің векторлық ендірмелері InstructorXL немесе text-embedding-ada-002 сияқты модельдер арқылы жасалып, семантикалық іздеу индексінде сақталады. Сұрақтар генерацияланған кезде LLM арнайы сұрау (prompt) арқылы бағытталады, онда сұрақ түрі, саны және күрделілігі көрсетіледі, сондай-ақ шығарылатын нәтижелер бастапқы мәтін фрагменттеріне негізделеді.

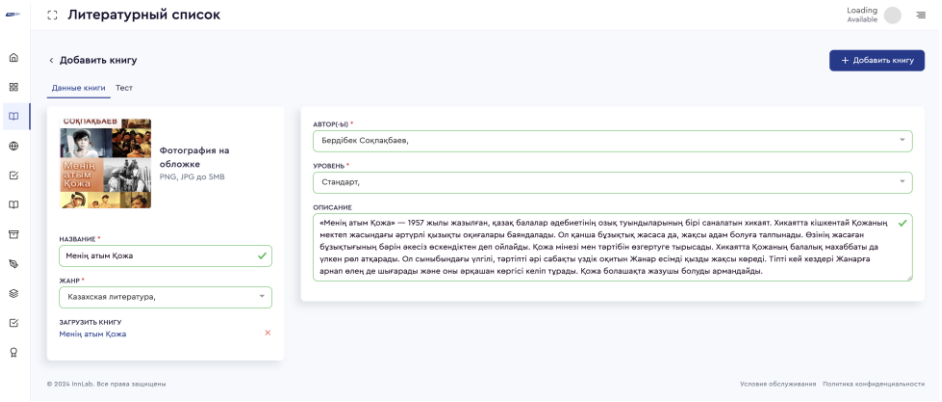
Оқушылардың жауаптары автоматты түрде дұрыс жауаптармен салыстырылады. Дәлдікке қосымша, жүйе жауап беру уақытын да бағалау логикасына қосады, бұл өнімділікті дәлірек бақылауға мүмкіндік береді. Тест аяқталғаннан кейін оқушыларға автоматты кері байланыс беріледі: түсіну деңгейі, күшті және әлсіз жақтары, ұсынылған әрекеттер (мысалы, белгілі бір тарауларды қайта оқу немесе қиындыққа негізделген қайта әрекет жасау). Прогресс түсіну, талдау және интерпретаация сияқты когнитивтік категориялар бойынша да бақыланады, бұл болашақ оқу жолдарын жоспарлау мен бейімделген сұрақтарды таңдау үшін пайдалы.

4. Қосымшаның интерфейсі және функциялары.

Қосымша мұғалімдер мен оқушылар үшін қолайлы интерфейс ұсынады. Функционалдық мүмкіндіктер кросс-платформалық мобильді және веб орталар арқылы қолжетімді. Бұл бөлім жүйенің негізгі ерекшеліктерін интерфейс скриншоттары арқылы көрсетеді.

5. Кітап жүктеу интерфейсі.

Кітап жүктеу интерфейсінде (3-сурет) мұғалімдер әдеби шығарманы .epub форматында жүктей алады. Файлмен бірге олар кітаптың метадеректерін енгізеді: атауы, автор(лар), жанры, оқу деңгейі және қысқаша сипаттамасы. Бұл ақпарат жүйеге мазмұнды құрылымдауға және ЖИ-ға сұрақтарды генерациялауда бағыт беру үшін қолданылады. Интерфейс пилоттық топтың тілдік контекстіне сәйкес орыс және қазақ тілдерін қолдайды.



Сурет 3 – Кітап жүктеу интерфейсі (негізгі интерфейс орыс және қазақ тілдерінде)

Интерфейс мұғалімге әдеби мәтінді жүктеуге, метадеректерді (атауы, авторы, жанры, оқу деңгейі) қосуға және қысқаша мазмұн беруге мүмкіндік береді. Бұл мәліметтер ЖИ негізіндегі сұрақ генерациялау модулін мазмұн контекстінде дұрыс бағыттауға көмектеседі.

6. Кітап кітапханасының көрінісі.

Жүктелгеннен кейін барлық кітаптар орталықтандырылған цифрлық кітапханада сақталады, оған пайдаланушы қол жеткізе алады. Кестелік көрініс әр кітаптың негізгі метадеректері көрсетіледі: атауы, жанры, автор(лар), және белгіленген оқу деңгейі. Пайдаланушылар кітаптарды сұрыптай, сүзгіден өткізе немесе тест генерациясына өту үшін таңдай алады.

7. Жасанды интеллектте жасалған сұрақтар.

Қосымша мұғалімдерге таңдалған мәтін бөлігіне негізделген тест сұрақтарын автоматты түрде жасауға мүмкіндік береді.

Әр сұрақта жауап нұсқалары көрсетіледі, дұрыс жауап алдын ала таңдалған. Мұғалімдер сұрақтарды тағайындамас бұрын қарап, түзете немесе өшіре алады. Интерфейс екі тілде генерацияны қолдайды, бұл жүйеге сұрақтарды қазақ және орыс тілдерінде жасау және көрсетуге мүмкіндік береді, мазмұн мен мақсатты аудиторияға байланысты.

8. Генерациялау процесі интерфейсі.

Генерациялау кезеңінде жүйе жүктелген кітап бөлігін және пайдаланушы анықтаған параметрлерді өңдейді. ЖИ моделі сұрақтарды құрастыру кезінде интерфейс динамикалық жүктеу анимациясын және прогресс күйін көрсетеді («Генерируется...» – орыс тілінде «Генерацияланда...» дегенді білдіреді).

Мұғалімдер осы кезеңде нәтижелік сұрақтарды қарап шығудан бұрын қысқа уақыт күтуге шақырылады. Құрылымдалған процесс сұрақтарды жасаудағы бақылау мен

мөлшерлеуді қамтамасыз етеді, бұл педагогикалық бақылау және ЖИ шығарылымын қайталап жетілдіру үшін маңызды [8-10].

Нәтижелер мен талқылау

1.Ағымдағы пилоттық іске асырылуы.

Қосымша қазіргі уақытта нақты білім беру ортасында пилоттық тестілеу кезеңінде тұр. Фокус-топ жеке мектептің 6А сыныбынан 18 оқушыдан құрылды. Әкімшілік рұқсатымен топ платформаға қосымша білім беру аясында оқуға және сыни ойлау дағдыларын дамыту бағдарламасының бөлігі ретінде қол жеткізе алды.

Жазғы демалыс кезінде оқушылар Бердібек Соқпақбаевтың қазақ тіліндегі «Менің атым Қожа» романын оқуға шақырылады. Бұл кітап қазақ балалар әдебиетінің негізін қалаушы туындысы ретінде қарастырылады және оқушылардың когнитивтік және тілдік дамуына сәйкес болу үшін әдебиет пәнінің мұғалімдерімен кеңесіп таңдалды.

2. Жоспарланған функциялар және кеңейту.

Алғашқы оқу тізімі мәдени және педагогикалық маңыздылығын қамтамасыз ету мақсатында мұғалімдермен бірлесіп әзірленді. Бұл цифрлық кітапхана әртүрлі жанрлар мен қиындық деңгейіндегі мәтіндерді қамтитындай етіп үздіксіз кеңейтіліп отырады. Оқушылар жүйемен өзара әрекеттесе бастаған сайын, оқу преференциялары, көрсеткіштері және өзара әрекет тарихынан жиналған деректер персонализацияланған ұсыныс жүйесін жасау үшін қолданылатын болады.

3. Болашақ зерттеулер бағыттары.

Болашақ зерттеулер платформаның оқушылардың сыни ойлау дағдыларын дамытуға әсерін сандық тұрғыда бағалауға бағытталатын болады. Жоспарланған зерттеулерге оқушылардың логикалық ойлау қабілеттерін тестілеуден бұрын және кейін бағалау, ЖИ өзара әрекет логтарын пайдаланып оқу мінез-құлқын талдау, сондай-ақ мұғалімдердің бақылаулары кіреді.

Нәтижелер жасанды интеллект негізінде әзірленген құралды пайдаланған эксперименттік топ оқушыларында сыни ойлау көрсеткіштерінің айқынырақ өсуін көрсетеді.

Нәтижелерді салыстыру эксперименттік топ оқушыларының келесі көрсеткіштер бойынша айтарлықтай жақсарғанын көрсетті:

– ақпаратты талдау-орташа балды 28-ге арттыру%;

– логикалық қателерді анықтау – 24%;

– өз ұстанымын дәлелдеу – 31%;

– сандық көздердің дұрыстығын бағалау – 35%.

Бақылау тобында ұқсас көрсеткіштер 8-15% аралығында өсті, бұл интеллектуалды құралды пайдаланбай дәстүрлі білім беру процесіне байланысты болуы мүмкін.

Сонымен қатар, көптілді қолдауды кеңейту, сұрақ түрлерінің әртүрлілігін арттыру және мұғалімдерге арналған аналитикалық бақылау тақталарын жетілдіру жоспарланған. Ұзақ мерзімді мақсат – әртүрлі білім беру контекстіне бейімделе алатын, деректерге негізделген толық масштабталатын оқу жүйесін ұсыну, сонымен қатар тілдік және мәдени ерекшеліктерді сақтау.

Қорытынды. Бұл зерттеу орта мектеп оқушыларының сыни ойлау дағдыларын дамытуға арналған ЖИ негізіндегі білім беру қосымшасының әзірленуі мен алғашқы іске асырылуын ұсынады. Жүйе жасанды интеллект, Блумның таксономиясы және екі тілді қолдауды біріктіріп, әдеби мәтіндерден құрылымдық, когнитивтік қабатталған сұрақтарды автоматты түрде генерациялайды. Қазіргі заманғы микросервистік архитектура және көп платформалы интерфейс қолдана отырып жасалған қосымша оқушылар мен мұғалімдерді интуитивті контент басқару, бағалау құралдары және нақты уақыттағы кері байланыс арқылы қолдайды.

Айырмашылықтардың статистикалық маңыздылығын тексеру үшін тәуелді және тәуелсіз үлгілер үшін студенттің t-критерийі қолданылды.

Талдау нәтижелері көрсетті:

- эксперименттік топ: $t = 7,42$; $p < 0,001$;
- бақылау тобы: $t = 2,18$; $p = 0,036$;
- қорытынды нәтижелер бойынша топтар арасындағы айырмашылықтар: $t = 5,11$; $p < 0,001$.

Эффект мөлшері (Cohen ' s d) 1,24 болды, бұл әзірленген құралды қолданудың жоғары практикалық әсеріне сәйкес келеді.

Апробация аяқталғаннан кейін эксперименттік топ қатысушыларына сауалнама жүргізілді.

Келесі нәтижелер алынды:

– оқушылардың 87% ақпаратты талдауға қызығушылықтың артқанын атап өтті;

– 83% аргумент дағдыларының жақсарғанын хабарлады;

– 91% жүйенің ыңғайлылығын көрсетті;

– 85% оқу процесінде құралмен жұмысты жалғастыруға дайын екендіктерін білдірді.

Нәтижелер әзірленген құралдың орта мектеп оқушыларында сыни ойлау дағдыларын қалыптастыруға оң әсерін көрсетеді. Жасанды интеллектті пайдалану жекелендірілген кері байланысты, тапсырмалардың күрделілігін бейімдеуді және оқушылардың рефлексиялық әрекеттерін қолдауды қамтамасыз етті. Бұл дәстүрлі оқыту әдістерімен салыстырғанда жоғары білім беру нәтижелеріне ықпал етті.

Зерттеу бір жалпы білім беретін мектеп базасында кейс-стади форматында жүргізілді. Пилоттық сынаққа 13-15 жас аралығындағы 8-9 сыныптардың 60 оқушысы қатысты. Әзірленген құралдың тиімділігін бағалау үшін қатысушылар екі топқа бөлінді:

– эксперименттік топ-сыни ойлауды дамыту бойынша тапсырмаларды орындау үшін жасанды интеллект негізіндегі құралды пайдаланған 30 оқушы;

– бақылау тобы-әзірленген құралды қолданбай дәстүрлі әдістеме бойынша оқыған 30 оқушы.

Қатысушыларды іріктеу ата-аналардың және білім беру мекемесі әкімшілігінің келісімімен ерікті қатысу қағидаты бойынша жүзеге асырылды. Топтар зерттеудің бастапқы кезеңінде жасына, оқу үлгеріміне және сыни ойлау дағдыларының қалыптасу деңгейіне сәйкес болды.

Қорытындылай келе, бұл жұмыс мектептерде сыни ойлауды дамытуға арналған масштабталатын және контекстке бейімделген шешімді ұсынып, интеллектуалды білім беру технологиялары бойынша әдебиеттің өсуіне үлес қосады. Қолданыстағы оқу бағдарламаларына интеграциялануы және тілдер мен сынып деңгейлері бойынша бейімделгіштігі оны болашақ білім беру инновациялары үшін перспективалы құралға айналдырады.

Әдебиеттер тізімі

1. Chardonnens S. Adapting educational practices for Generation Z: Integrating metacognitive strategies and artificial intelligence / S. Chardonnens // Frontiers in Education. – 2025. – vol. 10, Art. 1504726, 2025. https://doi.org/10.3389/feduc.2025.1504726.

2. Harnessing the power of ChatGPT to develop effective MCQ-based clinical pharmacy exams / A. Ahmed et al // J. Res. Technol. Educ. – 2024. – P. 1-11. https://doi.org/10.1080/15391523.2024.2425435.

3. Reimagining flipped learning via Bloom’s taxonomy and student–teacher–GenAI interactions / P. Kwan et al // Educ. Sci. – 2025. – vol. 15, № 4, Art. 465. https://doi.org/10.3390/educsci15040465.

4. How to improve reading and writing skills in primary schools: A comparison between gamification and pen-and-paper training / A. Cattoni et al // Int. J. Child-Comput. Interact. – 2024. – vol. 39, Art. 100633. https://doi.org/10.1016/j.ijcci.2024.100633.

5. Optipharm: Enhancing pharmacological management skills in healthcare students for geriatric care through gamified e-learning / V. Roncal-Belzunce et al // Int. J. Med. Inform. – 2024. – vol. 190, Art. 105535. https://doi.org/10.1016/j.ijmedinf.2024.105535.

6. Gamification and academic ability impact on students' meta-cognition and critical thinking skills / A. Abbassyakhrin et al // Res. Dev. Educ. (RaDEn). – 2024. – vol. 4, № 1. – P. 127-137. https://doi.org/10.22219/raden.v4i1.32126.

7. Al Ghawail E.A. Using the e-learning gamification tool Kahoot! to learn chemistry principles in the classroom / E.A. Al Ghawail, S. Ben Yahia // Procedia Comput. Sci. – 2022. – vol. 207. – P. 2667-2676. https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.09.325.

8. Discussing the protagonist role of students in game-based learning / P.F. Weixelbraun et al // Proc. ACM Hum.-Comput. Interact. – 2024. – vol. 8 (CHI PLAY), Art. 300. https://doi.org/10.1145/3677065.

9. Govender T. Narrative alchemy: Co-creating a game-based extensive reading framework for adult language learners / T. Govender, J. Arnedo-Moreno // Entertainment Comput. – 2025. – vol. 52, Art. 100870. https://doi.org/10.1016/j.entcom.2024.100870.
10. Wang P. A bibliometric analysis of digital game-based learning in educational contexts / P. Wang, H. Yi // Res. Pract. Technol. Enhanc. Learn. – 2025. – vol. 20, Art. 37. https://doi.org/10.58459/rptel.2025.20037.

Алғыс білдіру

Бұл зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландыратын ғылыми жоба аясында орындалды (Грант № BR24993072).

А.М. Касенхан, А.Т. Аяпбергенова*, Н.С. Байгаринова, Ә.М. Аманғосов, Ж.Н. Исабеков
Satbayev University,
050013 Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22
*e-mail: a.ayapbergenova@satbayev.university

РАЗРАБОТКА ИНСТРУМЕНТА НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ РАЗВИТИЯ КРИТИЧЕСКОГО МЫШЛЕНИЯ В СРЕДНЕМ ОБРАЗОВАНИИ: КЕЙС-СТАДИ

Аннотация: *Развитие навыков критического мышления стало одной из ключевых задач современного образования, особенно в подготовке учащихся к сложному решению проблем, принятию обоснованных решений и непрерывному обучению на протяжении всей жизни. В данной работе представлен дизайн и начальное внедрение образовательного инструмента на основе искусственного интеллекта, направленного на развитие критического мышления у учеников средних школ. Приложение использует технологии обработки естественного языка и машинного обучения для анализа литературных или учебных текстов и генерации вопросов, соответствующих Таксономии Блума, охватывающей все когнитивные уровни – от базового воспроизведения информации до анализа, оценки и творческой синтезы.*

Система позволяет преподавателям или учащимся загружать любые текстовые материалы, после чего ИИ автоматически формирует структурированные вопросы, ориентированные на конкретный уровень сложности и соответствующие изучаемому материалу. Интегрированный механизм оценки и обратной связи поддерживает формирующее оценивание и стимулирует самостоятельное обучение. Пилотное тестирование начато в средней школе с фокус-группой учащихся в возрасте 11-13 лет. В настоящее время проводится сбор исходных данных для последующего сравнительного анализа и оценки влияния инструмента на развитие критического мышления.

Ключевые слова: *Искусственный интеллект (ИИ), критическое мышление, таксономия Блума, геймификация, мобильное обучение, адаптивные образовательные системы, среднее образование.*

A.M. Kasenhan, A.T. Ayapbergenova*, N.S. Baigarinova, A.M. Amangosov, Zh.N. Issabekov
Satbayev University,
050013 22 Satpayev Street, Almaty, Republic of Kazakhstan
*e-mail: a.ayapbergenova@satbayev.university

DEVELOPMENT OF AN AI-POWERED TOOL FOR ENHANCING CRITICAL THINKING IN SECONDARY EDUCATION: A CASE STUDY

The development of critical thinking skills has become a central priority in contemporary education, especially in preparing students for complex problem-solving, informed decision-making, and lifelong learning. This paper presents the design and initial deployment of an AI-powered educational tool aimed at fostering critical thinking among secondary school students. The application leverages natural language processing and machine learning to analyze literary or instructional texts and generate questions aligned with Bloom's Taxonomy, encompassing all cognitive levels – from basic recall to analysis, evaluation, and creative synthesis.

The system enables educators or learners to upload any text-based content, upon which the AI automatically generates structured, level-specific questions tailored to the material. An integrated scoring and feedback mechanism supports formative assessment and encourages self-regulated learning. Pilot testing has been initiated in a middle school setting with a focus group of students aged 11-13. Baseline data collection is currently underway to enable future comparative analysis and evaluation of the tool's impact on critical thinking development.

Key words: *Artificial Intelligence (AI), critical thinking, Bloom's taxonomy,gamification, mobile learning, adaptive learning systems, secondary education.*

Авторлар туралы мәліметтер

Арай Мейрамбайқызы Қасенхан – PhD, қауымдастырылған профессор, Satbayev University; e-mail: a.kassenkhan@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6355-9544.

Әсем Тултанқызы Аяпбергенова* – магистр, Satbayev University; e-mail: a.ayapbergenova@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6388-9458.

Назерке Серікханқызы Байгаринова – магистр, Satbayev University; e-mail: n.baigarinova@satbayev.university.

Әділет Маратұлы Аманғосов – магистр, Satbayev University; e-mail: adilet.amangossov@gmail.com.

Жанібек Назарбекұлы Исабеков – PhD, қауымдастырылған профессор, Satbayev University; e-mail: z.issabekov@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2900-8025.

Сведения об авторах

Арай Мейрамбаевна Касенхан – PhD, ассоциированный профессор, Satbayev University; e-mail: a.kassenkhan@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6355-9544.

Асем Тултановна Аяпбергенова* – магистр, Satbayev University; e-mail: a.ayapbergenova@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6388-9458.

Назерке Серикхановна Байгаринова – магистр, Satbayev University; e-mail: n.baigarinova@satbayev.university.

Адилет Маратович Амангосов – магистр, Satbayev University; e-mail: adilet.amangossov@gmail.com.

Жанібек Назарбекұлы Исабеков – PhD, ассоциированный профессор, Satbayev University; e-mail: z.issabekov@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2900-8025.

Information about authors

Arai Meirambayevna Kassenkhan – PhD, associate professor, Satbayev University; e-mail: a.kassenkhan@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6355-9544.

Assem Tultanovna Ayapbergenova* – master's, Satbayev University; e-mail: a.ayapbergenova@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6388-9458.

Nazerke Serikkhanovna Baigarinova – master, Satbayev University; e-mail: n.baigarinova@satbayev.university.

Adilet Amangosov – master's degree, Satbayev University; e-mail: adilet.amangossov@gmail.com.

Zhanibek Nazarbekuly Issabekov – PhD, associate professor, Satbayev University; e-mail: z.issabekov@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2900-8025.

Редакцияға енуі 14.04.2026
Өңдеуден кейін түсуі 29.06.2026
Жариялауға қабылданды 24.08.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-16

МРНТИ: 47.05.17

CC BY 4.0
Check for updates

А.С. Инчин[1], А.З. Айтмагамбетов[1,2], А.Е. Кулакаева[2]*, С.Ж. Жұмағали[1], У.К. Уали[1]
[1]ТОО «Институт космической техники и технологий»,
050061, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Кисловодская, 34
[2]АО «Международный университет информационных технологий»,
050040, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Манаса, 34/1
*e-mail: a.kulakayeva@iitu.edu.kz

ОЦЕНКА ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ МОДУЛЕЙ НАВИГАЦИОННОЙ ПЛОМБЫ

Аннотация: *В статье представлено исследование энергопотребления модульной навигационной пломбы, используемой в системах мониторинга грузоперевозок. Ограниченное время автономной работы является одним из эксплуатационных факторов, влияющих на надежность контроля груза. Цель работы заключалась в разработке испытательного стенда и количественной оценке вклада отдельных модулей в общее*

©А.С. Инчин, А.З. Айтмагамбетов, А.Е. Кулакаева, С.Ж. Жұмағали, У.К. Уали, 2026

энергопотребление устройства для последующей настройки алгоритмов управления питанием.

Для проведения исследования был разработан стенд на базе датчиков тока и напряжения INA219 и микроконтроллера Raspberry Pi Pico. Стенд обеспечивал автоматическую регистрацию и сохранение результатов измерений. В ходе испытаний оценивалось энергопотребление GSM-модуля SIM800C, GPS-модуля MAX-8Q, Bluetooth-модуля HC-09, NFC-модуля RC522, центрального микроконтроллера и датчика AHT20 в активном и спящем режимах. Расчет среднего тока и времени автономной работы при емкости аккумулятора 3500 мА·ч выполнялся с учетом циклической активации устройства и передачи данных.

Результаты показали, что суммарный потребляемый ток в активном режиме составляет около 272 мА, а в спящем режиме – 2,8 мА. При активации устройства каждые 15 минут расчетное время автономной работы достигает 16,6 суток, что показывает эффективность применения энергосберегающих режимов.

Разработанный стенд позволил получить воспроизводимые данные об энергопотреблении отдельных модулей навигационной пломбы. Также полученные результаты могут быть использованы для настройки режимов работы GSM, GPS, Bluetooth, NFC-модулей и датчиков, а также для повышения энергоэффективности устройств, применяемых в логистическом мониторинге.

Ключевые слова: *испытательный стенд, модульные навигационные пломбы, логистические системы, энергоэффективность, управление энергопотреблением, мониторинг, контроль.*

Введение

В логистических системах все большее значение имеет непрерывный контроль состояния и местоположения грузов во время перевозки. Для этого применяются электронные навигационные пломбы (НП), которые позволяют фиксировать перемещение груза, контролировать факт вскрытия и передавать данные в режиме реального времени. Надежность таких устройств особенно важна при длительных маршрутах, когда доступ к НП ограничен, а замена источника питания или самого устройства затруднена.

На практике многие НП выполнены в виде единого устройства, где навигационный модуль, модуль связи, датчики и блок питания размещены в одном корпусе. Такой подход упрощает конструкцию, но имеет и ограничения. При отказе одного компонента часто требуется ремонт или замена всего устройства. Кроме того, модернизация отдельных узлов, например GSM, GPS или Bluetooth-модуля, становится менее удобной.

В связи с этим актуальным направлением является разработка модульной НП, в которой отдельные функциональные элементы могут быть заменены или доработаны без изменения всей системы. Такой подход позволяет упростить обслуживание устройства, снизить эксплуатационные затраты и выбрать более рациональные режимы энергопотребления для каждого модуля. Это особенно важно для автономных НП, работающих длительное время без внешнего электропитания.

Так, современные системы мониторинга грузов используют электронные НП, в состав которых обычно входят модуль определения координат, канал передачи данных, датчики состояния и управляющий контроллер. В большинстве известных решений эти элементы объединены в единую конструкцию. Такой вариант удобен с точки зрения компоновки и защиты корпуса, однако он ограничивает возможность замены отдельных узлов и усложняет модернизацию устройства при изменении требований к связи, навигации или энергопотреблению [1].

В существующих литературах основное внимание, как правило, уделяется общей архитектуре НП, способам передачи данных и обеспечению контроля груза. При этом модульный принцип построения таких устройств рассматривается ограниченно. Здесь есть отдельный практический нюанс. Для устройств, работающих в длительном автономном режиме, важно не только обеспечить передачу координат и событий, но и понимать, какой именно узел вносит наибольший вклад в расход энергии.

Модульный подход позволяет рассматривать различные модули, датчики и управляющий контроллер как отдельные функциональные блоки. Такой подход упрощает их замену, настройку и последующую модернизацию. Аналогичный подход применяется в сенсорных сетях, IoT-устройствах и модульных робототехнических системах, где раздельное управление функциональными узлами помогает повысить гибкость системы и снизить энергопотребление за счет отключения неиспользуемых компонентов [2-4].

Для автономной НП энергопотребление является одним из основных эксплуатационных параметров. На практике значительная часть заряда аккумулятора расходуется модулями связи и навигации, особенно при передаче данных и поиске координат [5]. GSM и GPS-модули обычно формируют наибольшую нагрузку, тогда как Bluetooth, NFC и датчики окружающей среды потребляют меньше энергии, особенно в режиме ожидания или сна. Однако во многих исследованиях энергопотребление оценивается суммарно для всего устройства. Из-за этого сложно определить, какие компоненты необходимо оптимизировать в первую очередь.

В ряде исследований рассматривается энергопотребление IoT-устройств и смартфонов при использовании различных каналов связи и протоколов обмена данными [6]. Однако такие результаты не всегда можно напрямую перенести на НП, применяемые в логистических перевозках. Эти устройства работают по другим сценариям: длительное ожидание на складе или на границе, периодическая передача координат, переход между активным и спящим режимами, а также восстановление работы после пробуждения. Поэтому для оценки их автономности требуется отдельный анализ энергопотребления функциональных модулей.

В работе [7] отмечается, что GPS-модуль может заметно влиять на общий расход энергии устройства. Также показана возможность применения моделей машинного обучения для прогнозирования срока службы батареи. Вместе с тем в существующих исследованиях чаще оценивается энергопотребление устройства в целом, без детального разделения по отдельным компонентам. Из-за этого сложно определить, какой модуль формирует основную нагрузку на аккумулятор и какие режимы работы следует оптимизировать в первую очередь.

Для получения таких данных необходим измерительный стенд, позволяющий фиксировать ток и напряжение в динамике. В работах [8, 9] предложены испытательные стенды для анализа энергопрофиля IoT-устройств и робототехнических систем. Однако эти решения, как правило, не ориентированы на НП и не всегда позволяют гибко подключать разные модули. Отдельные исследования также рассматривают энергоавтономные решения, например, на базе трибоэлектрических наногенераторов [10], но такие подходы скорее относятся к перспективным источникам энергии, чем к анализу потребления уже используемых электронных компонентов.

Кроме того, в публикациях по НП значительное внимание уделяется вопросам безопасности, идентификации и управления доступом [11-13]. Энергетические характеристики отдельных модулей, а также сценарии управления питанием при разных условиях эксплуатации рассматриваются значительно реже. Это показывает необходимость разработки специализированного стенда для раздельной оценки энергопотребления модулей НП.

Цель настоящего исследования заключается в разработке и испытании стенда для оценки энергопотребления модульной НП. В работе рассматриваются различные модули, микроконтроллер, а также датчик температуры и влажности. Для каждого компонента анализируется потребление в активном режиме, режиме ожидания и спящем режиме.

Научная новизна работы состоит в раздельной оценке энергопотребления функциональных модулей НП в условиях модульной архитектуры. Такой подход позволяет определить наиболее энергозатратные компоненты и использовать полученные данные для настройки алгоритмов управления питанием. Практическая значимость исследования связана с возможностью увеличения времени автономной работы устройства без изменения всей конструкции НП.

Методы исследования

В данном исследовании оценивалось энергопотребление отдельных модулей НП, предназначенной для контроля и мониторинга грузоперевозок. В качестве исследуемых компонентов были выбраны GSM-модуль SIM800C, GPS-модуль MAX-8Q, Bluetooth-модуль

HC-09, NFC-модуль RC522, микроконтроллер, а также датчик температуры и влажности AHT20. Основное внимание было уделено работе модулей в активном режиме, режиме ожидания и спящем режиме, поскольку именно переходы между этими состояниями в дальнейшем определяют общее энергопотребление устройства.

Для проведения испытаний был разработан лабораторный стенд. В его состав вошли датчики тока и напряжения INA219, микроконтроллер Raspberry Pi Pico, OLED-дисплей для текущего отображения параметров и флеш-накопитель для сохранения результатов измерений. Каждый модуль подключался к стенду отдельно. После подключения модуль последовательно переводился в заданные режимы работы, а стенд фиксировал значения тока и напряжения в реальном времени. Такой подход позволил оценить потребление не всей НП в целом, а каждого функционального узла по отдельности.

Испытания выполнялись в лабораторных условиях технического центра Института космической техники и технологий. Во время измерений поддерживались стабильные параметры окружающей среды, чтобы снизить влияние внешних факторов на результаты. Здесь стоит учитывать, что для маломощных электронных модулей даже небольшие изменения режима работы могут заметно влиять на потребляемый ток, поэтому измерения проводились отдельно для каждого состояния.

Полученные данные использовались для последующего анализа энергопотребления модулей и выбора более рациональных режимов работы НП. Такая методика позволяет определить, какие компоненты вносят наибольший вклад в расход энергии, и на этой основе скорректировать алгоритмы управления питанием устройства.

Результаты

Разработка испытательного стенда необходима для оценки энергопотребления и работоспособности отдельных модулей НП в разных режимах. На таком стенде можно проверить, как меняется потребление при передаче данных, определении координат, переходе в спящий режим и восстановлении работы после пробуждения. Эти данные нужны для настройки алгоритмов энергосбережения и выбора режимов, при которых НП сможет дольше работать автономно без потери функций контроля перевозки.

На рисунке 1 показан GSM-модуль SIM800C, используемый в составе НП для передачи данных через сеть сотового оператора. Данный модуль обеспечивает отправку информации о местоположении устройства и состоянии груза на удаленный сервер. Его работа особенно важна в активном режиме, поскольку именно передача данных через GSM-канал обычно сопровождается повышенным энергопотреблением.



Рисунок 1 – Модуль GSM SIM800C с внешней антенной и интегрированной платой управления

GSM-модуль SIM800C используется в НП для передачи данных через сеть мобильного оператора. Модуль поддерживает работу в сетях GSM/GPRS и обеспечивает отправку информации о местоположении устройства, состоянии НП и событиях, связанных с перевозкой груза.

Конструктивно модуль включает основную микросхему связи, слот для SIM-карты, антенный разъем, индикаторные светодиоды и контактные выводы для подключения к основной плате устройства. Слот для SIM-карты используется для идентификации абонента и регистрации модуля в сети оператора. Антенный разъем предназначен для подключения внешней антенны, качество которой влияет на устойчивость соединения и уровень принимаемого сигнала. Индикаторные светодиоды позволяют визуально контролировать состояние питания, регистрацию в сети и передачу данных.

Через контактные выводы модуль подключается к системе питания и управляющему контроллеру НП. По этим линиям осуществляется обмен командами и данными между GSM-модулем и основной частью устройства. Здесь стоит учитывать, что работа GSM-модуля, особенно в режиме регистрации в сети и передачи данных, обычно сопровождается повышенным потреблением тока. Поэтому при анализе энергопотребления НП данный модуль необходимо рассматривать отдельно.

На рисунке 2 показан Bluetooth-модуль HC-09, который предназначен для беспроводного обмена данными на небольших расстояниях. В составе НП он может использоваться для настройки устройства, локального считывания данных и взаимодействия с мобильным приложением или сервисным оборудованием. В отличие от GSM-модуля, Bluetooth-модуль предназначен для ближней связи и обычно работает в более энергосберегающих режимах.

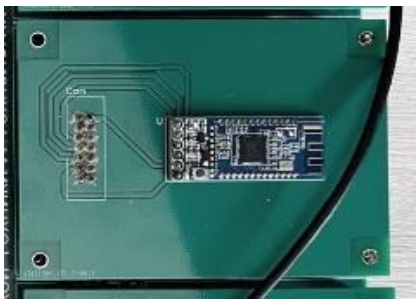


Рисунок 2 – Интегрированный Bluetooth-модуль HC-09

Bluetooth-модуль HC-09 основывается на управляющей микросхеме, поддерживающей Bluetooth-стек, что позволяет осуществлять обмен данными с внешними устройствами на коротком расстоянии. Он функционирует в диапазоне 2,4 ГГц и может использовать либо встроенную печатную антенну, либо внешний антенный элемент, в зависимости от конструкции платы. Модуль HC-09 подключается к основной плате НП через интерфейсные контакты, получает питание и обменивается управляющими командами и данными с микроконтроллером устройства.

Bluetooth-модуль в составе НП может использоваться для локальной настройки, считывания служебной информации и взаимодействия с мобильным приложением или сервисным оборудованием. В отличие от GSM-модуля, он не предназначен для передачи данных на большие расстояния, но удобен для обслуживания устройства в непосредственной близости. Важно отметить, что режим работы Bluetooth-модуля также влияет на общее энергопотребление НП, особенно если модуль постоянно находится в режиме ожидания соединения.

На рисунке 3 представлен GPS-модуль, который используется для определения координат НП. Этот модуль принимает сигналы от спутниковых навигационных систем и рассчитывает текущее местоположение устройства. Полученные координаты могут передаваться на центральный сервер через GSM-канал или использоваться для локального считывания данных. Для автономной НП работа GPS-модуля требует отдельного анализа, поскольку поиск спутников, первичная фиксация координат и периодическое обновление местоположения могут существенно влиять на расход энергии.



Рисунок 3 – GPS-модуль с внешней антенной

Основным компонентом GPS-модуля является приемник спутниковых навигационных сигналов, который предназначен для определения координат НП. В зависимости от конструкции, модуль может поддерживать прием сигналов одной или нескольких глобальных навигационных систем. Обработка навигационных данных осуществляется встроенной микросхемой приемника, которая рассчитывает координаты, скорость и время на основе полученных спутниковых сигналов.

Для приема сигнала в модуле может использоваться встроенная керамическая антенна, которая работает в диапазоне L1 с центральной частотой около 1,575 ГГц. Эта антенна обеспечивает прием спутниковых сигналов при достаточной видимости неба. В некоторых вариантах исполнения модуль также оснащается антенным разъемом для подключения внешней антенны, что особенно полезно, когда сам модуль находится внутри корпуса устройства и условия для приема сигнала ограничены.

GPS-модуль подключается к основной плате НП через интерфейсные контакты. По этим линиям подается питание, а также передаются навигационные данные и управляющие команды между модулем и микроконтроллером устройства. В некоторых платах дополнительно применяется схема стабилизации питания, что обеспечивает более стабильную работу модуля при изменении входного напряжения.

Так, в составе НП GPS-модуль отвечает за определение координат объекта. Эти данные могут сохраняться во внутренней памяти устройства, передаваться на сервер через GSM-модуль или использоваться при локальном считывании. При этом необходимо отдельно оценивать энергопотребление GPS-модуля, поскольку поиск спутников, первичное определение координат и периодическое обновление местоположения могут существенно влиять на расход заряда аккумулятора.

На рисунке 4 представлен NFC-модуль RC522, предназначенный для бесконтактной идентификации и обмена данными на малом расстоянии. Этот модуль работает на частоте 13,56 МГц и может использоваться для считывания идентификаторов, карт или меток. В системе НП NFC-модуль может применяться для обслуживания устройства, регистрации операций или локальной идентификации НП без необходимости подключения к удаленному серверу.



Рисунок 4 – NFC-модуль RC522

Центральным элементом NFC-модуля RC522 является микросхема, работающая на частоте 13,56 МГц, предназначенная для обмена данными с RFID/NFC-метками и картами. Этот модуль позволяет считывать идентификаторы и при необходимости записывать данные на поддерживаемые носители. Обмен информацией происходит на небольшом расстоянии, что удобно для локальной идентификации объектов и выполнения сервисных операций.

Антенна модуля обычно выполнена в виде печатного контура на плате и формирует электромагнитное поле, необходимое для взаимодействия с бесконтактной меткой или картой. Модуль подключается к основной плате через контактные выводы, получает питание и передает данные управляющему микроконтроллеру. В некоторых версиях плата может включать элементы стабилизации питания и светодиодный индикатор, используемый для визуального контроля состояния модуля.

В составе НП NFC-модуль может использоваться для идентификации устройства, регистрации операций обслуживания или локального считывания данных без GSM-канала. В отличие от модулей дальнего действия, он работает на коротких дистанциях и применяется эпизодически, поэтому его вклад в общее энергопотребление зависит от частоты операций считывания и режима ожидания.

На рисунке 5 показана центральная плата управления НП. Она обеспечивает подключение функциональных модулей, распределение питания и обмен данными между модулями, датчиками и управляющим микроконтроллером. Кроме того, данная плата может быть использована для реализации алгоритмов энергосбережения, включая включение и отключение отдельных модулей в зависимости от режима работы устройства.



Рисунок 5 – Основная плата управления электронной НП

Центральная плата управления объединяет функциональные модули НП в единую систему. На ней размещен микроконтроллер, который получает данные от различных модулей и подключенных датчиков. Он также управляет обменом данными между компонентами и выполняет алгоритмы энергосбережения, включая перевод отдельных модулей в режим ожидания или сна.

Разъемы и контактные площадки платы предназначены для подключения питания, аккумулятора, внешних модулей и датчиков. Если имеется слот для карты памяти, плата может использоваться для сохранения журналов работы устройства и результатов измерений. Светодиодные индикаторы обеспечивают визуальный контроль состояния питания, обмена данными и различных режимов работы. При наличии кнопок или переключателей они могут использоваться для перезагрузки устройства, ручного выбора режима или проверки отдельных функций.

Таким образом, центральная плата управления обеспечивает электрическое и логическое взаимодействие между основными узлами НП. Ее роль особенно важна при анализе энергопотребления, поскольку именно через управляющий контроллер задаются режимы работы модулей и фиксируются данные об их состоянии.

На рисунке 6 представлен сенсорный модуль, предназначенный для регистрации параметров окружающей среды. В системе НП этот модуль может использоваться для контроля температуры, влажности и других условий, влияющих на состояние груза во время перевозки. Полученные данные передаются на центральную плату управления и могут сохраняться в памяти устройства или отправляться на удаленный сервер.

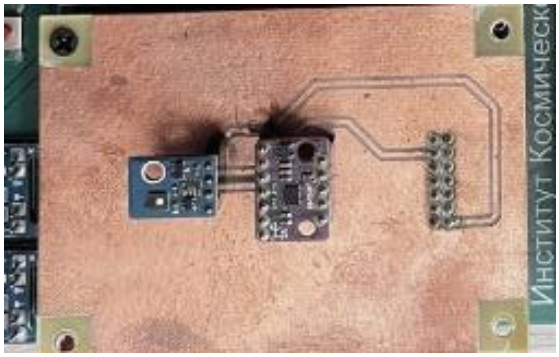


Рисунок 6 – Сенсорный модуль с двумя датчиками

Сенсорный модуль предназначен для подключения датчиков, которые регистрируют параметры окружающей среды. Плата модуля обеспечивает механическое размещение чувствительных элементов, подачу питания и передачу измеренных данных на центральный микроконтроллер. Электрическое соединение датчиков с основной системой устройства осуществляется через контактные площадки и печатные дорожки.

В зависимости от конфигурации сенсорный модуль может использоваться для измерения температуры, влажности и других параметров, необходимых для контроля условий перевозки груза. При наличии дополнительных датчиков функциональные возможности модуля могут быть расширены, позволяя регистрировать давление, освещенность, вибрацию и другие внешние воздействия. Состав измеряемых параметров определяется конкретной конфигурацией устройства.

Использование такого модуля позволяет получать данные не только о местоположении, но и о условиях, в которых находится груз. Эти сведения могут передаваться на центральную плату управления, сохраняться в памяти устройства или отправляться на удаленный сервер через модуль связи. При анализе энергопотребления сенсорный модуль следует учитывать отдельно, поскольку его вклад зависит от частоты опроса датчиков и режима их работы.

Общий расчет энергопотребления модулей рассчитывается по следующей формуле:

$$\mathrm{P}_{\text{общ}} = \sum_{i=1}^{n}(U_i \cdot I_i), \quad (1)$$

где U_i – напряжение питания *i*-го модуля, В; I_i – ток потребления *i*-го модуля, А; n – количество модулей.

Расчет времени автономной работы устройства рассчитывается по следующей формуле:

$$t_{\text{авт}} = \frac{\mathrm{C}_{\text{акк}}}{I_{\text{ср}}}, \quad (2)$$

где $\mathrm{C}_{\text{акк}}$– емкость аккумулятора, А·ч; $I_{\text{ср}}$ – средний ток потребления устройства, А.

Расчет среднего тока потребления за цикл работы рассчитывается по следующей формуле:

$$I_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{акт}} \cdot t_{\text{акт}} + I_{\text{сп}} \cdot t_{\text{сп}}}{t_{\text{акт}} + t_{\text{сп}}}, \quad (3)$$

где $I_{\text{акт}}$ – ток в активном режиме, А; $t_{\text{акт}}$ – время работы в активном режиме, ч; $I_{\text{сп}}$ – ток в спящем режиме, А; $t_{\text{сп}}$ – время работы в спящем режиме, ч.

Эффективность экономии энергии при переходе в спящий режим рассчитывается по следующей формуле:

$$\mathrm{E}_{\text{эк}} = \frac{I_{\text{акт}} - I_{\text{сп}}}{I_{\text{акт}}} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где $I_{\text{акт}}$– ток потребления в активном режиме, А; $I_{\text{сп}}$ – ток потребления в спящем режиме, А.

На рисунке 7 представлено сравнение энергопотребления модулей НП. Эти данные помогают выявить элементы, создающие наибольшую нагрузку на источник питания и требующие первоочередной оптимизации. Такой анализ необходим для выбора режимов работы модулей, настройки алгоритмов энергосбережения и увеличения времени автономной работы устройства.

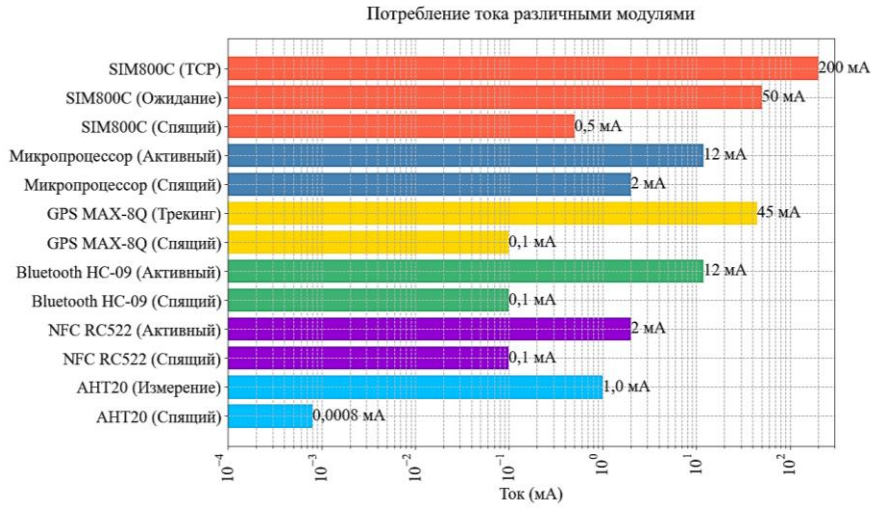


Рисунок 7 – Сравнительный анализ потребления тока в модулях электронной НП

Результаты, представленные на графике, подтверждают необходимость раздельной оценки энергопотребления модулей НП. Наибольший расход энергии фиксируется в активных режимах работы, особенно во время передачи данных и определения координат. Поэтому при разработке алгоритмов управления питанием важно предусмотреть автоматический переход неиспользуемых модулей в режим ожидания или сна, а также адаптировать частоту их включения в зависимости от условий эксплуатации.

Снижение энергопотребления способствует увеличению времени автономной работы электронной НП и уменьшает потребность в частом обслуживании устройства. Это особенно актуально для длительных маршрутов, участков с ограниченным доступом к оборудованию и перевозок, где замена или подзарядка источника питания затруднена.

Обсуждение

В ходе испытаний на разработанном стенде было определено энергопотребление НП в 2-х режимах работы: активном и спящем. В активном режиме, когда одновременно задействованы основные функциональные модули, потребляемый ток составил около 272 мА. В спящем режиме ток снизился до 2,8 мА, что показывает существенную разницу между рабочим и энергосберегающим состояниями устройства.

Оценка автономной работы показала, что при кратковременной активации каждые 15 минут с последующим переходом в спящий режим НП может функционировать от аккумулятора емкостью 3500 мА·ч до 16,6 суток. При этом фактическое время работы зависит от длительности активной фазы, качества связи, времени поиска координат и частоты передачи данных.

Результаты испытаний подтвердили, что разработанный стенд позволяет фиксировать ток и напряжение в различных режимах работы, а также получать данные для дальнейшей настройки алгоритмов управления питанием. Система записи данных упрощает последующий анализ и позволяет выявлять отклонения в работе отдельных модулей. Полученные результаты могут быть использованы для выбора режимов включения различных модулей и датчиков, а также для настройки перехода устройства в режим ожидания или сна.

Модульный подход к конструкции НП, в отличие от традиционной интегрированной схемы, позволяет отдельно управлять функциональными узлами, заменять отдельные компоненты и адаптировать устройство под различные условия эксплуатации. Хотя сам по себе этот подход не снижает энергопотребление, он создает основу для более гибкого управления питанием. За счет отключения неиспользуемых модулей, изменения частоты опроса датчиков и регулирования периодичности передачи данных можно увеличить время автономной работы и повысить ремонтопригодность устройства.

Конструкция и функциональные особенности разрабатываемой НП ранее были рассмотрены в работах [14, 15].

Заключение

Результаты испытаний показали, что переход устройства в спящий режим существенно снижает потребляемый ток: с 272 мА в активном режиме до 2,8 мА в спящем режиме. При кратковременной активации каждые 15 минут это позволяет увеличить расчетное время автономной работы НП до 16,6 суток при использовании аккумулятора емкостью 3500 мА·ч. На практике фактическое время работы будет зависеть от длительности активной фазы, качества GSM-связи, времени определения координат и частоты передачи данных.

Полученные данные могут быть использованы для дальнейшей настройки алгоритмов управления питанием. В первую очередь целесообразно оптимизировать режимы работы GSM и GPS-модулей, так как именно они обычно создают основную нагрузку на источник питания. Также перспективным направлением является разработка диагностического режима, который позволит выявлять отклонения в энергопотреблении отдельных модулей и фиксировать такие события в журнале устройства.

Таким образом, разработанный стенд позволяет не только измерять энергопотребление модулей НП, но и получать исходные данные для настройки энергосберегающих режимов. Это может повысить время автономной работы устройства и упростить его последующее обслуживание в условиях длительной эксплуатации.

Список литературы

1. Design and implementation of a smart container monitoring system / J. Liu et al // Sensors. – 2018. – Vol. 18.
2. Fang Y. An intelligent container security system based on WSN and RFID / Y. Fang, T. Huang, F. Wang // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 76534-76542.
3. Zhang Q. IoT-based sealing device for supply chain logistics / Q. Zhang, Y. Sun, L. Chen // Sensors. – 2019. – Vol. 19. – P. 20-31.
4. Kim S. A power-efficient GPS tracking system for logistics / S. Kim, D. Lee, J. Park // IEEE Sensors Journal. – 2020. – Vol. 20. – P. 6652-6660.
5. Lee H. Smart tamper-proof seal with embedded IoT sensors / H. Lee, Y. Kim, S. Han // IEEE Internet of Things Journal. – 2019. – Vol. 6. – P. 5898-5905.
6. Cheng H. Design of a wireless container seal monitoring system / H. Cheng, F. Zhou, M. Wu // Sensors. – 2021. – Vol. 21. – Art. 1521.
7. Martinez M. Performance evaluation of container tracking devices in harsh environments / M. Martinez, R. Gomez, J. Lopez // Wireless Networks. – 2022. – Vol. 28. – P. 2547-2562.
8. Singh R. Low-cost GPS tracker with tamper alert for logistics / R. Singh, M. Kumar, P. Bhatia // Journal of Sensors. – 2019. – Vol. 2019. – Art. 6935816.
9. Kwon H. Secure electronic seal with blockchain logging for global logistics / H. Kwon, J. Seo, Y. Moon // Sensors. – 2021. – Vol. 21. – Art. 768.
10. Yao Q. Real-time container integrity detection using smart seals / Q. Yao, L. Chen, H. Wang // Measurement. – 2020. – Vol. 166. – Art. 108321.
11. Smart anti-theft vehicle tracking system for Bangladesh based on Internet of Things / M.S. Uddin et al // Proceedings of the 4th International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE), Dhaka, Bangladesh, 28-30 September 2017. – IEEE, 2017. – P. 624-628. https://doi.org/10.1109/ICAEE.2017.8255432.
12. ID-based secure real-time tracking system / C.Y. Yeun et al // International Journal of Advanced Logistics. – 2015. – Vol. 4, № 2. – P. 100-114. https://doi.org/10.1080/2287108X.2015.1049684.
13. Securing E-Seal real-time tracking system for Internet of Things / M.A.B. Shemaili et al // Proceedings of the 8th International Conference for Internet Technology and Secured Transactions (ICITST 2013). – IEEE Computer Society, 2013. – P. 65-69. https://doi.org/10.1109/ICITST.2013.6750163.
14. Development of an intelligent navigation seal for safe and efficient logistics / A.Z. Aitmagambetov et al // International Journal of Information and Communication Technologies. – 2025. – Vol. 6, № 1. – P. 170-184. https://doi.org/10.54309/IJICT.2025.21.1.012.
15. Development of a navigation seal for tracking transportation within the EAEU / A.Z. Aitmagambetov et al // Vestnik KazATC. – 2025. – № 2(69). – P. 111-121. https://doi.org/10.51775/2790-0886_2025_69_2_111.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках конкурса на программно-целевое финансирование по научным, научно-техническим программам на 2024-2026 годы, ИРН программы BR24992884 «Разработка опытного образца электронного идентификатора с целью дальнейшей организации их производства».

А.С. Инчин[1], А.З. Айтмагамбетов[1,2], А.Е. Кулакаева[2*], С.Ж. Жұмағали[1], У.К. Уали[1]

[1]ЖШС «Ғарыштық техника және технологиялар институты»
050061, Қазақстан Республикасы, Алматы қ, Кисловодская көшесі, 34
[2]«Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті» АҚ
050040, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Манас 34/1 көшесі
*e-mail: a.kulakayeva@iitu.edu.kz

НАВИГАЦИЯЛЫҚ ПЛОМБА МОДУЛЬДЕРІНІҢ ЭНЕРГИЯ ТҰТЫНУЫН БАҒАЛАУ

Мақалада жүк тасымалын бақылау жүйелерінде қолданылатын модульдік навигациялық пломбаның энергия тұтынуы зерттелді. Автономды жұмыс уақытының шектеулі болуы жүктің сенімді бақылануына әсер ететін маңызды пайдалану факторларының бірі болып табылады.

Жұмыстың мақсаты – сынақ стендін әзірлеу және құрылғының жалпы энергия тұтынуына жекелеген модульдердің қосатын үлесін сандық тұрғыдан бағалау. Бұл деректер кейіннен энергиямен жабдықтауды басқару алгоритмдерін баптау үшін пайдаланылуы мүмкін.

Зерттеу жүргізу үшін INA219 ток және кернеу датчиктері мен Raspberry Pi Pico микроконтроллері негізінде сынақ стенді әзірленді. Стенд өлшеу нәтижелерін автоматты түрде тіркеуді және сақтауды қамтамасыз етті. Сынақ барысында SIM800C GSM-модулінің, MAX-8Q GPS-модулінің, HC-09 Bluetooth-модулінің, RC522 NFC-модулінің, негізгі микроконтроллердің және AHT20 датчигінің белсенді және ұйқы режимдеріндегі энергия тұтынуы бағаланды. Орташа ток пен 3500 мА·сағ сыйымдылықтағы аккумулятор кезіндегі автономды жұмыс уақыты құрылғының циклдік іске қосылуы мен деректерді беру режимін ескере отырып есептелді.

Нәтижелер белсенді режимде жиынтық тұтынылатын ток шамамен 272 мА, ал ұйқы режимінде 2,8 мА болатынын көрсетті. Құрылғы әр 15 минут сайын іске қосылған жағдайда есептік автономды жұмыс уақыты 16,6 тәулікке жетеді. Бұл энергия үнемдеу режимдерін қолданудың тиімділігін көрсетеді.

Әзірленген стенд навигациялық пломбаның жекелеген модульдерінің энергия тұтынуы бойынша қайталанатын және салыстырмалы түрде тұрақты өлшеу деректерін алуға мүмкіндік берді. Алынған нәтижелер GSM, GPS, Bluetooth, NFC-модульдері мен датчиктердің жұмыс режимдерін баптау үшін, сондай-ақ логистикалық мониторингте қолданылатын құрылғылардың энергия тиімділігін арттыру үшін пайдаланылуы мүмкін.

Түйін сөздер: *сынақ стенді, модульдік навигациялық пломбалар, логистикалық жүйелер, энергия тиімділігі, энергия тұтынуды басқару, мониторинг, бақылау.*

A. Inchin[1], A. Aitmagambetov[1,2], A. Kulakayeva[2]*, S. Zhumagali[1], U. Uali[1]
[1]LLP « Institute of space technique and technology»,
05006, Republic of Kazakhstan, Almaty, Kislovodskaya st., 34
[2]JSC «International Information Technologies University»,
050040, Republic of Kazakhstan, Almaty, 34/1 Manasa St.
*e-mail: a.kulakayeva@iitu.edu.kz

ASSESSMENT OF POWER CONSUMPTION OF NAVIGATION SEAL MODULES

This paper presents a study of the power consumption of a modular navigation seal used in cargo transportation monitoring systems. Limited autonomous operating time is one of the operational factors that affects the reliability of cargo control. The aim of this work was to develop a test bench and to quantitatively evaluate the contribution of individual modules to the total power consumption of the device. The obtained data can subsequently be used to adjust power management algorithms.

A test bench based on INA219 current and voltage sensors and a Raspberry Pi Pico microcontroller was developed for the study. The test bench provided automatic recording and storage of measurement data. During the experiments, the power consumption of the SIM800C GSM module, MAX-8Q GPS module, HC-09 Bluetooth module, RC522 NFC module, central microcontroller, and AHT20 sensor was evaluated in active and sleep modes. The average current and autonomous operating time with a 3500 mAh battery were calculated taking into account cyclic device activation and data transmission.

The results showed that the total current consumption was approximately 272 mA in active mode and 2.8 mA in sleep mode. With device activation every 15 minutes, the estimated autonomous operating time reached 16.6 days, which indicates the effectiveness of the selected power-saving modes.

The developed test bench made it possible to obtain reproducible data on the power consumption of individual navigation seal modules. The results can be used to configure the operating modes of GSM, GPS, Bluetooth, and NFC modules, as well as sensors, and to improve the energy efficiency of devices used in logistics monitoring.

Key words: *test bench, modular navigation seals, logistics systems, energy efficiency, power management, monitoring, control.*

Сведения об авторах

Александр Сергеевич Инчин – ведущий научный сотрудник, ТОО «Институт космической техники и технологий», г. Алматы, Республика Казахстан; e-mail: inchin.a@istt.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4799-0828.

Алтай Зуфарович Айтмагамбетов – к.т.н., профессор кафедры «Радиотехника, электроника и телекоммуникации», Международный Университет Информационных Технологий, г.Алматы, Республика Казахстан; e-mail: a.aitmagambetov@iitu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7808-5273.

Айгуль Ергалиевна Кулакаева* – PhD, ассоциированный профессор кафедры «Радиотехника, электроника и телекоммуникации», Международный Университет Информационных Технологий, г. Алматы, Республика Казахстан; e-mail: a.kulakayeva@iitu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0143-085X.

Сабыржан Жанбулатұлы Жұмағали – Главный инженер проекта, ТОО «Институт космической техники и технологий», г. Алматы, Республика Казахстан; e-mail: zhumagali.s@istt.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-5995-4377.

Урияш Кадырбековна Уали – Руководитель управления перспективных научно-технических разработок и коммерциализации проектов, ТОО «Институт космической техники и технологий», г. Алматы, Республика Казахстан; e-mail: uali.u@istt.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-7635-9874.

Авторлар туралы мәліметтер

Александр Сергеевич Инчин – жетекші ғылыми қызметкер, «Ғарыштық техника және технологиялар институты» ЖШС, Алматы қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: inchin.a@istt.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4799-0828.

Алтай Зуфарович Айтмагамбетов – т.ғ.к, «Радиотехника, электроника және телекоммуникациялар» кафедрасының профессоры, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті, Алматы қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: a.aitmagambetov@iitu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7808-5273.

Айгуль Ергалиевна Кулакаева* – PhD, «Радиотехника, электроника және телекоммуникациялар» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті, Алматы қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: a.kulakayeva@iitu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0143-085X.

Сабыржан Жанбулатұлы Жұмағали – жобаның бас инженері, «Ғарыштық техника және технологиялар институты» ЖШС, Алматы қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: zhumagali.s@istt.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-5995-4377.

Урияш Қадырбекқызы Уәли – перспективалық ғылыми-техникалық әзірлемелер және жобаларды коммерцияландыру басқармасының басшысы, «Ғарыштық техника және технологиялар институты» ЖШС, Алматы қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: uali.u@istt.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-7635-9874.

Information about the authors

Alexander Sergeevich Inchin – Leading Researcher, «Institute of space technique and technology» LLP, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: inchin.a@istt.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4799-0828.

Altai Zufarovich Aitmagambetov – candidate of technical sciences, professor of the Department of «Radio Engineering, Electronics and Telecommunications», International Information Technologies University, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: a.aitmagambetov@iitu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7808-5273.

Aigul Yergaliyevna Kulakayeva* – PhD, Associate Professor of the Department of «Radio Engineering, Electronics and Telecommunications», International Information Technologies University, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: a.kulakayeva@iitu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0143-085X.

Sabyrzhan Zhanbulatuly Zhumagali – Chief Project Engineer, Institute of Space Technique and Technology LLP, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: zhumagali.s@istt.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-5995-4377.

Uriyash Kadyrbekovna Uali – Head of the Department of Advanced Scientific and Technical Developments and Project Commercialization, Institute of Space Technique and Technology LLP, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: uali.u@istt.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-7635-9874.

Поступила в редакцию 01.06.2026
Принята к публикации 17.08.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-17

IRSTI:50.41.25

BY 4.0
Check for updates

T. Zhylkybayev[1]*, A. Dautova[1], D. Zhumasheva[1], G. Shuitenov[2], S. Altynbek[2]
[1]Shakarim University, Republic of Kazakhstan, Semey, 20 A Glinka Street
[2]Esil University, 010008, Republic of Kazakhstan, Astana, 7 Zhubanova str.,
*e-mail: tursynhan.jylqybaev@shakarim.kz

DEVELOPMENT OF AN INFORMATION SYSTEM FOR THE DIGITAL DOCUMENTATION OF HISTORICAL SITES IN A REGION

Abstract: *The article presents the development of a web-based information system for the digital documentation of historical sites in the city of Semey. The relevance of the study is associated with the need to move from scattered and locally stored information towards a unified digital environment in which data on historical and cultural heritage sites can be structured, searched, updated and visually presented. The object of the research is the process of recording and presenting information about historical sites in digital form, while the subject of the research includes the methods and software tools used to store and process such information. The study applied domain analysis, data modelling, database design, modular programming and functional testing. As a result, a digital site record structure was developed, covering identification, classification, spatial, historical-descriptive, visual and system data. Based on this structure, the architecture of the web application and the logical database model were designed, and a software prototype was implemented using Python, Flask, SQLite, HTML, CSS and JavaScript. GIS integration and QR-based identification are considered as directions for further development and are supported at the level of the proposed data structure rather than as completed functional modules. The scientific value of the work lies in the proposed structural and functional model for the digital documentation of historical sites, adapted to the local urban context. Its practical value is related to the possible use of the system in education, museums, archives, local history work and the further development of the digital infrastructure for Semey's historical and cultural heritage.*

Key words: *digital documentation, historical sites, information system, web application, database, digital heritage, Semey, digital site record.*

Introduction

As digital technologies become increasingly embedded in archival, museum, educational and cultural practices, the preservation of historical and cultural heritage is no longer viewed solely as a matter of conservation and public outreach. It is also becoming an important area for the application of modern information technologies. Digital solutions make it possible to convert information about heritage sites into a structured electronic format, support centralised data storage and updating, and provide tools for search, visualisation and further use in educational, research and cultural contexts. International approaches to the preservation of digital heritage also emphasise the importance of long-term access to digital resources, together with the development of mechanisms for their systematic organisation and presentation to different groups of users [1, 2].

The city of Semey holds a distinctive place in the historical and cultural development of Kazakhstan. A number of important stages in the country's public, literary, educational and cultural history are associated with the city. Its urban environment includes monuments, historic buildings, museums, memorial sites and other places that contribute to the preservation of collective memory and the formation of regional identity. According to published data, the approved register of historical and cultural monuments of Semey includes 67 sites, of which 10 are of national significance and 57 are of local significance [3,4]. In addition, the official website of the city akimat provides information on a number of historical and cultural monuments, which further underlines the need for a systematic digital description of such sites [4].

In practice, information on the city's historical sites is often dispersed across different sources. Some materials are held in official registers, while others can be found in local history publications, museum collections, archival documents, online publications and separate reference resources. This fragmentation makes it more difficult to search for, compare, update and reuse

©T. Zhylkybayev, A. Dautova, D. Zhumasheva, G. Shuitenov, S. Altynbek, 2026

information. In addition, the absence of a unified digital structure complicates the inventorying of sites, the preparation of educational materials, the development of tourist routes and the organisation of research activities.

From a scientific and technical perspective, the issue is not limited to the accumulation of information about historical sites. It also involves the development of a formalised model for representing such information in digital form. For the field of Automation and Information Technologies, this means moving beyond descriptive record-keeping towards an information system with a defined data structure, software architecture, and automated procedures for entering, updating, searching and identifying records. In this context, digital documentation is not treated merely as an electronic catalogue, but as an applied information system that processes and presents data within a unified digital environment.

The relevance of this study is determined by the need to develop a digital tool for the systematic registration and documentation of historical sites in Semey. Such a system would make it possible to bring together dispersed information within a single database, standardise the description of heritage sites, improve access to information, and provide a foundation for the further development of digital local history, museum and educational resources.

The aim of this study is to develop a web-based information system for the digital documentation of historical sites in Semey. The system is intended to support centralised data storage, data structuring, search, visualisation and the automated identification of information relating to sites of historical significance.

To achieve this aim, the following objectives were set: to analyse existing approaches to the digital representation of historical and cultural heritage sites; to develop the structure of a digital record for a historical site; to design the architecture of the information system and the logical database model; to implement a software prototype of the web application; and to carry out pilot testing in order to assess its main functional capabilities.

The scientific novelty of the study lies in the proposed structural and functional model for the digital documentation of historical sites in Semey. Unlike a conventional electronic catalogue or a simple database of records, the proposed model combines a unified digital site record, mandatory and optional attributes, system fields, textual search attributes and coordinate fields prepared for further GIS and QR-based integration. The model is adapted to the local urban context and to the heterogeneous nature of historical, descriptive, visual and spatial data related to historical and cultural heritage sites.

The practical significance of the study is reflected in the potential use of the developed system by educational institutions, museums, archives, local history associations and other organisations involved in the study, preservation and promotion of the historical and cultural heritage of Semey.

Materials and Methods

The object of the study is the process of digitally recording and presenting information about historical sites in Semey. The subject of the study comprises the methods, models and software tools used to develop an information system that supports the storage, editing, search and visualisation of data on sites of historical significance.

The information base of the study consisted of open materials on historical sites in Semey, including data on historical and cultural monuments, local history descriptions, reference materials, photographic data, address information and additional textual descriptions [3, 4]. In developing the digital site record, the following parameters were taken into account: the name of the site, its category, address or location description, historical period, current condition, brief historical note, source of information and visual materials.

The methodological basis of the study included the analysis of scientific literature, systematic analysis of the subject area, data modelling, database design, modular programming and functional testing. The literature review made it possible to identify the main approaches to the development of information systems for cultural heritage sites. Recent studies emphasise the importance of bringing together descriptive, visual and spatial data, as well as the need to design information systems that can be further extended and integrated with mapping services [5-9].

The study was carried out in several stages. At the first stage, the functional requirements for the prototype were defined. The system had to support the addition of new sites, the editing of existing records, the viewing of a digital site record, search by key attributes, the storage and display

of photographic materials, and the automated generation of system fields. These system fields include the unique identifier of the site, the date on which the record was created, and the date of its most recent update.

At the second stage, a logical data model was developed. The historical site was defined as the central entity of the system. The following attributes were assigned to this entity: a unique identifier, name, category, address, location description, historical period, current condition, historical description, source of information, latitude, longitude, image file name, creation date and record update date. The structure of the digital site record and the purpose of its main fields are presented in Table 1.

Table 1 – Structure of the digital site record

Data category	Field of the digital site record	Field purpose
Identification data	Unique identifier	Unambiguous identification of the record in the database
Identification data	Site name	Display of the official or commonly used name of the site
Classification data	Site category	Grouping of sites by type
Spatial data	Address	Indication of the site's location within the urban environment
Spatial data	Location description	Additional textual description of the site's location
Spatial data	Latitude and longitude	Preparation of data for subsequent integration with a mapping module
Historical and descriptive data	Historical period	Indication of the period in which the site emerged or functioned
Historical and descriptive data	Historical note	Brief substantive description of the site and its significance
Condition data	Current condition	Recording of the site's state of preservation or specific condition-related features
Visual data	Photographic material	Visual representation of the site
Source data	Source of information	Indication of the origin of the information used
System data	Creation and update date	Control of the relevance and currency of the record

At the prototyping stage, the implemented database structure was based on one main table, historical_objects, which stored the core attributes of a historical site. This simplified structure was sufficient for testing the main functions of the prototype, including data entry, editing, search, viewing and image display.

In parallel with the implemented prototype structure, an extended logical database model was designed for the further development of the system. This model includes separate entities for categories, sources, photographic materials and relationships between historical sites and information sources. The extended model is intended to reduce data duplication, improve data consistency and support future scalability. The design of the system also took into account general principles of software development, database design and web application development [10-15].

At the third stage, the architecture of the software solution was designed. The system was implemented according to a modular principle and includes a user interface, a server-side request processing module, a database access module, an image upload module and a search module. The user interface is intended for entering, editing, viewing and searching data. The server-side module processes user requests, manages page routing and transfers data between the interface and the database. The database module is responsible for saving, updating and retrieving records. The image upload module stores photographic materials associated with each site, while the search module filters records according to textual parameters.

The overall architecture of the developed information system is presented in Figure 1. It includes the user interface, the server-side component, functional data processing modules, the database and image storage.

This architecture separates the functions of data entry, storage, search, visualisation and updating. Such separation simplifies the further extension of the system, including the integration of a mapping module and QR-based identification tools.

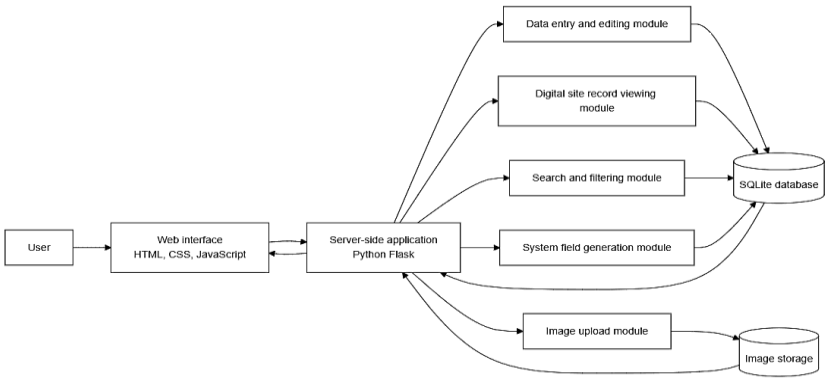


Figure 1 – Architecture of the information system for the digital documentation of historical sites

The extended logical database model is shown in Figure 2. The central entity of the model is the HISTORICAL_OBJECTS table, which contains the main information about each historical site. It is linked to the tables containing categories, photographic materials and sources of information. This structure is proposed for the next stage of system development and is intended to improve extensibility, reduce data duplication and support more consistent management of heritage-related information.

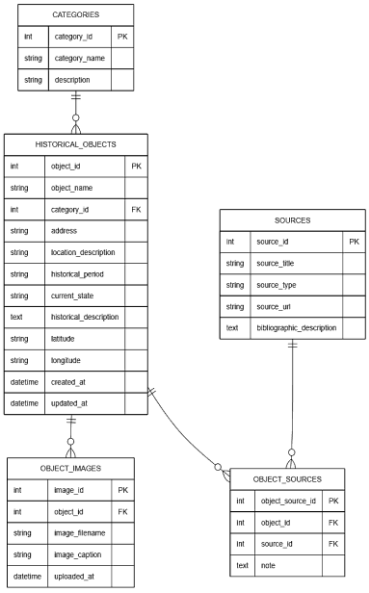


Figure 2 – Extended logical database model for the further development of the information system

The OBJECT_SOURCES table is used to represent the relationship between historical sites and sources of information. This structure allows a single site to be linked to several sources, while one source may also be associated with several historical sites.

The prototype was implemented as a web application. Python was used as the main programming language, while the server-side component was developed using the Flask framework. This choice was made because Flask is lightweight, supports convenient routing and is well suited to the rapid development of information system prototypes. Information about historical sites was stored in an SQLite database, which was selected as a simple and lightweight solution for local pilot testing. The user interface was developed using HTML, CSS and JavaScript. This made it possible to implement data entry and editing forms, a digital site record page, a list of sites, search functionality and basic navigation elements.

The automated functions of the prototype include assigning a record identifier, registering the creation and update dates, validating required fields, processing search queries and generating a structured digital site record. In the current version of the system, QR-based identification and the mapping module have not yet been implemented as complete functional components. However, the database structure provides the basis for their later integration through the use of coordinate fields and a unique record identifier.

Functional testing was used to verify the performance of the developed solution. The correctness of the operations for adding, editing, saving, searching, viewing and deleting records was assessed. In addition, the logical structure of the digital site record, the usability of the interface, the completeness of the information presented, the correct display of photographic materials and the potential for further scaling were analysed. Pilot testing was carried out in a local development environment using a test dataset containing 5 records of historical sites in Semey. The dataset included one record for each of the five categories implemented in the prototype: architectural monuments, historic buildings, memorial sites, archaeological sites and cultural sites. Each record contained the mandatory fields of the digital site record, namely the site name, category and historical description, as well as additional attributes where available, including address, historical period, current condition, source information, coordinates and photographic material.

Research results

As a result of the study, a prototype of a web-based information system for the digital documentation of historical sites in Semey was developed. The application provides centralised work with digital site records and brings together the main registration and documentation operations within a single information environment. Unlike dispersed textual descriptions, spreadsheets and local materials, the proposed solution converts information about a historical site into a standardised digital format that can be searched, updated, visualised and subsequently integrated with external services.

The main page of the system contains a list of historical sites, a search field, category-based filtering and tools for opening the detailed record of a selected site. Users can view existing records, search by name, category, address or historical description, and proceed to the form for adding a new site. This interface structure provides quick access to the data and makes the system suitable for educational, research and local history work. The general interface of the developed system is shown in Figure 3. It presents the list of historical sites, the search field, category-based filtering and navigation tools for opening or editing individual records.

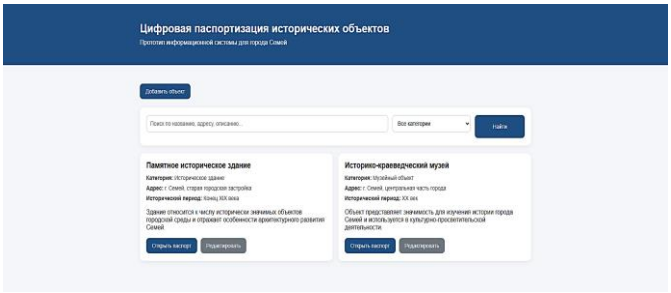


Figure 3 – Main page of the information system for the digital documentation of historical sites in Semey

One of the main outcomes of the study was the development and implementation of a unified digital record for a historical site. Its structure includes both mandatory and optional attributes. The mandatory attributes include the site name, category and historical description. The optional attributes include the address, location description, historical period, current condition, source of information, coordinates and photographic materials. This division makes it possible to ensure the minimum required completeness of each record while retaining flexibility for the later addition of further data.

The site addition form is designed for entering the main information and uploading photographic material. When a record is saved, the system automatically generates a unique identifier, records the creation date and checks whether the mandatory fields have been completed. This reduces the likelihood of incomplete records and contributes to a higher level of data structuring. The form used to add a new historical site is shown in Figure 4. It includes fields for entering identification, classification, spatial and historical-descriptive data, as well as an option for uploading photographic material.

The use of mandatory fields in the form supports data completeness, while the automatic generation of system fields reduces the need for manual data entry and improves the consistency of records.

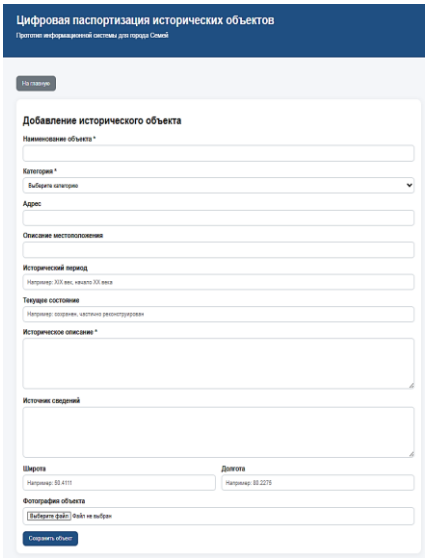


Figure 4 – Form for adding a historical site to the information system

Functionally, the prototype consists of five main modules. The first module is responsible for entering and saving information about a site. The second module supports the editing and updating of the site record. The third module provides access to the digital site record in a structured form. The fourth module is used to search by name, category, address and other textual attributes. The fifth module handles the uploading and display of images. In this way, the system covers the basic operational cycle of working with a site, from creating a record to updating, searching and viewing it. The digital site record viewing window presents information about a site in a single structured format. The record displays identification, classification, spatial, historical-descriptive, visual and system data. This form of presentation allows users to obtain a coherent overview of the site quickly and, where necessary, proceed to edit the record. The viewing window of the digital site record is shown in Figure 5. It presents the main information about a historical site in a structured format, including identification, classification, spatial, historical-descriptive, visual and system data.

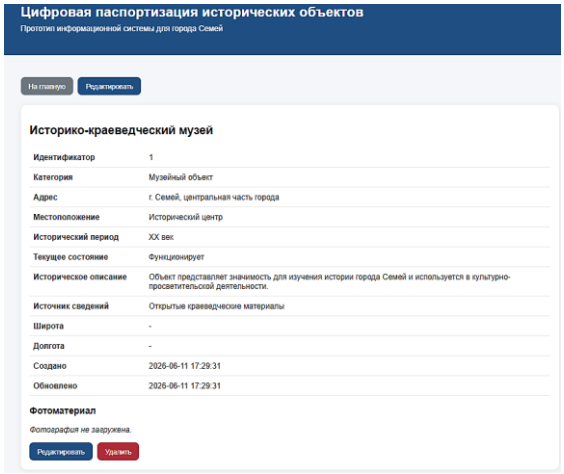


Figure 5 – Viewing window of the digital site record

This representation brings together the key information about a site on a single page and allows the user to move from viewing the record to editing it where necessary.

The search module allows records to be selected by keywords and categories. Search is implemented across several textual attributes, including the site name, category, address, historical description and historical period. This improves the usability of the database, particularly as the number of recorded sites increases. An example of the search results generated by the system is shown in Figure 6. The module allows users to filter records by keywords and categories, making it easier to locate the required historical site within the database.

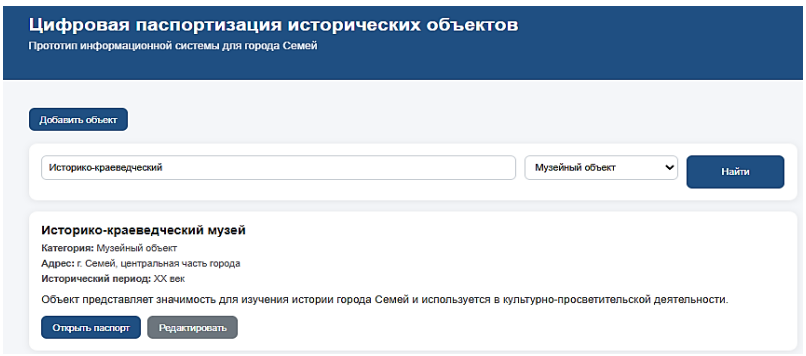


Figure 6 – Search results in the information system

The search function increases the practical value of the system, as it supports quick access to records and remains useful when the number of historical sites in the database is expanded.

During the pilot population of the system, a test database of historical sites in Semey was created, containing 5 records, one for each of the five implemented categories: architectural monuments, historic buildings, memorial sites, archaeological sites and cultural sites. For each record, the system automatically assigned an identifier and recorded the creation and update dates. The testing showed that the system correctly performs the main operations related to data entry, modification, search and display. Since the testing was carried out on a limited pilot dataset in a local development environment, the obtained results should be interpreted as an initial verification of the prototype rather than as full-scale performance testing. Functional testing included nine test scenarios corresponding to the main operations of the prototype: adding a site, validating mandatory fields, editing a record, viewing a digital site record, searching by name, filtering by category, uploading an image, deleting a record and checking system fields. A test scenario was considered successful if the expected operation was completed without data loss, incorrect display, application interruption or violation of the defined data structure. The results of the functional testing are presented in Table 2.

Table 2 – Results of functional testing of the prototype

Function tested	Description of the test	Result
Adding a site	Entering a new site with the mandatory fields completed	The record is saved correctly in the database
Validation of mandatory fields	Attempting to save a record without a name, category or description	The system displays a notification indicating that the mandatory fields must be completed
Editing a record	Changing information in a previously created site record	The data are updated without loss of previously saved information
Viewing the digital site record	Opening a site record from the general list	The information is displayed in a structured format
Search by name	Searching for a site by a keyword in its name	The system displays the relevant records
Search by category	Filtering sites by a selected category	The list of sites is filtered correctly
Image upload	Attaching photographic material to a site record	The image is saved and displayed in the digital record
Deleting a site	Deleting a selected record from the database	The record is removed from the general list and from the database
Operation of system fields	Checking the creation and update dates of a record	The system data are generated automatically

All nine test scenarios were completed successfully on the pilot dataset. The testing confirmed the correctness of the basic operations of the prototype. Minor issues identified during intermediate testing were mainly related to incomplete input processing and image display; these issues were resolved after adjusting the validation and routing logic.

To strengthen the evidential basis of the results, the prototype was assessed not only in terms of the availability of its interface, but also in relation to the performance of its main functional components. The assessment focused on the completeness of the digital site record, the correctness

of data saving and search, the clarity of record viewing, and the extensibility of the data structure. The results indicate that the developed system supports structured data entry, reliable storage, search and visualisation, while also providing a basis for further extension through GIS and QR-based modules.

The evaluation shows that the prototype meets the basic functional requirements defined at the design stage. At the same time, the results indicate areas for further development, including the integration of a mapping module, QR-based identification and user access management.

The errors identified during the intermediate stages of testing were mainly related to the processing of incomplete input and the display of photographic materials. After the validation and routing logic had been adjusted, these issues were resolved. The pilot testing therefore confirmed the operability of the main prototype modules and its suitability for further extension.

A further outcome of the study is the system's readiness for subsequent modernisation. The availability of coordinate fields and a unified data model creates the basis for the future integration of a mapping module without redesigning the basic structure. The digital site record format may also be used in the future to generate QR-based links to individual site records. These functions have not yet been implemented as complete components of the current prototype, but the proposed data structure provides the necessary basis for their later development. Thus, the developed prototype can be considered not only as a local database, but also as a foundation for the further development of a digital platform for the historical and cultural heritage of Semey.

Discussion

The results obtained show that the digital documentation of historical sites at the city level can be implemented through a compact modular web-based system. The effectiveness of such a solution depends not only on the availability of a software interface, but also on a formalised data structure that allows different sites to be described according to a unified principle. This distinguishes the proposed system from a simple set of textual descriptions, spreadsheets or local archival materials.

The developed prototype follows the general logic of heritage information systems. Previous studies in the field of digital heritage emphasise the importance of combining alphanumeric, visual and spatial data, as well as the use of relational databases, mapping services and web interfaces [5-9]. The system developed for Semey represents a basic stage of this approach. Although it is not yet a full-scale GIS platform, it provides the structural basis required for further geoinformation integration and QR-based identification.

To clarify the position of the developed prototype among existing digital heritage solutions, a comparative analysis was carried out according to several criteria: the presence of a unified digital site record, support for spatial data, search functionality, multimedia materials, GIS and QR readiness, and scalability. The results of the comparison are presented in Table 3.

Table 3 – Comparative analysis of approaches to the digital documentation of historical sites

Approach or solution	Digital site record	Spatial data	Search and multimedia	Limitation
Official registers of monuments	Partial	Limited	Limited	Not focused on interactive editing, visualisation or educational use
Tourist and reference portals	Descriptive	Sometimes available	Basic search and visual materials	Do not provide a unified internal data model for updating records
Full-scale heritage GIS platforms	Present	Advanced	Present	Require complex infrastructure and prepared structured data
Spreadsheets and local archives	Unstructured or weakly structured	Limited or absent	Limited	Low scalability and weak data connectivity
Proposed information system	Unified and structured	Coordinate fields prepared	Search, editing and image upload	Prototype stage; GIS and QR functions are planned for further implementation

The comparison shows that the proposed system occupies an intermediate position between simple digital catalogues and full-scale GIS platforms. Its main advantage lies in the combination of a unified digital site record, database storage, search functionality, image handling and readiness for further GIS and QR-based extension.

The significance of the proposed solution lies in the fact that information about historical sites is presented as structured data suitable for storage, search, updating, visualisation and further software-based processing. The prototype includes a unified digital site record, a modular web application architecture, database storage, search functionality, image handling and automated system fields. These features make it possible to consider the developed solution as an applied information system rather than merely an electronic reference resource.

An important advantage of the system is its adaptation to the local context of Semey, where historical sites belong to different categories and require a unified digital format for description and further use. The prototype may be useful for educational institutions, museums, archives, local history associations and municipal bodies in preparing educational materials, developing thematic routes, conducting research and forming digital collections.

At the same time, the study has several limitations. The system is currently a prototype and was tested in a local environment using a limited dataset. The use of SQLite is appropriate for pilot testing; however, practical deployment in a multi-user environment would require migration to a database management system designed for concurrent access, such as PostgreSQL or MySQL. The current version also does not yet include user role differentiation, authentication, a full mapping interface, automatic QR code generation, batch data import, regular backup procedures or mechanisms for protecting uploaded files. Therefore, further development should include access control, data integrity checks, backup mechanisms and additional testing on an expanded dataset under multi-user access conditions.

Further development of the system should focus on integrating an interactive map, implementing QR-based identification, supporting multiple images for each record, introducing user access control, enabling data export and creating an administrative module. In the future, the system may also be supplemented with tools for analytics, thematic route generation and integration with educational platforms.

Conclusion

This article has addressed the development of a web-based information system for the digital documentation of historical sites in Semey. The relevance of the study is determined by the need to move from fragmented storage of information towards a unified digital environment that supports the structured description, search, updating and visual presentation of information about sites of historical significance.

During the study, a digital site record structure was developed for a historical site. This structure includes identification, classification, spatial, historical-descriptive, visual and system data. On the basis of the proposed structure, the architecture of the information system was designed, a logical database model was developed and a software prototype of the web application was implemented. The system supports the addition, editing, viewing, searching and deletion of records, as well as the uploading and display of photographic materials.

The pilot testing confirmed the operability of the main prototype modules. The system correctly performs data entry, saving, search and display operations, provides the automatic generation of system fields and enables information about a site to be presented in a unified digital form. This confirms the applicability of the proposed approach to the digital recording of historical sites in Semey.

The scientific novelty of the study lies in the development of a structural and functional model of an information system for digital documentation, adapted to the local urban context. The practical significance of the study is reflected in the potential use of the developed prototype in educational, museum, archival and local history activities, as well as in the further development of the digital infrastructure for the historical and cultural heritage of the region.

Further work should focus on expanding the database of sites, migrating the system to a multi-user database environment, introducing user access control and backup mechanisms, and testing the system on a larger dataset. The integration of a mapping module, QR-based identification and tools for creating thematic routes should be considered as subsequent stages of development based on the proposed data structure.

References

1. Charter on the Preservation of the Digital Heritage [Electronic resource] / UNESCO. – Paris : UNESCO, 2003. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000179529 (date of request: 24.05.2026).
2. Webb C. Guidelines for the Preservation of Digital Heritage [Electronic resource] / C. Webb // prepared by the National Library of Australia. – Paris: UNESCO, 2003. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000130071 (date of request: 24.05.2026).
3. Proveden monitoring sostoyaniya pamyatnikov istorii i kul'tury na territorii goroda Semei [Ehlektronnyi resurs] // Semei Siti: gorodskoi portal Semeya. – 2023. – 13 aprelya. – https://semey.city/novosti-semeya/50297/ (data obrashcheniya: 24.05.2026). (In Russian).
4. Pamyatniki istorii i kultury [Ehlektronnyi resurs] // Ofitsial'nyi internet-resurs akimata goroda Semei. – 2021. – 13 avgusta. https://www.gov.kz/memleket/entities/abay-semey/press/article/details/59597 (data obrashcheniya: 24.05.2026). (In Russian).
5. A built heritage information system based on point cloud data: HIS-PC / F. Poux et al // ISPRS International Journal of Geo-Information. – 2020. – Vol. 9, № 10. – Art. 588. https://doi.org/10.3390/ijgi9100588.
6. Domínguez-Ruíz V. Contribution to the knowledge of cultural heritage via a Heritage Information System (HIS): the case of La Cultura del Agua in Valverde de Burguillos, Badajoz (Spain) / V. Domínguez-Ruíz, J. Rey-Pérez, G. Rivero-Lamela // Sustainability. – 2020. – Vol. 12, № 3. – Art. 1141. https://doi.org/10.3390/su12031141.
7. Yang C. A digital information system for cultural landscapes: the case of Slender West Lake scenic area in Yangzhou, China / C. Yang, F. Han // Built Heritage. – 2020. – Vol. 4. – Art. 3. https://doi.org/10.1186/s43238-020-00004-8.
8. Berg E. The use of GIS in the national system for cultural heritage management and dissemination to the general public in Norway: case study: the heritage management database “Askeladden” and the system for dissemination to the public, «Kulturminnesøk» / E. Berg // Progress in Cultural Heritage Preservation: EuroMed 2012. Lecture Notes in Computer Science. – Berlin; Heidelberg: Springer, 2012. – Vol. 7616. – P. 578-585. https://doi.org/10.1007/978-3-642-34234-9_59.
9. Ducatteeuw, V Mapping Ghent’s cultural heritage: a place-based approach with web GIS / V. Ducatteeuw, F. Danniau, C. Verbruggen // International Journal of Digital Humanities. – 2025. – Vol. 7. – P. 91-113. https://doi.org/10.1007/s42803-025-00099-4.
10. Pressman R.S. Software Engineering: A Practitioner’s Approach / R.S. Pressman, B.R. Maxim. – 9th ed. – New York: McGraw-Hill Education, 2019.
11. Sommerville I. Software Engineering / I. Sommerville. – 10th ed. – Boston: Pearson, 2016.
12. Elmasri R. Fundamentals of Database Systems / R. Elmasri, S.B. Navathe. – 7th ed. – Boston: Pearson, 2016.
13. Silberschatz, A. Database System Concepts / A. Silberschatz, H.F. Korth, S. Sudarshan. – 7th ed. – New York: McGraw-Hill Education, 2019.
14. Grinberg M. Flask Web Development: Developing Web Applications with Python / M. Grinberg. – 2nd ed. – Sebastopol: O’Reilly Media, 2018.
15. Date C.J. An Introduction to Database Systems / C.J. Date. – 8th ed. – Boston: Addison-Wesley, 2004.

Т.С. Жылқыбаев[*], А.Ф. Даутова[1], Д.С. Жұмашева[1], Г. Шуйтенов[2], С. Алтынбек[2*]

[1]Шәкәрім университет, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А

[2]Esil University, 010008, РК, Астана, ул. Жубанова, 7

*e-mail: tursynhan.jylqybaev@shakarim.kz

РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ЦИФРОВОЙ ПАСПОРТИЗАЦИИ ИСТОРИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ РЕГИОНА

В статье рассматривается разработка веб-ориентированной информационной системы цифровой паспортизации исторических объектов города Семей. Актуальность исследования связана с необходимостью перехода от разрозненного хранения сведений об объектах историко-культурного наследия к единой цифровой среде, обеспечивающей структурированное описание, поиск, обновление и визуальное представление данных. Объектом исследования является процесс цифрового учёта и представления информации об исторических объектах, предметом – методы и программные средства разработки информационной системы для их хранения и обработки. В ходе исследования применялись методы анализа предметной области, моделирования данных, проектирования базы данных, модульного программирования и функционального тестирования. В

результате разработана структура цифрового паспорта исторического объекта, включающая идентификационные, классификационные, пространственные, историко-описательные, визуальные и служебные данные. На её основе спроектирована архитектура веб-приложения, разработана логическая модель базы данных и реализован программный прототип с использованием Python, Flask, SQLite, HTML, CSS и JavaScript. Система обеспечивает добавление, редактирование, просмотр, поиск и удаление записей, загрузку фотоматериалов, автоматическое формирование идентификаторов и фиксацию временных меток. Интеграция GIS и QR-идентификация рассматриваются как направления дальнейшего развития и поддерживаются на уровне предложенной структуры данных, а не как завершённые функциональные модули. Научная ценность работы заключается в разработке структурно-функциональной модели цифровой паспортизации, адаптированной к локальному городскому контексту. Практическая значимость состоит в возможности применения системы в образовательной, музейной, архивной и краеведческой деятельности, а также в дальнейшем развитии цифровой инфраструктуры историко-культурного наследия города Семей.

Ключевые слова: *цифровая паспортизация, исторические объекты, информационная система, веб-приложение, база данных, цифровое наследие, город Семей, цифровой паспорт объекта.*

Т.С. Жылқыбаев[1]*, А.Ф. Даутова[1], Д.С. Жұмашева[1], Г. Шуйтенов[2], С. Алтынбек[2]
[1]Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинки к-сі, 20 А
[2]Esil University, 010008, ҚР, Астана, Жұбанов көшесі, 7
*e-mail: tursynhan.jylqybaev@shakarim.kz

ӨҢІРДІҢ ТАРИХИ НЫСАНДАРЫН ЦИФРЛЫҚ ПАСПОРТТАУҒА АРНАЛҒАН АҚПАРАТТЫҚ ЖҮЙЕНІ ӘЗІРЛЕУ

Мақалада Семей қаласының тарихи нысандарын цифрлық паспорттауға арналған веб-бағдарланған ақпараттық жүйені әзірлеу мәселесі қарастырылады. Зерттеудің өзектілігі тарихи-мәдени мұра нысандары туралы мәліметтердің әртүрлі дереккөздерде шашыраңқы сақталуына және оларды құрылымдалған түрде жинақтайтын, іздеуге, жаңартуға және көрнекі түрде ұсынуға мүмкіндік беретін бірыңғай цифрлық ортаның қажеттілігіне байланысты. Зерттеу объектісі – тарихи нысандар туралы ақпаратты цифрлық түрде есепке алу және ұсыну процесі, ал зерттеу пәні – осы мәліметтерді сақтау мен өңдеуге арналған ақпараттық жүйені әзірлеу әдістері мен бағдарламалық құралдары. Зерттеу барысында пәндік саланы талдау, деректерді модельдеу, дерекқорды жобалау, модульдік бағдарламалау және функционалдық тестілеу әдістері қолданылды. Нәтижесінде тарихи нысанның цифрлық паспортының құрылымы әзірленді. Ол сәйкестендіру, жіктеу, кеңістіктік, тарихи-сипаттамалық, визуалды және қызметтік деректерді қамтиды. Ұсынылған құрылым негізінде веб-қосымшаның архитектурасы мен дерекқордың логикалық моделі жасалып, Python, Flask, SQLite, HTML, CSS және JavaScript технологиялары арқылы бағдарламалық прототип іске асырылды. Жүйе жазбаларды қосу, өңдеу, қарау, іздеу және жою, фотоматериалдарды жүктеу, идентификаторларды автоматты түрде қалыптастыру және уақыт белгілерін тіркеу функцияларын орындайды. GIS-интеграция және QR-негізіндегі сәйкестендіру жүйені одан әрі дамыту бағыттары ретінде қарастырылады және қазіргі кезеңде толық іске асырылған функционалдық модульдер емес, ұсынылған деректер құрылымы деңгейінде қамтамасыз етіледі. Жұмыстың ғылыми құндылығы жергілікті қалалық контекске бейімделген цифрлық паспорттаудың құрылымдық-функционалдық моделін ұсынуымен айқындалады. Практикалық маңызы жүйені білім беру, музей, архив және өлкетану қызметінде, сондай-ақ Семей қаласының тарихи-мәдени мұрасының цифрлық инфрақұрылымын дамытуда қолдану мүмкіндігімен байланысты.

Түйін сөздер: *цифрлық паспорттау, тарихи нысандар, ақпараттық жүйе, веб-қосымша, дерекқор, цифрлық мұра, Семей қаласы, нысанның цифрлық паспорты.*

Сведения об авторах

Тұрсынхан Саятұлы Жылқыбаев* – магистр технических наук, преподаватель, кафедра «Автоматизация и информационные технологии», Шәкәрім университет, г. Семей, Казахстан; e-mail: tursynhan.jylqybaev@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8918-527X.

Алма Фазылагзамовна Даутова – магистр педагогических наук, преподаватель, кафедра «История», Шәкәрім университет, г. Семей, Казахстан; e-mail: dautova_alma@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1608-1488.

Дана Серікқызы Жұмашева – магистр технических наук, преподаватель кафедры «Автоматизация и информационные технологии», Шәкәрім университет, г. Семей, Казахстан; e-mail: d.zhumasheva@shakarim.kz.

Габит Шуйтенов – кандидат педагогических наук, ассоциированный профессор, Esil University, Казахстан, Астана; e-mail: shuitenov.g@esil.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9905-7247.

Серик Атаконысулы Алтынбек – PhD, ассоцированный профессор кафедры «Информационные системы и технологии» Esil University, Астана, Казахстан; e-mail: Serik_aa@bk.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8435-7773.

Авторлар туралы мәліметтер

Тұрсынхан Саятұлы Жылқыбаев* – техника ғылымдарының магистрі, «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасының оқытушы, Шәкәрім университеті, Семей қ., Қазақстан; e-mail: tursynhan.jylqybaev@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8918-527X.

Алма Фазылагзамовна Даутова – педагогика ғылымдарының магистрі, «Тарих» кафедрасының оқытушы, Шәкәрім университеті, Семей қ., Қазақстан; e-mail: dautova_alma@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1608-1488.

Дана Серіккызы Жұмашева – техника ғылымдарының магистрі, «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасының оқытушысы, Шәкәрім университеті, Семей қ., Қазақстан; e-mail: d.zhumasheva@shakarim.kz.

Ғабит Шуйтенов – педагогика ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, Esil University, Қазақстан, Астана; e-mail: shuitenov.g@esil.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9905-7247.

Серік Атаконысұлы Алтынбек – PhD, «Ақпараттық жүйелер және технологиялар» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Esil University, Астана, Қазақстан; e-mail: Serik_aa@bk.ru**.** ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8435-7773.

Information about the authors

Tursynkhan Zhylkybayev* – master of technical sciences, lecturer of Department of Automation and Information Technologies, Shakarim university, Semey c., Kazakhstan; e-mail: tursynhan.jylqybaev@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8918-527X.

Alma Dautova – Master of Pedagogical Sciences, Shakarim University, Lecturer at the Department of History, Semey, Kazakhstan; e-mail: dautova_alma@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1608-1488.

Dana Zhumasheva – Master of Technical Sciences, lecturer of the Department «Automation and information technologies», Shakarim University, Semey c., Kazakhstan; e-mail: d.zhumasheva@shakarim.kz.

Gabit Shuitenov – Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Esil University, Kazakhstan, Astana; e-mail: shuitenov.g@esil.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9905-7247.

Serik Atakonyssuly Altynbek – PhD, Associate Professor of the Department of Information Systems and Technologies, Esil University, Astana, Kazakhstan; e-mail: Serik_aa@bk.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8435-7773.

Received 01.06.2026
Revised 28.06.2026
Accepted 03.07.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-18

ҒТАХР: 50.43.19

CC BY 4.0
Check for updates

А. Асет[1], Е.А. Оспанов[2]*, А.М. Ахметова[1], Н.С. Сарсенбаев[3], А.А. Бейсембаев[3]
[1]Әл-фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,
050040, Қазақстан, Алматы, әл-фараби даңғылы 71
[2]Шәкәрім университеті, 071410, Қазақстан, Семей, Глинки көшесі 20 А
[3]Қ. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті,
050040, Қазақстан, Алматы, Сәтбаев көшесі 22в
*e-mail: y.ospanov@shakarim.kz

СУМЕН ЖАБДЫҚТАУДЫ АВТОМАТТАНДЫРУ ЖӘНЕ ДИСПЕТЧЕРЛЕУГЕ АРНАЛҒАН ЖОҒАРЫ ТИІМДІ, ЖОҒАРЫ СЕНІМДІ ТАРАТЫЛҒАН ЖҮЙЕЛЕРДІ МОДЕЛЬДЕУ

Аңдатпа: *Сумен жабдықтауды автоматтандыру және диспетчерлеуге арналған таратылған жүйелерді модельдеу қазіргі кездегі су тапшылығы проблемасы мен апаттық жағдайды дер кезінде болдырмау, сонымен бірге апаттық жағдайды алдын ала болжау,*

©А. Асет, Е.А. Оспанов, А.М. Ахметова, Н.С. Сарсенбаев, А.А. Бейсембаев, 2026

заманауи датчиктер мен цифрлық құрылғыларды қолдану арқылы диспетчердің жүктемесін азайту мәселелерін шешуге бағытталған.

Бұл жұмыстың мақсаты – жүйені нақты енгізбей тұрып, оның қалай жұмыс істейтінін алдын ала тексеру, оңтайландыру және тәуекелді азайту.

Ғылыми мақалада тербелмелі және бірінші ретті апериодикалық буын қолдана отырып, су қысымы үшін күшейту коэффициенті қарастырылып, k=5 және T параметрлері бойынша салыстырмалы талдау жасалынған. Сонымен қатар, имитациялық модельдеу және параметрлік талдау әдістері қолданылып, беріліс функциясы негізінде интерполяция тәсілі арқылы жүйенің динамикалық сипаттамалары бағаланған.

Зерттеу нәтижелері су қысымын тұрақтандыру, жүйенің сенімділігін арттыру, жоғарғы қабаттардағы гидравликалық шығындарды азайту және сумен жабдықтау жүйесін тиімді басқару үшін инженерлік шешімдер ұсынуға мүмкіндік береді. Ұсынылған тәсіл ресурстарды үнемдеуге, апат қаупін төмендетуге, басқару сапасын жақсартуға және көпқабатты тұрғын үй кешендеріндегі су тарату процестерін автоматтандырудың тиімділігін арттыруға негіз болады. Бұл әдіс практикалық енгізуге дейін жүйе параметрлерін дәл таңдауға көмектеседі.

Түйін сөздер: *бағдарламалық логикалық бақылаушы, микроконтроллер, Қымсым датчигі, ПИ реттеуіш, имитациялық модельдеу.*

Кіріспе

Сумен жабдықтау жүйесінің дамуы адамзат өркениетінің дамуымен тығыз байланысты. Ежелгі Мысыр, Месопотамия, Үндістан және Қытайда алғашқы су арналары, құдықтар мен су қоймалары пайда болды. Ежелгі Римде акведуктар арқылы қалаларға су жеткізудің дамыған жүйесі қалыптасты. Орта ғасырларда сумен жабдықтау баяу дамып, негізінен құдықтар, су мұнаралары және табиғи су көздерінен су тасу қолданылды. Ал Андалусия мен Бағдатта күрделі су жүйелері жұмыс істеді. XVI-XIX ғасырларда қала халқының өсуіне байланысты металл құбырлар, сорғылар және резервуарлар енгізіліп, су жүйелері күрделене түсті. XIX ғасырдың соңы мен XX ғасырдың басында орталықтандырылған су жүйелері қалыптасып, суды сүзу мен хлорлау сияқты тазарту әдістері енгізілді. Қазіргі кезеңде автоматтандырылған басқару, SCADA жүйелері, қашықтан мониторинг, су мен энергияны үнемдеу, қайта пайдалану технологиялары дамуда. Болашақта smart water supply, жасанды интеллект, деректерді талдау және климаттық өзгерістерге бейімделген шешімдер кеңінен қолданылмақ. Осыған байланысты зерттеу жұмысында Қазақстандағы су тапшылығы және тұрғын үй кешендеріндегі су жүйесіндегі физикалық әрі көрінерлік жоғалтуларды азайту жолдары қарастырылады [1].

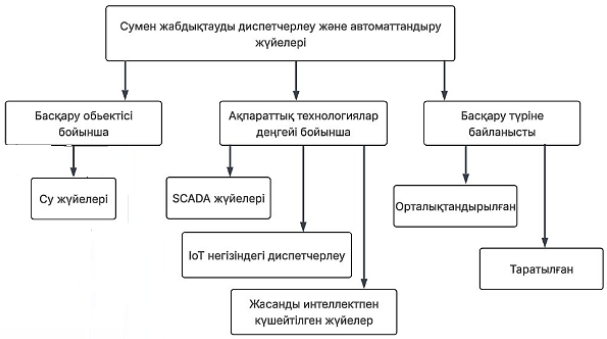
Материалдар мен тәсілдер

Нысанды басқару үшін жүйеде суық және жылы су тұтынушыларының саны өте көп екенін ескеру қажет, сондықтан жеке пәтердің су тұтынуының математикалық моделі салыстырмалы түрде қарапайым болғанымен, көптеген пәтерлерді ескерген жағдайда модель әлдеқайда күрделі болады. Бұл мақалада көптеген біртекті, бірақ параметрлері әртүрлі модельдерден тұратын объектіні жуық түрде сол модельге ұқсас модельмен сипаттауға болатыны жөніндегі гипотеза тексеріледі.Бұрын жазылған әдебиеттерде талдау жүргізілген, ал менің ғылыми мақаламда параметрлер сандық оңтайландыру арқылы таңдалып, график түрінде айқын көрсетілді [2].

Қазіргі SCADA жүйесінің артықшылықтары жұмыс режимі тәулік бойы онлайн бақыланады (операторсыз жұмыс істей береді), апаттардың алдын алады (қысым түссе, автоматты түрде сигнал береді), су сапасын бақыланады, шығындарды азайтады, деректерді автоматты түрде сақтап және есеп береді (мысалы, ай сайынғы су тұтыну есебі) және 1-суретте сумен жабдықтау автоматтандыру жүйелерінің құрылымдық сұлбасы көрсетілді.

Компоненттік база және модельдеу параметрлері

Тұрғын үй кешендеріне су желісін жүргізу бойынша сызықты жүйе қарастырылып [3], талдау жүргізу бағытында ғылыми жұмысқа зерттеу жасаумыз керек, яғни ғылыми зерттеу жұмысында сумен жабдықтау диспетчерлеу жүйесінде таратылған бірнеше объектілерді жуықтату әдісін қолданамыз, бұл әдіс нақты сумен жабдықтау жүйесіндегі әртүрлі физикалық объектілерді (мысалы, сорғылар, резервуарлар, құбырлар, клапандар және т.б.) автоматтандыру және басқару жүйесі үшін қарапайым математикалық модельдерге айналдыру үдерісі. Бұл тәсіл – күрделі, кең ауқымды (таратылған) жүйелерді басқаруды жеңілдету үшін қолданылады [4].



Сурет 1 – Сумен жабдықтау автоматтандыру жүйелерінің құрылымдық сұлбасы

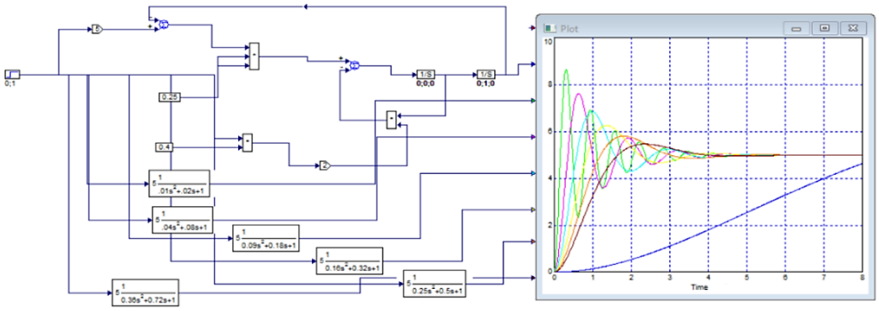
Жуықтау (аппроксимациялау) арқылы модельдер қарапайым беріліс функциялар түрінде сипатталады, сумен жабдықтау жүйесінде гидравликалық резонаныстық жиіліктер болады, ол жүйенің тұрақтылығына әсер етеді, бұл жиіліктер жүйедегі су қысымына, ағынына, жылдамдығына байланысты есептелінеді, гидравликалық резонанстық жиілік деп су желісіндегі сорғының пульсациясын немесе клапан сорғыға жақын орналасса су қысымы артып, тербелістер күшейіп, сорғы станциясында шу, діріл және жиілік жоғарлағанда апаттық жағдай туындауы мүмкін, гидравликалық резонанстық жиілік төмен болса, құбыр дірілдейді, су желісінде гидросоққы пайда болады, құбыр мерзімінен бұрын тозады, жүйе тұрақсыз болады, сол себепті сумен жабдықтау диспетчерлік жүйесінде суық су қысымының су желісіндегі гидравликалық соққыға әсерін азайту үшін Манхэттен тұрғын үй кешеніндегі таратылған су жүйесіне зерттеу нысаны ретінде қарастырып, 20 қабатты тұрғын үйдің үш аумаққа (зона) бөліп, 1, 7, 8, 14, 15, 20-қабаттағы суық су қысымына талдау жасаймыз, бағарламалық логикалық бақылаушы, ПИ реттеуіш, микроконтроллер және аумақ (зона) үшін арнайы су желісіне су қысымы датчиктері қолданылып, көрсеткіштерге сүйене отырып модельдейміз, ол үшін Vis Sim бағдарлама ортасында сызықты модель арқылы талдау жасау үшін төмендегідей тербелмелі буынның өтпелі функцияны құрамыз:

$$W(s) = \frac{k}{T_1^2 s^2 + T_2 s + 1} \quad (1)$$

Мұндағы: $W(s)$ -суық су қысымының беріліс функциясы, суық су қысымы (Лаплас түрлендіру аргументі ретінде алынған мән), k- күшейткіш коэффициенті (Су жүйенің қысымның өзгеріс амплитудасы бойынша алынған мән яғни диспетчерлік пункіттегі БЛБ сигналы), k – беріліс коэффициенті су қысымына әсер ететін элементтің сезімталдығын сипаттайды, Физикалық мағынасы: кіріс қысымындағы немесе клапан ашылуындағы өзгеріске қатысты шығу қысымының (немесе сигналдың) шамасын анықтайды. $T_{\text{р}}$ – инерция уақыты (Су жүйендегі суық су қысымның баяу өзгеруі бойынша k=5, Т1 $= 0.1\text{сек.}, 0.2\text{сек.}, 0.3\text{сек.}, 0.4\text{сек.}, 0.5\text{сек.}, 0.6\text{сек.}, \text{Т}_2 = 0.02\text{сек.}, 0.08\text{сек.}, 0.18\text{сек.}, 0.32\text{сек.}, 0.5\text{сек.}, 0.72\text{сек.}, s = 1 \ldots 6\frac{1}{\text{сек}}$.) Т – уақыт тұрақтылығы ,Буынның инерциясын сипаттайды, яғни жүйенің кіріс әсеріне жауап беру жылдамдығын көрсетеді. Мағынасы: егер су қысымын өзгерту керек болса, жүйе жаңа тепе-теңдік күйіне жетеді, Т уақыт диапазоны Жүйенің қысым орнығу уақытын берілді, суық су жүйесіндегі параметрлер «Алматы су» шаруашылық жүргізу құқығындағы мемлекеттік коммуналдық мемлекеттік коммуналдық кәсіпорынның соңғы үш жылғы су жүйесі деректер қорына негізделіп алынды [5]. 2-Суретте суық су қысымын автоматты реттеу жүйесінің тербелмелі буын бойынша құрылған динамикалық моделі көрсетілген.

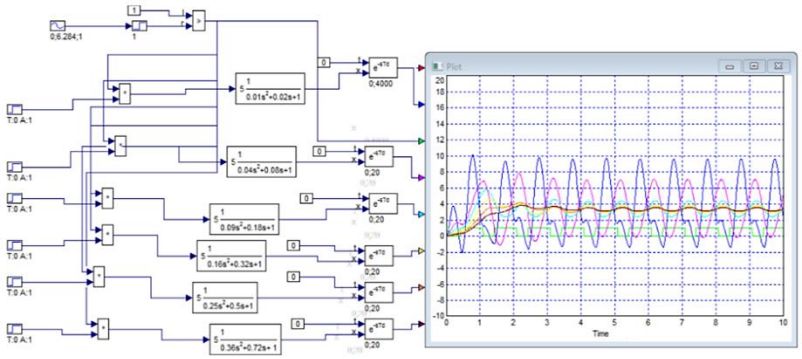
Модель Simulink ортасында жасалған және су жүйесіндегі қысымның уақыт бойынша өзгерісін сипаттайды. суық су қысымын тұрақты деңгейде ұстау мақсатында реттеу жүйесі құрастырылған. Мұндағы негізгі мақсат – қысымның артық тербелісін азайту және берілген мәнге (мысалы, 4-6 бар) тез әрі тұрақты түрде жету. Бұл буындар гидравликалық жүйедегі судың инерциясын және құбырлардағы серпімділікті модельдейді [6]. Мұндай буындарда қысым бірден емес, уақыт өте келе қалыптасады және бастапқыда тербеліс байқалады – яғни қысым жоғарылап, төмендеп, біртіндеп орнығады. Бұл буындар гидравликалық жүйедегі судың инерциясын және құбырлардағы серпімділікті модельдейді. Мұндай буындарда қысым

бірден емес, уақыт өте келе қалыптасады және бастапқыда тербеліс байқалады – яғни қысым жоғарылап, төмендеп, біртіндеп орнығады [4]. 2-ші суреттегі оң жақтағы оцилограф терезесінде әртүрлі түсті қисықтар уақыт бойынша қысымның өзгерісін көрсетеді, яғни бастапқы секундтарда қысым тез өсіп, тербелістер байқалады. Кейін жүйе тұрақталуға бет алады. Түрлі түсті қисықтар – бұл әртүрлі параметрлер (мысалы, әртүрлі реттеу коэффициенттері) кезінде жүйенің реакциялары. График бойынша кейбір қисықтарда тербеліс көп – бұл реттегіштің тым жоғары күшейту коэффициентін көрсетеді. Басқаларында жүйе баяу, бірақ тұрақты – бұл жүйенің инерциясы көп екенін білдіреді, сонымен бірге 2 - суреттегі суық су қысымын автоматты реттеу жүйесінің тербелмелі буындар бойынша құрылған динамикалық модель [7-8] ғылыми жұмыстарда көрсетілген.

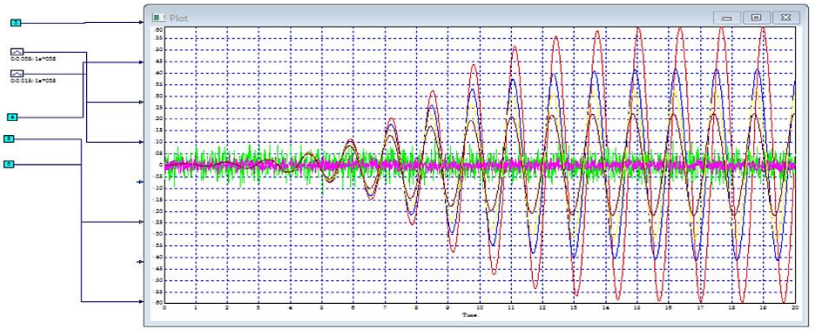


Сурет 2 – Суық су қысымын автоматты реттеу жүйесінің тербелмелі буындар бойынша құрылған динамикалық модель сұлбасы

3-ші суретте көрсетілген тербелмелі буындардың параметрлеріне байланысты өтпелі процестердің динамикасы бойынша модель құрудың мақсаты суық су қысымының уақыт бойынша өзгерісін әр түрлі инерцияны талдау. Осы арқылы инженер жүйенің орнықтылығын және қажетті реттеуіш негізінде параметрлер таңдай алады. 3-суреттегі тербелмелі буындардың әр түрлі параметрлері бойынша графиктер [9-10] ғылыми жұмыстарда көрсетілген. 3 Суретте тербелмелі буындардың әр түрлі параметрлері бойынша график тұрғызылды [3]. 4-ші суретте тербелмелі буын бойынша динамикалық жүйелердегі гармоникалық кіріс сигналдарына беретін амплитуда-фазалық реакциясы көрсетілген.



Сурет 3 – Тербелмелі буындардың әр түрлі параметрлері бойынша график



Сурет 4 – Тербелмелі буын бойынша динамикалық жүйелердегі гармоникалық кіріс сигналдарына беретін амплитуда-фазалық реакциясы

Жоғарыда суретте уақыт бойынша бірнеше түрлі түспен берілген қисықтар бар. Олар – әр түрлі аймақтардағы су қысымының уақыт бойынша өзгерісі (өтпелі процесс) көрсетілген, бұл модель – суық су қысымының уақыт бойынша өтпелі процесін сипаттайды, екінші ретті динамикалық жүйеге негізделген және құбырдағы су қысымының тербелісін, инерция мен кешігу әсерін, жүйенің орнықтылығын көрсетеді. Мұндағы қызыл сызық – Сорғы шығысындағы бірінші қабаттағы суық су қысымы, көк сызық- бесінші қабаттағы суық су қысымы, қоңыр сызық- онынші қабаттағы суық су қысымы, Жаслы сызық – он бесінші қабаттағы, күлгін сызық – жирманшы қабаттағы суық су қысымы [11-12].

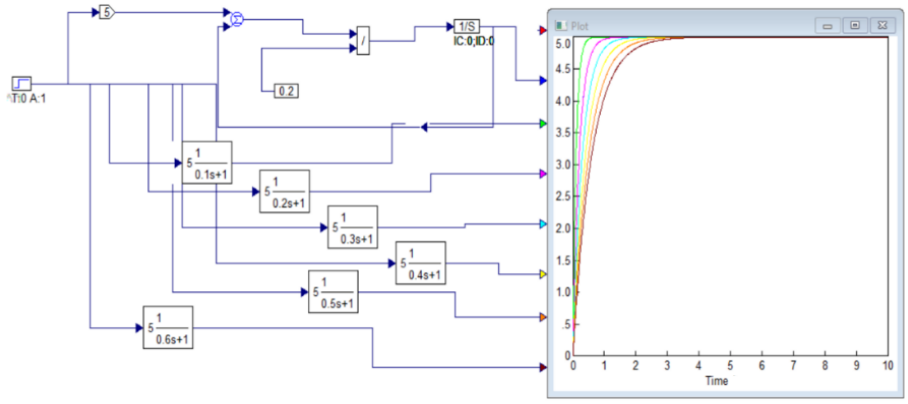
3-сурет пен 4-суреттегі көпқабатты тұрғын үйдің суық су қысымын автоматты реттеу жүйесіне жүргізілген модельдік зерттеу нәтижелері қысымның динамикалық сипаттамалары ғимарат биіктігіне тікелей тәуелді екенін ғылыми тұрғыда дәлелдеді. Әр қабаттағы гидравликалық жағдайлар қысымның өсу жылдамдығына, тербеліс амплитудасына және жүйенің орнығу уақытына нақты әсер ететіні көрсетілді [13-14]. Төменгі қабаттарда (1-7 қабат) қысымның өтпелі процесі жоғары тұрақтылықпен ерекшеленеді. Тербеліс амплитудасы өте төмен, гидравликалық шығындар минималды, реттеу жүйесі ең тиімді режимде жұмыс істейді. Бұл аймақта жүйенің динамикалық көрсеткіштері толық демпфирленген сипатта болады. Орта қабаттарда (8-14 қабаттар) гидравликалық инерция күшейе бастайды. Тербеліс амплитудасы орташа деңгейде болып, қысымның шың мәні 5-6 бар аралығында өзгереді. Жүйе 1-2 секунд ішінде орнығып, функционалды тұрақты режимге өтеді. Бұл қабаттарда басқару жүйесінің динамикалық жүктемесі өседі, бірақ тұрақтылық сақталады. Жоғарғы орта қабаттар (15-20 қабаттар) тербелмелі сипаттың айқындылығымен ерекшеленеді. Тербеліс амплитудасы едәуір жоғары, қысым 7-8 барға дейін көтеріледі, ал орнығу уақыты 3-4 секундқа созылады. Бұл қабаттарда гидравликалық шығындардың бірден артуы жүйенің орнығу қабілетін төмендетіп, динамикалық тұрақтылықты әлсіретеді, ал ең жоғарғы қабатта (20-қабат) гидравликалық инерция максималды болып, қысымның өсу сипаттамасы сызықты және баяу түрде қалыптасады. Тербеліс байқалмайды, бірақ жүйе 8 секунд ішінде тек 3.5-4.0 бар деңгейіне ғана жете алады. Бұл нәтиже сорғы станциясының қуатының жеткіліксіздігін немесе жоғарғы қабатқа дейінгі гидравликалық жолдағы энергия шығынының шектен тыс көп екенін дәлелдейді. Жалпы алғанда, модель нәтижелері көпқабатты ғимараттағы су қысымын автоматты реттеу жүйесінің динамикалық қасиеттері қабат биіктігі артқан сайын нашарлай түсетінін және жоғарғы қабаттарда қосымша инженерлік шешімдерді қажет ететінін анық көрсетті. Зерттеу нәтижелері жүйенің тұрақты жұмысын қамтамасыз ету үшін қысым зоналарын бөлу, бустерлік сорғыларды қолдану, реттеу клапандарының параметрлерін оңтайландыру және адаптивті реттеу алгоритмдерін енгізу қажеттігін ғылыми негіздейді, Яғни 4-суреттегі Тербелмелі буын бойынша динамикалық жүйелердегі гармоникалық кіріс сигналдарына беретін амплитуда-фазалық реакциясы [15-16] ғылыми жұмыста көрсетілген.

Суық су қысымын автоматты реттеу жүйесінде өтпелі функция құрудың басты мақсаты көп қабатты тұрғын үйдегі суық су жүйесінің динамикалық қасиеттерін (реакциясын) математикалық түрде сипаттау. Сондықтан төмендегідей операдикалық буынның өтпелі функцияны құрамыз:

$$W(s) = \frac{k}{T_s+1} \quad (2)$$

Мұндағы:$W(s)$ – суық су қысымының беріліс функциясы, S-суық су қысымы (Лаплас түрлендіру аргументі ретінде алынған мән), k – күшейткіш коэффициенті, k – беріліс коэффициенті су қысымына әсер ететін элементтің сезімталдығын сипаттайды, Физикалық мағынасы: кіріс қысымындағы немесе клапан ашылуындағы өзгеріске қатысты шығу қысымының (немесе сигналдың) шамасын анықтайды. T_s – инерция уақыты (Су жүйендегі суық су қысымның баяу өзгеруі бойынша k=5, $T_s = 0.1\text{сек.}, 0.2\text{сек.}, 0.3\text{сек.}, 0.4\text{сек.}, 0.5\text{сек.}, 0.6\text{сек.}, s = 1 \ldots 6\frac{1}{\text{сек}}.$) Т – уақыт тұрақтылығы, Буынның инерциясын сипаттайды, яғни жүйенің кіріс әсеріне жауап беру жылдамдығын көрсетеді. Мағынасы: егер су қысымын өзгерту керек болса, жүйе жаңа тепе-теңдік күйіне жетеді, Т уақыт диапазоны Жүйенің қысым орнығу уақыты берілді, суық су жүйесіндегі параметрлер «Алматы су» шаруашылық жүргізу құқығындағы мемлекеттік коммуналдық мемлекеттік коммуналдық кәсіпорынның соңғы үш жылғы су жүйесі деректер қорына негізделіп алынды [17-18]. 5-ші

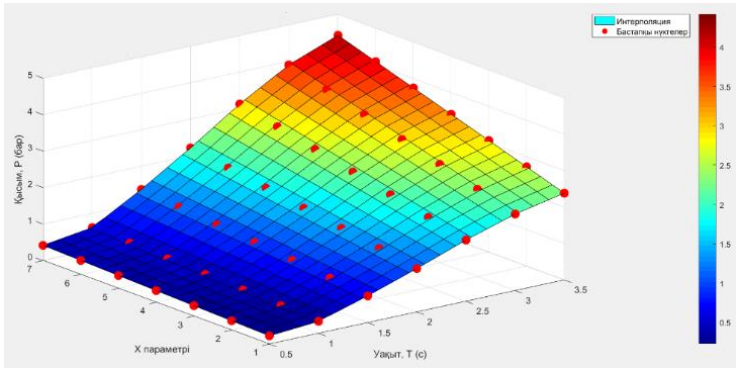
суретте суық су қысымын реттеу жүйесінің (бірінші ретті апериодтық буындар негізінде жасалған) динамикалық моделі көрсетілген.



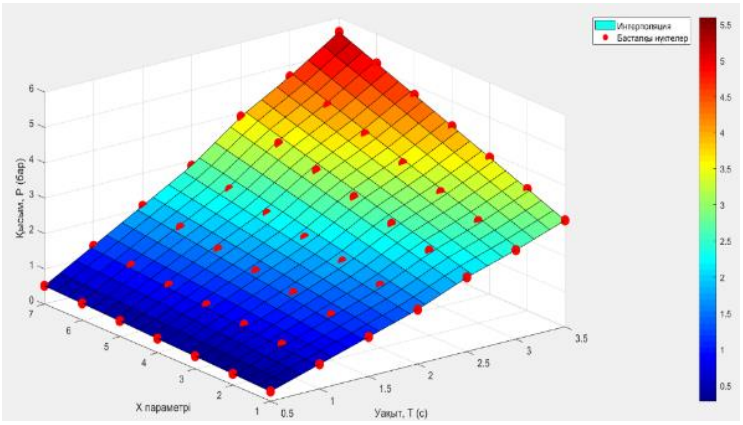
Сурет 5 – Суық су қысымын реттеу жүйесінің (бірінші ретті апериодтық буындар негізінде жасалған) динамикалық моделі

Тәтижелер мен талқылаулар

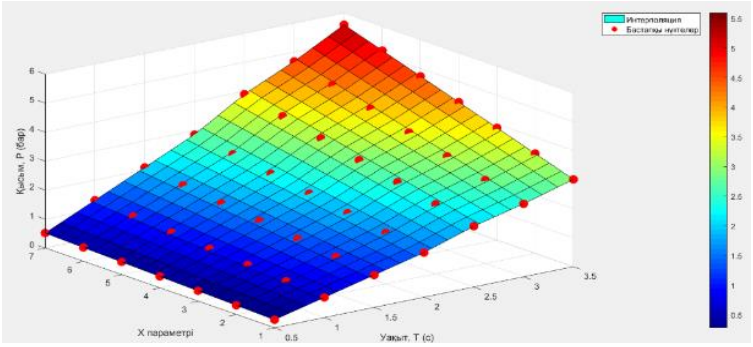
Vis sim бағдарламасында құрылған 5-ші суретте көрсетілген суық су қысымын оңтайлы басқаруға арналған тербелмелі буын үшін бірінші аумақ (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 – қабаттар) және екінші аумақ (8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 – қабаттар) бойынша, ал бірінші ретті апериодикалық буын үшін үшінші аумақ (14, 15, 16, 17, 18, 19, 20 – қабаттар) модель бойынша суық су қысымы датчиктерінің параметрлерлерге сүйене отырып, үш аумақ бойынша суық су қысымы деректеріне сүйене отырып, интерполяция әдісі бойынша 6, 7, 8 суретте модель құрылған.



Сурет 6 – Интерполяция әдісімен модельдеу (а)



Сурет 7 – Интерполяция әдісімен модельдеу (2-аумақ үшін)



Сурет 8 – Интерполяция әдісімен модельдеу (3-аумақ үшін)

Тұрғын үйді сумен жабдықтауда автоматты реттеу жүйесіне тербелмелі және бірінші ретті апериодикалық буындар негізінде модель құрылып, әр қабаттағы қысымның уақыт бойынша өтпелі сипаттамалары анықталды, яғни төменгі (1-7) қабаттарда жүйе жоғары тұрақтылықпен ерекшеленеді. Қысымның көтерілуі тез, тербеліс амплитудасы өте төмен және орнығу уақыты минималды. Бұл су бағанының биіктігі аз болған бөлікте гидравликалық шығындардың төмендігін көрсетті. Орта қабаттар (8-14) уақыттық кешігулердің артуымен және тербеліс амплитудасының өсуімен сипатталады. Бұл бөлікте қысымның нақты мәндері 5.5-6.5 бар аралығында болып, жүйе 3-4 секунд ішінде орнығады. Мұндай динамика құбыр желісінің ұзара бастағанын және гидравликалық инерцияның артып жатқанын көрсетті. 14-15 қабаттарда тербеліс айқын көрінеді. Қысым шыңы 7-8 барға дейін жетіп, тербелу ұзақтығы 4-5 секундқа созылады. Бұл қабаттарда гидравликалық шығындар күрт артады және қысымды реттеу процессі күрделі жүйелік динамикамен сипатталып, Жоғарғы 20 қабаттарда қысымның орнығу уақыты ұзағырақ, тербеліс баяу бәсеңдейді. Орныққан қысым шамамен 4.6-4.7 бар деңгейінде тұрақтайды. Бұл инерциялық құбылыстардың басым екенін көрсетті. 20-қабатта жүйе мүлде басқа динамикалық мінез-құлық танытады. Қысым өте баяу артады, дерлік тербеліс байқалмайды. 8 секунд ішінде қысым тек 3.5-4 бар деңгейіне ғана жетеді. Бұл су бағанының ең жоғарғы нүктесінде гидравликалық шығындардың максималды екенін көрсетеді.

Қорытынды

Сумен жабдықтауды автоматтандыру және диспетчерлеуге арналған жоғары тиімді, жоғары сенімді таратылған жүйелерді модельдеу бойынша бұл мақалада жүргізілген зерттеу нәтижелерінде суық су қысымның көрсеткіштері тұрғын үйдің биіктігіне тікелей тәуелді екенін көрсетеді. Әр қабаттағы гидравликалық жағдайлар қысымның өсу жылдамдығына, тербеліс амплитудасына және жүйенің орнығу уақытына нақты әсер ететіні көрсетілді. Бірінші аумақта қабаттарда қысымның өтпелі процесі жоғары тұрақтылықпен ерекшеленеді. Тербеліс амплитудасы өте төмен, гидравликалық шығындар минималды, реттеу жүйесі ең тиімді режимде жұмыс істейді. Бұл бөлікте жүйенің динамикалық көрсеткіштері толық демпфирленген сипатта болады. Екінші аумақта) гидравликалық инерция күшейе бастайды. Тербеліс амплитудасы орташа деңгейде болып, қысымның мәні 5-6 бар аралығында өзгереді, үшінші аумақтагидравликалық инерция максималды болып, қысымның өсу сипаттамасы сызықты және баяу түрде қалыптасады.

Әдебиеттер тізімі

1. Вострова Р.Н. Мероприятие по снижению потерь в системе водоснабжения / Р.Н. Вострова, Е.А. Пехота // Казахстан Су Арнасы. – 2023. – № 9 236). – С. 16-17.
2. Пахомов А.А. Применение гидравлических средств регулирования водоподачи и водоучета для сооружений водохозяйственного строительства / А.А. Пахомов, Н.А. Колобанова // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. – 2012. – № 3(07). – С. 137-144.
3. Investigation of linear models for control of water flow and temperature in a water supply system / A. Asset et all // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. – 2024. – Vol. 35, № 1. – P. 113-123.
4. Automation in drinking water supply distributed system and testing of water / P. Prashant et al // IOSR Journal of Electronics & Communication Engineering (IOSR-JECE). – 2013. – Vol. 1. – P. 36-38.

5. Normey-Rico J.E. Control of Dead-Time Processes / J.E. Normey-Rico, E.F. Camacho. – London: Springer, 2007. – (Advanced Textbooks in Control and Signal Processing).
6. Carlos D. Analysis of hybrid demand pattern on a water distribution network with transition from intermittent to continuous water supply in Riberas de Sacramento, Chihuahua / D. Carlos, G. Mendoza, C.J.N.G. Carmen // Water Practice & Technology. – 2020. – Vol. 15, № 1. https://doi.org/10.2166/wpt.2020.013.
7. Intelligent system for control of water distribution networks / G. Emânuel et al // Water Science & Technology: Water Supply. – 2018. – Vol. 18, № 4. – P. 1270-1281. https://doi.org/10.2166/ws.2017.188.
8. Nadirbek Y. Development and Improvement of Systems of Automation and Management of Technological Processes and Manufactures / Y. Nadirbek, A. Farukh, E. Farkhod // Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems. – 2017. – Vol. 11, № 3.
9. Smart two-tank water quality and level detection system via IoT / C.O. Samuel et al // Heliyon. – 2021. – Vol. 7. – Article e07651.
10. Каландаров П.И. Автоматизация систем водоснабжения и водоотведения / П.И. Каландаров, С.М. Логунова, С.М. Андреев // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. – 2023. – Т. 11, № 2. – С. 31-35.
11. Research and Design of a Water Supply Dispatching System in a Certain Area Based on Big Data Technology / Zh. L. De et al // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2020. – Vol. 474, № 6. – Art. 062005. https://doi.org/10.1088/1755-1315/474/6/062005.
12. Eswaran P. Conceptual Design and Development of Water Metering System for Multiple Family Residential Buildings / P. Eswaran, A. Kumar // International Journal of Advanced Computer Research. – 2012. – Vol. 2, № 4(6). – P. 501-505.
13. Ernest A.E. Improving equity in intermittent water supply systems / A.E. Ernest, M. Fayyaz, B. Josef // AQUA – Water Infrastructure, Ecosystems and Society. – 2013. https://doi.org/10.2166/aqua.2013.065.
14. Suresh B.Ch. Efficient Design and Deployment of Aqua Monitoring Systems Using WSNs and Correlation Analysis / B.Ch. Suresh, E.R. Sreenivasa, D.L. Rajya // International Journal of Computers Communications & Control. – 2015. – Vol. 10, № 4. – P. 471-479.
15. Automatic Water Distribution System using PLC / S. Rote et al // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). – 2017. – Vol. 6, Iss. 4. – P. 535-540. https://doi.org/10.17577/IJERTV6IS040435.
16. Doan P. Performance Evaluation of River Water Quality Monitoring Using LoRa Connectivity with Fuzzy Algorithm / P. Doan, J. Nguyen, A. Ibnu // International Journal of Computers Communications & Control. – 2021. – Vol. 16, № 4. – Art. 4226. https://doi.org/10.15837/ijccc.2021.4.4226.
17. Гируцкий И.И. Микропроцессорная техника систем автоматизации. Лабораторный практикум: учебно-методическое пособие / И.И. Гируцкий, А.Г. Сеньков. – Минск: БГАТУ, 2017. – 136 с.
18. Сети водоснабжения Республики Казахстан [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://data.egov.kz/ (дата обращения: 02.04.2026).

References

1. Vostrova R.N. Meropriyatie po snizheniyu poter' v sisteme vodosnabzheniya / R.N. Vostrova, E.A. Pekhota // Kazakhstan Su Arnasy. – 2023. – № 9 236). – S. 16-17. (In Russian).
2. Pakhomov A.A. Primenenie gidravlicheskikh sredstv regulirovaniya vodopodachi i vodoucheta dlya sooruzhenii vodokhozyaistvennogo stroitel'stva / A.A. Pakhomov, N.A. Kolobanova // Nauchnyi zhurnal Rossiiskogo NII problem melioratsii. – 2012. – № 3(07). – S. 137-144. (In Russian).
3. Investigation of linear models for control of water flow and temperature in a water supply system / A. Asset et all // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. – 2024. – Vol. 35, № 1. – P. 113-123. (in English).
4. Automation in drinking water supply distributed system and testing of water / P. Prashant et al // IOSR Journal of Electronics & Communication Engineering (IOSR-JECE). – 2013. – Vol. 1. – P. 36-38. (in English).
5. Normey-Rico J.E. Control of Dead-Time Processes / J.E. Normey-Rico, E.F. Camacho. – London: Springer, 2007. – (Advanced Textbooks in Control and Signal Processing). (in English).

6. Carlos D. Analysis of hybrid demand pattern on a water distribution network with transition from intermittent to continuous water supply in Riberas de Sacramento, Chihuahua / D. Carlos, G. Mendoza, C.J.N.G. Carmen // Water Practice & Technology. – 2020. – Vol. 15, № 1. https://doi.org/10.2166/wpt.2020.013. (in English).
7. Intelligent system for control of water distribution networks / G. Emânuel et al // Water Science & Technology: Water Supply. – 2018. – Vol. 18, № 4. – P. 1270-1281. https://doi.org/10.2166/ws.2017.188. (in English).
8. Nadirbek Y. Development and Improvement of Systems of Automation and Management of Technological Processes and Manufactures / Y. Nadirbek, A. Farukh, E. Farkhod // Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems. – 2017. – Vol. 11, № 3. (in English).
9. Smart two-tank water quality and level detection system via IoT / C.O. Samuel et al // Heliyon. – 2021. – Vol. 7. – Article e07651. (in English).
10. Kalandarov P.I. Avtomatizatsiya sistem vodosnabzheniya i vodootvedeniya / P.I. Kalandarov, S.M. Logunova, S.M. Andreev // Matematicheskoe i programmnoe obespechenie sistem v promyshlennoi i sotsial'noi sferakh. – 2023. – T. 11, № 2. – S. 31-35. (In Russian).
11. Research and Design of a Water Supply Dispatching System in a Certain Area Based on Big Data Technology / Zh. L. De et al // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2020. – Vol. 474, № 6. – Art. 062005. https://doi.org/10.1088/1755-1315/474/6/062005. (in English).
12. Eswaran P. Conceptual Design and Development of Water Metering System for Multiple Family Residential Buildings / P. Eswaran, A. Kumar // International Journal of Advanced Computer Research. – 2012. – Vol. 2, № 4(6). – P. 501-505. (in English).
13. Ernest A.E. Improving equity in intermittent water supply systems / A.E. Ernest, M. Fayyaz, B. Josef // AQUA – Water Infrastructure, Ecosystems and Society. – 2013. https://doi.org/10.2166/aqua.2013.065. (in English).
14. Suresh B.Ch. Efficient Design and Deployment of Aqua Monitoring Systems Using WSNs and Correlation Analysis / B.Ch. Suresh, E.R. Sreenivasa, D.L. Rajya // International Journal of Computers Communications & Control. – 2015. – Vol. 10, № 4. – P. 471-479. (in English).
15. Automatic Water Distribution System using PLC / S. Rote et al // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). – 2017. – Vol. 6, Iss. 4. – P. 535-540. https://doi.org/10.17577/IJERTV6IS040435. (in English).
16. Doan P. Performance Evaluation of River Water Quality Monitoring Using LoRa Connectivity with Fuzzy Algorithm / P. Doan, J. Nguyen, A. Ibnu // International Journal of Computers Communications & Control. – 2021. – Vol. 16, № 4. – Art. 4226. https://doi.org/10.15837/ijccc.2021.4.4226. (in English).
17. Girutskii I.I. Mikroprotsessornaya tekhnika sistem avtomatizatsii. Laboratornyi praktikum: uchebno-metodicheskoe posobie / I.I. Girutskii, A.G. Sen'kov. – Minsk: BGATU, 2017. – 136 s. (In Russian).
18. Seti vodosnabzheniya Respubliki Kazakhstan [Ehlektronnyi resurs]. – Rezhim dostupa: https://data.egov.kz/ (data obrashcheniya: 02.04.2026). (In Russian).

А. Асет[1], Е.А. Оспанов[2]*, А.М. Ахметова[1], Н.С. Сарсенбаев[3], А.А. Бейсембаев[3]
[1]Казахский национальный университет имени аль-Фараби,
050040, Республика Казахстан, г. Алматы, проспект Аль-Фараби, 71
[2]Шәкәрім университет, 071410, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А
[3]Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. Сатпаева,
050040, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22В
*e-mail: y.ospanov@shakarim.kz

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ И ВЫСОКОНАДЁЖНЫХ РАСПРЕДЕЛЁННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ И ДИСПЕТЧЕРИЗАЦИИ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Моделирование распределённых систем для автоматизации и диспетчеризации водоснабжения направлено на решение актуальной проблемы дефицита воды, своевременное предотвращение аварийных ситуаций, а также их предварительное прогнозирование и снижение нагрузки на диспетчера за счёт применения современных датчиков и цифровых устройств.

Цель данной работы – предварительно проверить, как будет функционировать система до её реального внедрения, выполнить её оптимизацию и снизить риски.

В научной статье рассматривается коэффициент усиления для давления воды с использованием колебательного звена и апериодического звена первого порядка, а также проводится сравнительный анализ по параметрам k = 5 и T. Кроме того, применены методы имитационного моделирования и параметрического анализа, а динамические характеристики системы оценены с использованием метода интерполяции на основе передаточной функции.

Результаты исследования позволяют предложить инженерные решения для стабилизации давления воды, повышения надёжности системы, снижения гидравлических потерь на верхних этажах и эффективного управления системой водоснабжения. Предложенный подход создаёт основу для экономии ресурсов, снижения риска аварий, повышения качества управления и увеличения эффективности автоматизации процессов распределения воды в многоэтажных жилых комплексах. Данный метод также помогает точно подобрать параметры системы до её практического внедрения.

Ключевые слова: *программируемый логический контроллер, микроконтроллер, датчик давления, ПИ-регулятор, имитационное моделирование.*

A. Asset[1], Y.A. Ospanov[2]*, A.M. Akhmetova[1], N.S. Sarsenbayev[3], A.A.Beisembayev[3]
[1]Al-Farabi Kazakh National University,
71 Al-Farabi Avenue, Almaty 050040, Republic of Kazakhstan
[2]Shakarim University, 20 A Glinki Street, Semey 071410, Republic of Kazakhstan
[3]Kazakh National Research Technical University named after K. Satpayev,
22V Satpayev Street, Almaty 050040, Republic of Kazakhstan
*e-mail: y.ospanov@shakarim.kz

MODELING OF HIGHLY EFFICIENT AND HIGHLY RELIABLE DISTRIBUTED SYSTEMS FOR WATER SUPPLY AUTOMATION AND DISPATCHING

Modeling distributed systems for water supply automation and dispatching is aimed at addressing the current problem of water scarcity, ensuring timely prevention of emergency situations, enabling their early prediction, and reducing dispatcher workload through the use of modern sensors and digital devices.

The purpose of this work is to preliminarily evaluate how the system will function before its actual implementation, optimize it, and reduce associated risks.

The scientific paper examines the gain coefficient for water pressure using an oscillatory element and a first-order aperiodic element, and also provides a comparative analysis for the parameters k = 5 and T. In addition, simulation modeling and parametric analysis methods were applied, and the dynamic characteristics of the system were evaluated using an interpolation method based on the transfer function.

The research results make it possible to propose engineering solutions for stabilizing water pressure, improving system reliability, reducing hydraulic losses on upper floors, and ensuring efficient control of the water supply system. The proposed approach provides a basis for saving resources, reducing accident risk, improving control quality, and increasing the efficiency of automating water distribution processes in multi-storey residential buildings. This method also helps to accurately determine system parameters prior to practical implementation.

Key words: *programmable logic controller, microcontroller, pressure sensor, PI controller, simulation modeling.*

Авторлар туралы ақпарат

Асхат Асет – докторант, аға оқытушы, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы; e-mail: asset.askhat.81@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-8842-328X.

Ербол Аманғазыұлы Оспанов* – PhD, доцент, Шәкәрім университеті, Семей; e-mail: y.ospanov@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5342-274X.

Ардақ Мергенбайқызы Ахметова – phD, доцент, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы; e-mail: ardak_66@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8360-5504.

Нұрлан Садуақасұлы Сарсенбаев – техника ғылымдарының кандидаты, доцент, Қ. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы; e-mail: n_sarsenbayev 75@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8640-7175.

Акамбай Агыбайұлы Бейсембаев – техника ғылымдарының кандидаты, доцент, Қ. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы; e-mail: akambaybeisembayev@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4763-0769.

Сведения об авторах

Асхат Асет – докторант, старший преподаватель, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы; e-mail: asset.askhat.81@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-8842-328X.

Ербол Амангазович Оспанов* – PhD, доцент, Университет Шәкәрім, Семей; e-mail: y.ospanov@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5342-274X.
Ардақ Мергенбаевна Ахметова – phD, доцент, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы;e-mail: ardak_66@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8360-5504.
Нурлан Садуакасович Сарсенбаев – кандидат технических наук, доцент, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. Сатпаева, Алматы; e-mail: n_sarsenbayev75@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8640-7175.
Акамбай Агыбайович Бейсембаев – кандидат технических наук, доцент, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. Сатпаева, Алматы; e-mail: akambaybeisembayev@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4763-0769.

Information about the authors

Askhat Asset – PhD doctoral student, Senior Lecturer, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty; e-mail: asset.askhat.81@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-8842-328X.
Yerbol Ospanov* – PhD, Associate Professor, Shakarim University, Semey; e-mail: y.ospanov@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5342-274X.
Ardak Mergenbaevna Akhmetova – PhD, Associate Professor, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty; e-mail: ardak_66@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8360-5504.
Nurlan Saduakasovich Sarsenbayev – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Kazakh National Research Technical University named after K. Satpayev, Almaty; e-mail: n_sarsenbayev75@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8640-7175.
Akambay Agybayovich Beisembaev – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Kazakh National Research Technical University named after K. Satpayev, Almaty; e-mail: akambaybeisembayev@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4763-0769.

Редакцияға енуі 06.04.2026
Өңдеуден кейін түсуі 17.08.2026
Жариялауға қабылданды 18.08.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-19

МРНТИ: 81.93.29

A.T. Kerimbayeva
Satbayev University,
050000, Republic of Kazakhstan, Almaty, 22 Satbayev St.
e-mail: aygerim744@gmail.com

MATHEMATICAL MODEL AND COMPUTATIONAL ANALYSIS OF A LIGHTWEIGHT LATTICE-BASED SIGNATURE FOR IOT DEVICES

Abstract: *This paper details a mathematical model and a performance evaluation of FALCON-M, a novel, lightweight post-quantum signature scheme specifically engineered for Internet of Things (IoT) applications. The importance of this contribution is underscored by the imperative to secure IoT devices from future quantum attacks, a challenge not adequately met by existing standards like Falcon and Dilithium, which are too demanding for resource-constrained settings owing to their use of rejection sampling and floating-point computations. Our study seeks to close the gap between theoretical post-quantum cryptographic solutions and their feasible integration into embedded systems.*

The proposed scheme is based on a lattice-based signature defined over the ring $R_q = \mathbb{Z}_q[x]/(x^n + 1)$ *with parameters* $n = 512$, $q = 12289$, $\sigma = 4.0$, $\tau = 60$. *A key feature is the complete absence of rejection sampling, which guarantees deterministic execution time and inherent resistance to timing side-channel attacks.*

Analysis reveals that the scheme achieves notably small key sizes: the public key is 928 bytes, the secret key is 256 bytes, and the signature is 973 bytes. Projections for performance on an ARM Cortex-M4 processor operating at 100 MHz indicate a signing duration of 7.4 ms. This speed is comparable to established post-quantum cryptography methods, yet it provides superior resilience against side-channel vulnerabilities.

©A.T. Kerimbayeva, 2026

The primary scientific advancement is the creation of a mathematically rigorous model that avoids the shortcomings of existing approaches. Its practical importance is demonstrated by its applicability to a broad spectrum of Internet of Things devices, including intelligent sensors, implanted medical devices, and industrial control systems.

Key words: *post-quantum cryptography, digital signature, Internet of Things, lattices, FALCON.*

1. Introduction

The accelerating development of quantum computing presents a fundamental vulnerability to current public key cryptography, including RSA and ECC. Quantum algorithms like Shor's and Grover's are capable of efficiently breaking these schemes, rendering them inadequate for enduring security. In response, the cryptographic community has devised post-quantum cryptography (PQC), culminating in NIST-standardized digital signatures: ML DSA (Dilithium), FN DSA (Falcon), and SLH DSA (SPHINCS+). However, the practical deployment of these theoretically secure algorithms on resource-limited Internet of Things (IoT) devices is problematic. Dilithium's dependence on rejection sampling leads to variable execution times, a critical issue for real-time systems and devices reliant on battery power. Falcon's reliance on a trapdoor mechanism and floating-point calculations imposes significant computational and memory burdens on typical microcontrollers. SPHINCS+ generates signatures that are orders of magnitude larger than what many IoT applications can accommodate. To mitigate these limitations, we propose FALCON M, a resource-efficient post-quantum signature scheme built upon ring lattices. This scheme removes the need for rejection sampling and trapdoor constructions, ensuring deterministic timing and constant-time operations. It exclusively utilizes integer arithmetic and is engineered to fit within the stringent memory constraints of IoT devices.

This research aims to develop a mathematical framework for FALCON M and assess its efficiency via a computational complexity examination. Our findings indicate that the system offers reduced key and signature dimensions (928 B for the public key, 256 B for the private key, and 973 B for the signature). Furthermore, by estimating cycle counts, we project an execution time of approximately 7.4 ms on a 100 MHz ARM Cortex M4 microcontroller, rendering it a practical choice for numerous Internet of Things deployments.

2. Materials and Methods

2.1. Mathematical Model

The scheme operates in the ring $R_q = \mathbb{Z}_q[x]/(x^n + 1)$ with the following parameters:

- $n = 512$ – ring dimension
- $q = 12289$ – prime modulus, satisfying $q \equiv 1(\mathrm{mod}2n)$ for NTT compatibility
- $\sigma = 4.0$ – standard deviation of the discrete Gaussian distribution $\mathcal{D}_\sigma$
- $\tau = 60$ – Hamming weight of the sparse challenge polynomial c
- $\delta = 50$ – verification bound for the infinity norm

All polynomial operations (addition, multiplication) are performed modulo q and modulo $x^{512} + 1$. Multiplication is accelerated via the Number Theoretic Transform (NTT), which has complexity $O(n \log n)$.

Key Generation (KeyGen).

The secret key consists of two small polynomials $s_1, s_2 \in \{-1,0,1\}^n$. The public key is a pair (a, t), where $a \in R_q$ is uniformly random (expanded from a 32-byte seed), and

$$t = as_1 + s_2(\mathrm{mod}q).$$

Signature Generation (Sign).

For a message m, the signature $\sigma = (z_1, z_2, c)$ is generated as:

1. Sample ephemeral noise $y_1, y_2 \leftarrow \mathcal{D}_\sigma$.
2. Compute commitment $w = ay_1 + y_2(\mathrm{mod}q)$.
3. Derive challenge $c = \mathrm{EncodeChallenge}\big(H(\mathrm{DS} \parallel m \parallel w)\big)$, where H is SHAKE-256 (512-bit output) and $\mathrm{EncodeChallenge}$ maps the hash to a sparse polynomial with exactly τ non-zero coefficients ± 1.
4. Compute responses $z_1 = y_1 + cs_1$, $z_2 = y_2 + cs_2$. The algorithm contains **no rejection sampling**; the execution path is deterministic.

Verification (Verify).

To verify a signature σ for message m:

1. Check $\| z_1 \|_\infty \leq \delta$ and $\| z_2 \|_\infty \leq \delta$.
2. Reconstruct $w' = az_1 + z_2 - ct(\mathrm{mod}q)$.

3. Compute $c' = \mathrm{EncodeChallenge}\big(H(\mathrm{DS} \parallel m \parallel w')\big)$.

4. Accept if $c' = c$ (constant-time comparison).

2.2. Performance Evaluation Methodology

To estimate performance on a representative IoT microcontroller, we use a cycle-counting **approach**. The target platform is an ARM Cortex-M4 processor running at 100 MHz, a common choice for resource-constrained devices [1]. The computational cost is measured in terms of elementary operations that can be mapped directly to CPU cycles.

We count the number of NTT butterfly operations, modular multiplications, additions/subtractions, and hash function calls required for each algorithm. The NTT length is $N_{\text{ntt}} = 1024$ (for $n = 512$). One NTT forward/inverse transform consists of $N_{\text{ntt}} \log_2 N_{\text{ntt}} = 10240$ butterflies. Each butterfly comprises:

- 1 modular multiplication
- 2 modular additions/subtractions
- 1 memory access

Efficient NTT implementations for lattice-based cryptography are well studied [11, 12].

These counts are derived from the algorithmic descriptions and include all necessary operations (NTTs for polynomials, pointwise multiplications, additions, etc.). They are independent of the specific implementation and provide a hardware-neutral measure of complexity.

2.3. Packing Schemes

All keys and signatures are stored in packed binary format to minimise memory footprint. The packing methods are as follows:

- Public key: The polynomial a is stored as a 32-byte seed. The polynomial t is encoded using 14 bits per coefficient, because its coefficients lie in the range $[0, q-1]$ with $q = 12289 < 2^{14}$.
- Secret key: The polynomials s_1, s_2 are encoded using 2 bits per coefficient, mapping the values $-1,0,1$ to 0, 1, 2 respectively.

Signature:

- The responses z_1, z_2 are encoded using 7 bits per coefficient.
- The challenge polynomial c (which has exactly $\tau = 60$ non-zero coefficients ± 1) is stored by listing the positions of its non-zero entries using 9 bits each, together with their signs using 1 bit each.

These encodings are designed to achieve compact representation while preserving the ability to efficiently unpack the data during verification.

3.1. Performance Evaluation

To estimate the computational cost on a typical IoT microcontroller, we counted the number of elementary operations required for each algorithm. The counts are based on the algorithmic descriptions and the NTT implementation details (see Section 2.2). The following assumptions, derived from previous performance analyses of lattice-based schemes [13], were made:

- NTT is implemented in-place with length $N_{\text{ntt}} = 1024$.
- One NTT butterfly consists of:
- 1 modular multiplication,
- 2 modular additions/subtractions,
- 1 assignment (or permutation).
- Polynomial multiplication via NTT requires:
- 2 forward NTTs, 1 inverse NTT → **3 transforms**,
- plus pointwise multiplication (1024 multiplications).
- Pointwise multiplication counts as 1 multiplication per coefficient.
- Polynomial addition/subtraction requires n operations.
- Gaussian sampling uses a constant-time CDT table (no loops); each sample is estimated as 2–3 arithmetic operations plus a table lookup.
- Hashing (SHAKE-256) is counted as a single call; on an MCU this may take several thousand cycles, but for relative comparison it is treated separately.

The operation counts for KeyGen, Sign, and Verify are presented in Tables 1-3.

Table 1 –. Operation counts for KeyGen

Step	Description	Count
1	Generate a from seed	1 SHAKE-256 call
2	Generate s_1, s_2	2×512 random numbers (~1024 ops)
3	Multiply $a \cdot s_1$ via NTT	3×10240 butterflies + 1024 pointwise multiplications
4	Add $as_1 + s_2$	512 additions
Total NTT butterflies		30 720
Total modular multiplications		~31 744
Total additions/subtractions		~31 232

Table 2 – Operation counts for Sign

Step	Description	Count
1	Generate y_1, y_2 (Gaussian)	2×512 CDT lookups
2	NTT for y_1, y_2	$2 \times 10\,240$ butterflies
3	Pointwise multiplication $a \cdot y_1$	1 024 multiplications
4	Add $ay_1 + y_2$ (NTT domain)	1 024 additions
5	INTT for w	10 240 butterflies
6	Hashing (SHAKE-256)	1 call
7	NTT for c	10 240 butterflies
8	NTT for s_1, s_2	(cached) 0
9	Pointwise multiplications $c \cdot s_1, c \cdot s_2$	$2 \times 1\,024$ multiplications
10	INTT for z_1, z_2	$2 \times 10\,240$ butterflies
11	Symmetric reduction	2×512 comparisons/subtractions
12	Packing	bit operations (negligible)
Total NTT butterflies		61 440
Total modular multiplications		~64 512
Total additions/subtractions		~63 488

Table 3 – Operation counts for Verify

Step	Description	Count
1	Check $\| z_1 \|_\infty, \| z_2 \|_\infty \leq \delta$	2×512 comparisons
2	NTT for z_1, z_2	$2 \times 10\,240$ butterflies
3	Pointwise multiplication $a \cdot z_1$	1 024 multiplications
4	NTT for c	10 240 butterflies
5	NTT for t	10 240 butterflies
6	Pointwise multiplication $c \cdot t$	1 024 multiplications
7	Add/subtract for w'	$2 \times 1\,024$ operations
8	INTT for w'	10 240 butterflies
9	Hashing (SHAKE-256)	1 call
10	NTT for c' (implicit in encode_challenge)	10 240 butterflies
11	Constant-time comparison of c and c'	512 comparisons
Total NTT butterflies		61 440
Total modular multiplications		~2 048
Total comparisons/additions		~3 584

Assuming an optimised NTT implementation on an ARM Cortex-M4 microcontroller running at 100 MHz, where each butterfly takes approximately 12 cycles [12], the signing time is estimated as:

$$T_{\text{sign}} = \frac{61\,440 \times 12}{100 \times 10^6} \approx 7.4 \text{ ms.}$$

Verification requires a similar number of NTT butterflies and thus is expected to take about the same time. These estimates indicate that FALCON-M can perform a full signing operation within a few milliseconds, which is suitable for a wide range of IoT applications.

3.2. Summary of Operation Counts

For a quick overview, Table 4 summarises the total number of elementary operations for each algorithm.

Table 4 – Summary of operation counts for FALCON-M

Algorithm	NTT butterflies	Modular multiplications	Additions/comparisons	SHAKE-256 calls
KeyGen	30 720	~31 744	~31 232	1
Sign	61 440	~64 512	~63 488	1
Verify	61 440	~2 048	~3 584	1

The data show that the signing and verification operations are dominated by NTT butterflies (over 60 000 each), while KeyGen requires about half that number. Modular multiplications follow a similar pattern. The SHAKE-256 hash function is called once per operation and does not constitute a bottleneck.

Based on these figures and assuming an optimised NTT implementation on an ARM Cortex-M4 at 100 MHz (12 cycles per butterfly), the signing time is estimated to be approximately 7.4 ms. Verification is expected to take a comparable amount of time. These results confirm that FALCON-M is suitable for resource-constrained IoT devices.

4. Discussion

The proposed FALCON-M signature scheme is designed for resource-constrained IoT devices. The operation counts show that signing requires about 61 440 NTT butterflies, which translates to an estimated 7.4 ms on a 100 MHz ARM Cortex-M4 (assuming 12 cycles per butterfly [14]). This performance is adequate for typical IoT scenarios such as sensor authentication and firmware updates.

The deterministic nature of FALCON-M, achieved by eliminating rejection sampling, guarantees predictable execution time. This advancement streamlines the process of predicting energy usage for battery-operated gadgets and eliminates a significant vulnerability related to timing information [6, 7]. Furthermore, the exclusion of a trapdoor feature and the avoidance of floating-point calculations contribute to a less complex design for microcontrollers [8,11].

The performance estimates are derived from operation counts and assumed cycle counts; actual hardware measurements may differ.

Future directions include an optimised C++ implementation on ARM Cortex-M and RISC-V platforms, integration into real IoT protocols, and a formal security proof in the QROM model.

5. Conclusions

The presented work introduces FALCON M, a lightweight post-quantum signature scheme specifically tailored for IoT devices. The scheme's design obviates the necessity for rejection sampling and trapdoor mechanisms, thereby ensuring deterministic execution and a simplified integer-only implementation. Performance estimations, derived from operation counts, project a signing time of approximately 7.4 ms on a 100 MHz ARM Cortex M4 microcontroller. These outcomes validate FALCON M's appropriateness for a wide array of IoT applications.

References

1. Atzori L. The Internet of Things: A Survey / L. Atzori, A. Iera, G. Morabito // Computer Networks. – 2010. – Vol. 54, № 15. – P. 2787-2805. https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010.

2. Shor P.W. Polynomial-time algorithms for prime factorization and discrete logarithms on a quantum computer / P.W. Shor // SIAM Journal on Computing. – 1997. – Vol. 26, № 5. – P. 1484-1509. https://doi.org/10.1137/S0097539795293172.

3. National Institute of Standards and Technology. FIPS 204: Module-Lattice-Based Digital Signature Standard (ML-DSA) [Electronic resource]. – Gaithersburg: NIST, 2024. https://doi.org/10.6028/NIST.FIPS.204 (accessed: 11.03.2026).

4. National Institute of Standards and Technology. FIPS 206: NTRU-Based Digital Signature Standard (FN-DSA) (Draft) [Electronic resource]. – Gaithersburg: NIST, 2024.
5. Lyubashevsky V. Fiat-Shamir with Aborts: Applications to Lattice and Factoring-Based Signatures / V. Lyubashevsky // Advances in Cryptology – ASIACRYPT 2009: Proc. Intern. Conf. – Berlin: Springer, 2009. – P. 598-616. https://doi.org/10.1007/978-3-642-10366-7_35.
6. CRYSTALS-Dilithium: Digital Signatures from Module Lattices / L. Ducas et al // IACR Transactions on Cryptographic Hardware and Embedded Systems. – 2018. – Vol. 2018, № 1. – P. 238-268. https://doi.org/10.13154/tches.v2018.i1.238-268.
7. FALCON / T. Prest et al. – Gaithersburg: NIST, 2020. – Technical Report.
8. Oder T. Implementing the Candidate FALCON Signature Scheme on Embedded Devices / T. Oder, T. Güneysu // 2019 IEEE International Symposium on Hardware Oriented Security and Trust (HOST): Proc. Intern. Conf. – Piscataway: IEEE, 2019. – P. 272-281.
9. Lyubashevsky V. On Ideal Lattices and Learning with Errors over Rings / V. Lyubashevsky, C. Peikert, O. Regev // Journal of the ACM. – 2013. – Vol. 60, № 6. – P. 1-35. https://doi.org/10.1145/2535925.
10. The SPHINCS+ Signature Framework / D.J. Bernstein et al // Proceedings of the 2019 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security (CCS '19): Proc. Intern. Conf. – New York: ACM, 2019. – P. 2129-2146. https://doi.org/10.1145/3319535.3363229.
11. Micciancio D. Trapdoors for Lattices: Simpler, Tighter, Faster, Smaller / D. Micciancio, C. Peikert // Advances in Cryptology – EUROCRYPT 2012: Proc. Intern. Conf. – Berlin: Springer, 2012. – P. 700-718. https://doi.org/10.1007/978-3-642-29011-4_41.
12. Longa P. Speeding up the Number Theoretic Transform for Faster Ideal Lattice-Based Cryptography / P. Longa, M. Naehrig // Cryptology and Network Security – CANS 2016: Proc. Intern. Conf. – Cham: Springer, 2016. – P. 124-139. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48965-0_8.
13. Testing and Benchmarking NIST PQC on ARM Cortex-M4 / M.J. Kannwischer et al // IACR Cryptology ePrint Archive. – 2019. – № 844. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:201059112.
14. ARM Ltd. ARM Cortex-M4 Processor Technical Reference Manual. – Cambridge: ARM, 2020.

Acknowledgement

The authors express their gratitude to the Vice-Rector for Science and Corporate Development of Satbayev University, Yerzhan Kuldeyev, for the support in securing the funding for this research.

Ә.Т. Керімбаева
Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті,
050000 Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Сәтбаев көш.22.
e-mail: aygerim744@gmail.com

IOT ҚҰРЫЛҒЫЛАРЫНА АРНАЛҒАН ЖЕҢІЛ ТОРЛЫ (LATTICE-BASED) ҚОЛТАҢБАНЫҢ МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛІ ЖӘНЕ ЕСЕПТЕУ ТАЛДАУЫ

Бұл мақалада Интернет заттары (IoT) құрылғыларына арналған жеңіл пост-кванттық қолтаңба схемасы FALCON-M математикалық моделі және өнімділігін бағалау ұсынылған. Өзектілігі IoT құрылғыларын кванттық шабуылдардан қорғау қажеттілігімен түсіндіріледі, ал қолданыстағы стандарттар (Falcon, Dilithium) rejection sampling және өзгермелі нүктелі амалдардың кесірінен ресурсы шектеулі орталарға жарамсыз. Зерттеу теориялық пост-кванттық криптография мен ендірілген платформаларда практикалық орналастырарасындағы алшақтықты жоюға бағытталған. Ұсынылып отырған схема параметрлері n=512, q=12289, $\sigma = 4.0, \tau = 60$ болатын $R_q = \mathbb{Z}_q[x]/(x^n + 1)$ сақинасында анықталған торға негізделген қолтаңбаға негізделген. Басты ерекшелігі – rejection sampling-нің толық болмауы, бұл детерминирленген орындалу уақытын және уақытша жанама арналар шабуылдарына төзімділікті қамтамасыз етеді.

Нәтижелер ықшам өлшемдерді көрсетеді: ашық кілт 928 байт, жабық кілт 256 байт, қолтаңба 973 байт. 100 МГц жиіліктегі ARM Cortex-M4 үшін бағалау қолтаңба уақыты 7.4 мс екенін көрсетеді, бұл қолданыстағы пост-кванттық схемалармен бәсекеге қабілетті, сонымен қатар жанама арналарға төзімділігі жағынан артықшылыққа ие. Ғылыми үлес – қолданыстағы схемалардың кемшіліктерінен ада математикалық негізделген модельді әзірлеу; практикалық

маңыздылығы – схеманың ақылды сенсорлар, медициналық имплланттар және өнеркәсіптік контроллерлерді қоса алғанда, IoT құрылғыларының кең ауқымына жарамдылығын көрсету.

Түйін сөздер: *постквантты криптография, цифрлық қолтаңба, заттар интернеті, торлар, FALCON.*

А.Т. Керимбаева
Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатбаева,
050000 Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22
e-mail: aygerim744@gmail.com

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОБЛЕГЧЕННОЙ ПОДПИСИ НА РЕШЕТКАХ ДЛЯ УСТРОЙСТВ IOT

В данной статье представлены математическая модель и оценка производительности легковесной пост-квантовой схемы подписи FALCON-M, предназначенной для устройств интернета вещей (IoT). Актуальность обусловлена необходимостью защиты IoT-устройств от квантовых атак, в то время как существующие стандарты (Falcon, Dilithium) непригодны для ресурсно-ограниченных сред из-за использования rejection sampling и операций с плавающей точкой. Исследование направлено на преодоление разрыва между теоретической пост-квантовой криптографией и практическим развёртыванием на встраиваемых платформах.

Предлагаемая схема основана на решёточной подписи, определённой над кольцом $R_q = \mathbb{Z}_q[x]/(x^n + 1)$ *с параметрами* $n = 512$, $q = 12289$, $\sigma = 4.0$, $\tau = 60$. *Ключевая особенность – полное отсутствие rejection sampling, что гарантирует детерминированное время выполнения и устойчивость к атакам по времени выполнения.*

Результаты показывают компактные размеры: открытый ключ 928 байт, закрытый ключ 256 байт, подпись 973 байта. Оценочное время подписи для ARM Cortex-M4 на частоте 100 МГц составляет 7.4 мс, что конкурентоспособно с существующими пост-квантовыми схемами и превосходит их по устойчивости к атакам по побочным каналам. Научный вклад заключается в разработке математически обоснованной модели, свободной от недостатков существующих схем; практическая значимость состоит в демонстрации пригодности схемы для широкого круга IoT-устройств, включая интеллектуальные датчики, медицинские импланты и промышленные контроллеры.

Ключевые слова: *постквантовая криптография, цифровая подпись, интернет вещей, решетки, FALCON.*

Сведения об авторе

Айгерим Танирбергеновна Керимбаева – магистр, кафедра кибербезопасности, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатбаева, Казахстан; e-mail: aygerim744@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5762-8400.

Автор туралы мәліметтер

Әйгерім Тәңірбергенқызы Керімбаева – магистр, Киберқауіпсіздік кафедрасы, Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Қазақстан; e-mail: aygerim744@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5762-8400.

Information about the authors

Aygerim Kerimbayeva – Master of Science, Department of Cybersecurity, Satbayev University, Kazakhstan; e-mail: aygerim744@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5762-8400.

Received 01.06.2026
Revised 01.07.2026
Accepted 24.08.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-20

ҒТАХР: 20.23.27

BY 4.0

Check for updates

Б.С. Смақанов[1], И.М. Увалиева[1*], А.К. Шайханова[2]
[1]Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті,
Қазақстан Республикасы, Өскемен қ, Серикбаева 19
[2]Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
Қазақстан Республикасы, Астана, Сатбаева 2
*e-mail: s.bauyrzhan.10@gmail.com

ЖҮРГІЗУШІ ЖАҒДАЙЫН БАҚЫЛАУДЫҢ КЛАССИКАЛЫҚ КОМПЬЮТЕРЛІК КӨРУ ӘДІСТЕРІНЕ НЕГІЗДЕЛГЕН МОДЕЛІН ӘЗІРЛЕУ

Аңдатпа: *Бұл мақалада нақты уақыт режимінде жүргізушінің жағдайын бақылауға арналған классикалық компьютерлік көру әдістеріне негізделген интеллектуалды мониторинг жүйесінің моделі ұсынылған. Зерттеудің мақсаты жүргізушінің шаршауы, ұйқышылдығы және назардың төмендеуі сияқты қауіпті күйлерді бет-әлпет ерекшеліктерін, көздің күйін және бастың кеңістіктегі орналасуын талдау арқылы автоматты түрде анықтайтын тиімді алгоритм әзірлеу болып табылады. Ұсынылған модельде бет пен көзді анықтау үшін Haar Cascade классификаторлары, бет ерекшеліктерінің негізгі нүктелерін анықтау үшін Dlib кітапханасының алгоритмдері, ал көздің ашық немесе жабық күйін бағалау үшін Eye Aspect Ratio (EAR) көрсеткіші пайдаланылды. Сонымен қатар жүргізушінің басының еңкеюі мен бұрылу бұрышы талданып, назардың төмендеу белгілері бағаланды. Алгоритм OpenCV кітапханасы мен Python бағдарламалау тілі негізінде жүзеге асырылды және Android платформасындағы мобильді құрылғыда сынақтан өткізілді. Эксперименттік зерттеулер барысында жалпы ұзақтығы шамамен үш сағат болатын бейнематериалдар өңделіп, жүйенің нақты уақыт режимінде орташа 28 FPS жылдамдықпен жұмыс істейтіні анықталды. Алынған нәтижелер классикалық компьютерлік көру әдістерінің жүргізушінің шаршау белгілерін нақты уақыт режимінде анықтауға мүмкіндік беретінін, есептеу ресурстарын аз пайдаланатынын және мобильді құрылғыларда тиімді қолдануға болатындығын көрсетті. Ұсынылған модель интеллектуалды көлік жүйелерінде, жүргізушіні қолдау жүйелерінде және жол қозғалысы қауіпсіздігін арттыруға бағытталған бағдарламалық кешендерде қолдануға перспективалы болып табылады.*

Түйін сөздер: *жүргізуші жағдайын мониторингтеу, компьютерлік көру, Haar Cascade, Dlib, Eye Aspect Ratio, шаршауды анықтау, OpenCV.*

Кіріспе

Жол-көлік оқиғалары қазіргі уақытта адам өмірі мен денсаулығына қауіп төндіретін негізгі факторлардың бірі болып табылады. Дүниежүзілік денсаулық сақтау ұйымының мәліметтері бойынша, жол-көлік апаттарының едәуір бөлігі жүргізушінің шаршауы, ұйқышылдығы және назардың төмендеуі сияқты адами факторлармен байланысты. Ұзақ уақыт көлік жүргізу барысында жүргізушінің реакция жылдамдығы төмендеп, қоршаған ортадағы өзгерістерді қабылдау және шешім қабылдау қабілеті әлсірейді. Бұл өз кезегінде апат қаупінің артуына алып келеді.

Соңғы жылдары жүргізушінің жағдайын автоматты түрде бақылауға арналған интеллектуалды жүйелерді әзірлеуге ерекше көңіл бөлінуде. Мұндай жүйелердің негізгі мақсаты – жүргізушінің шаршау белгілерін ерте кезеңде анықтап, қауіпті жағдайлардың алдын алу. Қазіргі уақытта жүргізушінің жағдайын бағалау үшін әртүрлі тәсілдер қолданылады, олардың ішінде физиологиялық көрсеткіштерді талдау, көлік құралын басқару параметрлерін бақылау және компьютерлік көру әдістеріне негізделген тәсілдер кең таралған.

Компьютерлік көру технологиялары жүргізушінің бет-әлпетін, көз күйін, бас қалпын және басқа да мінез-құлық ерекшеліктерін нақты уақыт режимінде талдауға мүмкіндік береді [8-12]. Мұндай жүйелердің артықшылығы – арнайы датчиктерді пайдалануды қажет етпейді және қарапайым бейнекамера көмегімен жұмыс істей алады. Жүргізушінің көзінің жабылу ұзақтығы, жыпылықтау жиілігі, бастың еңкею бұрышы сияқты көрсеткіштер шаршау деңгейін бағалаудың маңызды белгілері болып табылады.

©Б.С. Смақанов, И.М. Увалиева, А.К. Шайханова, 2026

Жүргізушінің шаршауын анықтаудың классикалық әдістерінің қатарына Haar Cascade классификаторлары, Histogram of Oriented Gradients (HOG) дескрипторлары, Dlib кітапханасының бет нүктелерін анықтау алгоритмдері және Eye Aspect Ratio (EAR) көрсеткішіне негізделген тәсілдер жатады [4, 13-15]. Бұл әдістер есептеу ресурстарын аз қажет етеді, жоғары жылдамдықпен жұмыс істейді және нақты уақыт режиміндегі мониторинг жүйелерінде тиімді қолданылады.

Осыған байланысты жүргізушінің жағдайын бақылаудың классикалық компьютерлік көру әдістеріне негізделген модельдерін зерттеу және жетілдіру өзекті ғылыми және практикалық міндет болып табылады [5, 16-18].

Осы жұмыстың мақсаты – Haar Cascade, Dlib және Eye Aspect Ratio әдістерін пайдалану арқылы жүргізушінің көз күйі мен бас қалпын талдауға негізделген жүргізуші жағдайын мониторингтеу жүйесінің моделін әзірлеу және оның тиімділігін бағалау.

Зерттеудің ғылыми жаңалығы жүргізушінің жағдайын нақты уақыт режимінде бақылауға арналған классикалық компьютерлік көру әдістерін мобильді құрылғы жағдайына бейімдеп біріктіру тәсілін ұсынуда болып табылады. Ұсынылған модельде Haar Cascade классификаторлары арқылы бет пен көз аймақтарын анықтау, Dlib алгоритмдері арқылы бет ерекшеліктерінің негізгі нүктелерін локализациялау және Eye Aspect Ratio (EAR) көрсеткіші арқылы көздің жабылу күйін бағалау біртұтас өңдеу тізбегіне біріктірілді. Сонымен қатар көздің жабық күйін бір ғана кадр бойынша емес, 48 қатарынан кадр ішінде сақталуына негізделген уақыттық шешім қабылдау критерийі қолданылды. Бейнеағынды өңдеудің орташа жылдамдығы 28 FPS болған жағдайда бұл критерий шамамен 1,71 с үздіксіз көз жабылуына сәйкес келеді. Осылайша, ұсынылған модель қысқа мерзімді жыпылықтауды ұзақ көз жабылуынан ажыратуға бағытталған уақыттық критерийді және мобильді құрылғыдағы нақты уақыттағы өңдеу талабын бір жүйеде біріктіреді.

Зерттеу әдістері

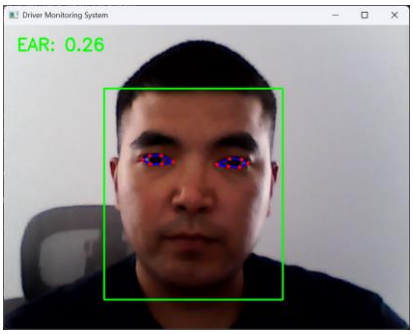
Жүргізушінің көлік құралын басқару барысында туындауы мүмкін қауіпті жағдайларды анықтау үшін оның бет-әлпет ерекшеліктері негізгі ақпарат көзі болып табылады.

Жүйенің жұмысы камера арқылы жүргізушінің бейнесін түсіруден басталады. Алдын ала өңдеу кезеңінде жүргізушінің беті мен көздері анықталады. Бейнелерді өңдеу алгоритмдері нақты уақыт режиміндегі бейнеағынды цифрлық кескіндер тізбегіне түрлендіру үшін қолданылады. Одан кейін алынған кескіндер бет пен көздердің орналасуын анықтау кезеңіне жіберіледі.

Бет пен көздерді анықтау барысында камера нақты уақыт режимінде бейнежазба жүргізеді. Бейнеағын бір-бірінен ерекшеленетін кескін кадрларының тізбегінен тұрады.

Смартфонның алдыңғы камерасынан алынған кадрлар алдын ала өңделіп, сұр түстер градациясына түрлендіріледі. Кейін Haar Cascade классификаторларының көмегімен жүргізушінің беті мен көздері анықталады. Алынған ақпарат жүргізушінің жағдайын талдау және ықтимал қауіпті белгілерді анықтау үшін пайдаланылады.

Осыдан кейін жүйе сол және оң көздерді іздеу және тану процедурасын бастайды. Егер көздер анықталмаса, жабық көздер саны ұлғайтылып, келесі кадр талдауға жіберіледі. Екі көз де анықталған жағдайда жүйе анықтаудың сәтті аяқталғанын бет пен көздердің айналасына тікбұрышты шекара сызу арқылы көрсетеді (1-сурет).



Сурет 1 – Жүргізушінің бетін және көздерін анықтау нәтижесі

Бет пен көздердің орналасуын анықтау кезеңінде жүргізушінің ұйқышылдығын анықтау жүйесі кескіндегі бет пен көздерді дәл локализациялау үшін Haar Cascade классификаторын қолданады [1]. Осы мақсатта Haar каскадына негізделген екі негізгі процесс пайдаланылады:

1. Кескіннен бетті анықтау;
2. Анықталған бет аймағынан көздерді табу.

Аталған процестер аяқталғаннан кейін кескіндер жүйенің келесі өңдеу кезеңіне жіберіледі. Бұл кезеңде көздердің ашық немесе жабық күйі анықталады. Егер жоғарғы қабақтар толық жабылып, көздің қарашығы көрінбесе, көз жабық деп есептеледі. Пайдаланушы алдын ала орнатқан шекті мәнге сәйкес, жабық көздердің үлесі белгіленген деңгейден асқан жағдайда жүйе жүргізушіге дыбыстық ескерту сигналын береді.

Егер есептелген көрсеткіш пайдаланушы орнатқан шекті мәнге тең немесе одан жоғары болса, жүйе дабыл сигналын іске қосады. Керісінше жағдайда дыбыстық ескерту өшіріледі.

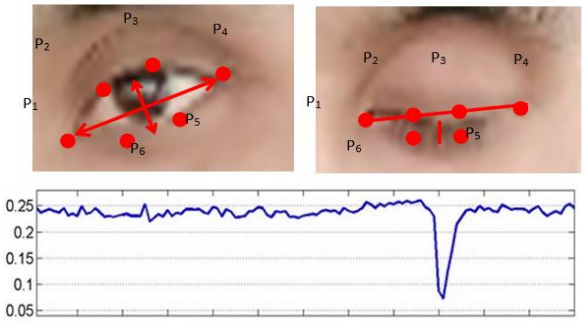
Сонымен қатар жүргізушінің әрекеттеріне қатысты статистикалық мәліметтер файлға сақталады. Жиналған деректер кейіннен машиналық оқыту әдістерін қолдану арқылы модельдің тиімділігін арттыру және жүйені жетілдіру мақсатында пайдаланылуы мүмкін.

Көз күйін анықтау үшін компьютерлік көру әдістеріне негізделген алгоритм қолданылды. Көздің негізгі нүктелері арасындағы тік және көлденең қашықтықтардың арақатынасын есептеу үшін сәйкес координаталар (x, y) бойынша Евклид қашықтығы зінде келесі өрнекпен есептеледі:

$$EAR = \frac{\| p_2 - p_6 \| + \| p_3 - p_5 \|}{2 * \| p_1 - p_4 \|}$$

мұндағы $p_1, \ldots, p_6$ – көз контурының негізгі нүктелері; $\| p_i - p_j \| - p_i$ және p_j нүктелері арасындағы Евклид қашықтығы. Мұнда алымдағы екі қашықтық көздің тік ашылуын, ал бөлімдегі қашықтық көздің көлденең өлшемін сипаттайды. Сондықтан көз ашық болған кезде EAR мәні салыстырмалы түрде тұрақты болады, ал көз жұмылған немесе жыпылықтаған кезде оның мәні төмендейді. Алынған мәндер негізінде Eye Aspect Ratio (EAR) көрсеткіші есептеліп, жүргізушінің көз күйі бағаланды.

Көз күйін бағалау үшін Eye Aspect Ratio (EAR) көрсеткіші қолданылды. EAR мәні көз ашық болған кезде салыстырмалы түрде тұрақты болып сақталады, ал жыпылықтау немесе көздің жабылуы кезінде төмендейді. Ұсынылған бағдарламалық іске асыруда көздің ашық және жабық күйлерін ажырату үшін EAR шекті мәні 0,22 ретінде қабылданды. EAR мәні 0,22-ден төмен болған жағдайда көз жабық күйде деп белгіленіп, жабық кадрлар есептегіші іске қосылады. Сондықтан EAR көрсеткішінің уақыт бойынша өзгеру динамикасы жүргізушінің көз күйін бағалауға және шаршау белгілерін анықтауға мүмкіндік береді. EAR көрсеткішінің өзгеру мысалы 2-суретте көрсетілген.



Сурет 2 – Көз нүктелерінің орналасуы және EAR көрсеткішінің өзгеру динамикасы

2-суретте көздің негізгі нүктелерінің орналасуы және бейнеағынды өңдеу барысында EAR көрсеткішінің уақыт бойынша өзгеру динамикасы көрсетілген. Графиктен көз ашық болған кезеңдерде EAR мәнінің салыстырмалы түрде тұрақты диапазонда сақталатыны байқалады. Қалыпты жыпылықтау кезінде EAR мәні қысқа уақыт аралығында төмендейді, содан кейін көз қайта ашылған кезде бастапқы деңгейіне жақын мәнге оралады. Ал көздің ұзақ уақыт жабылуы кезінде EAR көрсеткіші белгіленген шекті мәннен төмен деңгейде бірнеше қатарынан кадр бойы сақталады. Бұл жағдай қысқа мерзімді жыпылықтаудан ұзақ көз жабылуын ажыратуға мүмкіндік береді. Көз қайта ашылғаннан кейін EAR мәні қайтадан бастапқы диапазонға

жақындайды. Осылайша, EAR көрсеткішінің тек бір кадрдағы төмендеуін емес, оның уақыт бойынша сақталуын ескеру жүйенің жалған дабылдарды азайтуына мүмкіндік береді.

EAR көрсеткіші алдын ала белгіленген шекті мәннен төмен болған жағдайда жүргізушінің көзінің жабық күйде болу ұзақтығы есептеледі. Егер көздің жабық күйі қатарынан 48 кадр немесе одан көп уақыт сақталса, жүйе жүргізушіге дыбыстық ескерту сигналын іске қосады. 48 кадрлық шек жүйенің нақты жұмыс жылдамдығын ескере отырып қабылданды. Эксперимент барысында бейнеағынды өңдеудің орташа жылдамдығы 28 кадр/с құрағандықтан, 48 кадрға сәйкес келетін уақыт аралығы келесі өрнекпен анықталды:

$$T_{closed} = \frac{N_{frames}}{FPS} = \frac{48}{28} \approx 1.71\text{с}$$

Мұндағы T_{closed} – көздің үздіксіз жабық күйде болу ұзақтығы, N_{frames} – қатарынан анықталған жабық көз кадрларының саны, ал FPS – бейнеағынды өңдеудің орташа жылдамдығы. Осылайша, жүйе көздің жабық күйі шамамен 1,7 с немесе одан ұзақ уақыт сақталған жағдайда ұзақ көз жабылуын тіркейді. Қабылданған уақыттық шек қысқа мерзімді жыпылықтауды ұзақ уақытқа созылған көз жабылуынан ажыратуға және жалған дабылдардың пайда болуын азайтуға бағытталған. Бұл тәсіл кадрлар санына ғана емес, жүйенің нақты өңдеу жылдамдығына негізделген уақыттық критерийді қолдануға мүмкіндік береді.

Ұсынылған модельде Dlib кітапханасының гистограммаға бағытталған градиенттерге (Histogram of Oriented Gradients, HOG) негізделген бет детекторы және бет ерекшеліктерін анықтау предикторы қолданылды [3, 10, 13]. Бұл әдістер жүргізушінің беті мен көз аймағын дәл анықтауға және олардың күйін нақты уақыт режимінде бақылауға мүмкіндік береді.

Жүргізушінің ұйқышылдық белгілерін бағалау үшін алдымен бейнеағындағы көздің пропорция коэффициенті (EAR) талданады. Егер бұл көрсеткіш алдын ала орнатылған «жыпылықтау/көздің жабылуы» шекті мәнінен төмен түссе, есептегіш жүргізушінің көзі жабық болған тізбекті кадрлардың санын арттырады. Есептегіш мәні белгіленген максималды кадрлар санынан асқан жағдайда жүргізушінің ұйқышылдық күйге ауыса бастағаны туралы қорытынды жасауға болады.

Алдыңғы камерадан алынған кескіндер бейнеағын кадрларының кезегіне үздіксіз қосылып отырады және жаңа кадрлар түскен сайын автоматты түрде жаңартылады. Мұндай тәсіл графикалық ақпараттың жылдам әрі тиімді жаңартылуын қамтамасыз етеді.

Жүргізушінің бет ерекшеліктерін анықтау мақсатында кескіндерді цифрлық өңдеу бірнеше есептеу операцияларын қамтиды. Бұл операциялардың көпшілігі белгілі бір уақыт шығындарын талап етеді. Сондықтан өңделетін кескіннің өлшемі ұлғайған сайын есептеу жүктемесі де артады. Өз кезегінде бұл фактор алгоритмнің жұмыс өнімділігіне әсер етуі мүмкін, сондықтан нақты уақыт режиміндегі жүйелер үшін есептеу тиімділігін сақтау маңызды болып табылады.

Жүргізушінің бет ерекшеліктерін анықтау нәтижесінде алынған негізгі нүктелер бет кескініне қабаттастырылып көрсетілді. Бет нүктелерінің орналасуын визуализациялау нәтижесі 3-суретте берілген.



Сурет 3 – Бет ерекшеліктерінің негізгі нүктелерін визуализациялау

Кадрлар жиілігін (FPS) арттыру мақсатында кескіндерді өңдеудің бастапқы кезеңінен бастап әртүрлі оңтайландыру әдістері қолданылды. Бұл кезеңде кескіннің ажыратымдылығы пропорционалды түрде кішірейтіліп, кейін барлық пиксельдер сұр түстер градациясына түрлендіріледі. Түрлі-түсті кескіндерді сұр түске ауыстыру үшін әрбір пиксельге келесі формула қолданылады: Y = 0.299R+0.587G+0.114B

Мұндағы R, G және B – сәйкесінше қызыл, жасыл және көк түстік арналардың мәндері, ал Y – сұр түстің қарқындылығы. Осы түрлендіру нәтижесінде өңдеу уақыты қысқарып, жүйенің жұмыс өнімділігі артады.

Одан кейін алдыңғы камерадан алынған кескіннің бағдарын түзету үшін нормализация процедурасы орындалады. Әрбір кадрда жүргізушінің бет ерекшеліктері талданып, ықтимал қауіпті жағдайлар анықталады.

OpenCV және Dlib кітапханаларының құралдарын, сондай-ақ компьютерлік көру алгоритмдерін пайдалану арқылы жүйе жүргізушінің бет ерекшеліктерін анықтап, оларды үздіксіз бақылауды жүзеге асырады. Бұл ретте көздің күйі, бастың бұрылу бұрышы мен еңкею дәрежесі сияқты параметрлер алдын ала оқытылған классификаторлар мен HOG (Histogram of Oriented Gradients) дескрипторлары негізінде бағаланады [4].

Жүргізушінің бетіндегі негізгі нүктелердің координаталарын есептеу арқылы бастың кеңістіктегі орналасуын, сондай-ақ оның алға немесе артқа еңкею бұрышын және солға немесе оңға бұрылу бағытын анықтауға болады. Бұл процедура екі өлшемді антропометриялық деректер негізінде құрылған адамның үш өлшемді бас моделін талдау арқылы жүзеге асырылады.

Нәтижелер және талқылау

Эксперименттік зерттеулер Xiaomi Redmi Note 9 Pro (6 ГБ RAM, Snapdragon 720G процессоры) смартфонында жүргізілді. Жүргізуші жағдайын мониторингтеу жүйесін бағалау үшін жалпы ұзақтығы шамамен 3 сағат болатын 12 бейнежазбадан тұратын деректер жиынтығы пайдаланылды. Бейнематериалдардан шамамен 18 000 кадр алынды. Олардың 12 000-ы алгоритм параметрлерін баптау және шекті мәндерді анықтау үшін, ал 6 000-ы жүйенің эксперименттік жұмысын бағалау үшін пайдаланылды.

Экспериментке 7 ерікті қатысушы қатысты (5 ер адам және 2 әйел). Қатысушылардың жасы 21-46 жас аралығын қамтыды. Үш қатысушы көзілдірік пайдаланған. Бейнежазбалар табиғи күндізгі жарықта және төмен жарықтандыру жағдайларында түсірілді. Сонымен қатар жүргізуші басының әртүрлі бұрылу бұрыштары және беттің ішінара жабылу жағдайлары қарастырылды.

Ұсынылған жүйенің жұмыс өнімділігін бағалау мақсатында кадрларды өңдеу жылдамдығы өлшенді. Зерттеу нәтижелері жүйенің орташа есеппен 28 FPS жылдамдықпен жұмыс істейтінін көрсетті. Бұл көрсеткіш ұсынылған модельдің нақты уақыт режимінде жүргізушінің жағдайын бақылау міндеттерін орындауға жарамды екенін дәлелдейді. Ұсынылған жүйенің нақты уақыт режиміндегі жұмыс өнімділігін сандық бағалау үшін бейнеағынды өңдеу жылдамдығы өлшенді. Эксперимент нәтижесінде жүйенің орташа өңдеу жылдамдығы 28 кадр/с құрады. Бір кадрды өңдеуге жұмсалатын орташа уақыт келесі өрнек арқылы анықталды:

$$T_{frame} = \frac{1}{FPS} = \frac{1}{28} \approx 0.0357 \text{ с} = 35.7 \text{ мс}$$

Мұндағы T_{frame}– бір кадрды өңдеудің орташа уақыты, ал FPS – бейнеағынды өңдеудің орташа жылдамдығы. Алынған нәтиже жүйенің бір кадрды орта есеппен 35,7 мс ішінде өңдейтінін және бейеағынды нақты уақыт режимінде үздіксіз талдауға мүмкіндік беретінін көрсетеді. Осылайша, ұсынылған модельдің нақты уақыттағы жұмыс өнімділігі эксперименттік түрде 28 FPS деңгейінде бағаланды (1-кесте). Сонымен қатар, EAR әдісінің классификациялық дәлдігін бағалау үшін әрбір тестілік кадр бойынша тәуелсіз эталондық разметка қалыптастырылмаған. Осыған байланысты Accuracy, Precision, Recall және F1-score, сондай-ақ False Positive және False Negative көрсеткіштерін статистикалық тұрғыдан негізделген түрде есептеу мүмкін болмады. Сондықтан бұл жұмыста жүйенің тиімділігі нақты уақыттағы өңдеу жылдамдығы, EAR көрсеткішінің уақыттық динамикасы және көздің ұзақ уақыт жабылуын анықтау мүмкіндігі негізінде бағаланды. Классификациялық метрикаларды толық бағалау болашақ зерттеулерде эталондық кадрлық разметкасы бар кеңейтілген тестілік деректер жиынтығын пайдалану арқылы жүргізілетін болады.

Алынған нәтижелер классикалық компьютерлік көру әдістеріне негізделген модельдің мобильді құрылғыларда тиімді жұмыс істейтінін көрсетті. Haar Cascade, Dlib және EAR көрсеткіштерін біріктіріп пайдалану жүргізушінің көз күйін, бет ерекшеліктерін және бас қалпын нақты уақыт режимінде бақылауға мүмкіндік береді. Жүйенің негізгі артықшылығы есептеу ресурстарын аз тұтынуы және арнайы аппараттық жабдықты қажет етпеуі болып табылады.

Кесте 1 – Эксперименттік деректер жиынтығының сипаттамасы

Параметр	Мәні
Бейнежазбалар саны	12
Жалпы ұзақтығы	≈3 сағат
Жалпы кадр саны	≈18 000
Параметрлерді баптау кадрлары	12 000
Тестілеу кадрлары	6 000
Қатысушылар саны	7
Жас аралығы	21-46 жас
Көзілдірік пайдаланушылар	3
Орташа өңдеу жылдамдығы	28 FPS

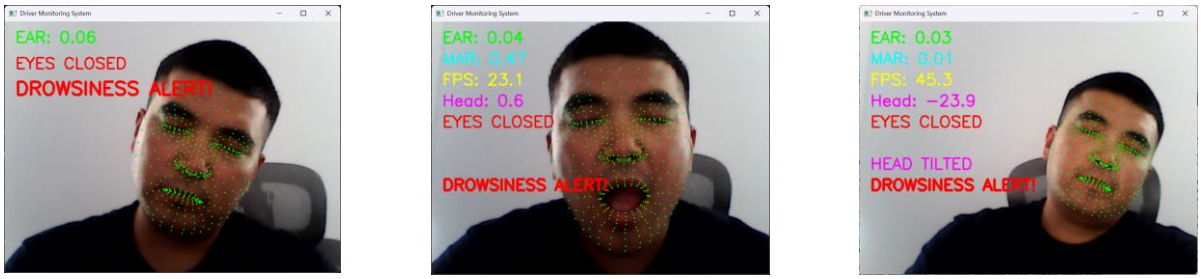
Жүргізушінің бет ерекшеліктерін, көз күйін және бас қалпын талдау нәтижесінде жүйе қауіпті жағдайларды анықтауға мүмкіндік береді. Алынған көрсеткіштер жүргізушінің шаршау деңгейін, назардың төмендеуін және ұйқышылдық белгілерін бағалау үшін пайдаланылды. Эксперимент барысында көздің ұзақ уақыт жабылуы, жыпылықтау жиілігінің өзгеруі және бастың еңкею бұрышы жүргізушінің шаршауының негізгі белгілері ретінде қарастырылды.

Анықталған көрсеткіштер жүргізушінің шаршауы, назардың төмендеуі және ұйқышылдық сияқты қауіпті жағдайларды айқындауға мүмкіндік береді. Мұндай күйлер көлік құралын басқару қауіпсіздігіне теріс әсер етіп, жол-көлік оқиғаларының туындау ықтималдығын арттыруы мүмкін. Ұсынылған модель арқылы анықталатын негізгі көрсеткіштер мен олардың шекті мәндері 2-кестеде көрсетілген.

Кесте 2 – Жүргізуші күйін анықтау нәтижелері

Анықталатын белгі	Бақылау параметрі	Шекті мән	Нәтиже
Ұйқышылдық	EAR	EAR < 0,22	Анықталды
Ұзақ көз жабылуы	Кадрлар саны	48 кадр	Анықталды
Бас еңкеюі	Head angle	|angle| >20°	Анықталды
Есінеу	Ауыз ашылуы	≥ 2.5 с	Анықталды
Ауыздың кең ашылуы	MAR	MAR > 0,60	Анықталды
Нақты уақыттағы жұмыс	FPS	≥25 FPS	28 кадр/с

Жүргізушінің ұйқышылдық белгілерін анықтау нәтижесі 5-суретте көрсетілген. Суреттен 4 жүргізушінің көздерінің ұзақ уақыт жабық болуы және бастың еңкеюі байқалады, бұл оның шаршау күйіне ауыса бастағанын көрсетеді.



Сурет 4 – Жүргізушінің ұйқышылдық күйін анықтау нәтижесі

Эксперименттік зерттеулер барысында EAR көрсеткіші жүргізушінің көзінің ашық және жабық күйін тиімді ажыратқаны анықталды. Көздің жабылу ұзақтығы артқан сайын EAR мәні белгіленген шекті деңгейден төмендеп, жүйе жүргізушінің шаршау жағдайын тіркейді. Бұл тәсіл жалған анықтаулар санын азайтып, жүйенің сенімділігін арттыруға мүмкіндік береді.

Жүргізушінің бет ерекшеліктерін анықтау үшін қолданылған Haar Cascade және Dlib алгоритмдері нақты уақыт режимінде тұрақты жұмыс көрсетті. Бет аймағы мен көз координаттары дұрыс анықталған жағдайда жүйе көздің ашық және жабық күйін тұрақты түрде ажыратып, шаршау мен ұйқышылдықтың ықтимал белгілерін анықтауға мүмкіндік береді. Жүйенің классификациялық дәлдігі арнайы эталондық белгілеу негізінде сандық түрде бағаланбағандықтан, алынған нәтижелерді «жоғары дәлдік» ретінде сипаттау орнына нақты

уақыттағы жұмыс өнімділігі және көз күйінің уақыттық динамикасын анықтау қабілеті негізге алынды. Сонымен қатар бет нүктелерін бақылау жүргізушінің бас қалпының өзгерістерін бақылауға мүмкіндік береді [6, 11, 14].

Ұсынылған әдістің шектеулері. Ұсынылған модельдің жұмыс нәтижелері қоршаған орта жағдайлары мен бейнекамераның орналасуына тәуелді болуы мүмкін. Атап айтқанда, төмен жарықтандыру, беттің ішінара көлеңкеленуі, көзілдіріктің болуы, жүргізушінің бетінің камерадан шамадан тыс бұрылуы немесе бетінің ішінара жабылуы бет нүктелерін анықтау және EAR көрсеткішін есептеу тұрақтылығына әсер етуі мүмкін. Сонымен қатар, камераның орналасуы мен көру бұрышы өзгерген жағдайда бас қалпын бағалау нәтижелерінде ауытқулар пайда болуы ықтимал. Ұсынылған модель классикалық компьютерлік көру әдістеріне негізделгендіктен, күрделі сыртқы жағдайларда оның тұрақтылығын арттыру үшін қосымша бейімдеу және кеңейтілген эксперименттік тексеру қажет. Болашақ зерттеулерде әртүрлі жарықтандыру деңгейлері, камераның орналасуы және жүргізушінің бет қалпы бойынша кеңейтілген деректер жиынтығын пайдалану жоспарланады.

Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, бейнеокулография (eye-tracking) әдістерін қолдану жүргізушінің көз қозғалыстарын бақылаудың тиімді тәсілі болып табылады [7]. Көз қозғалыстары мен жыпылықтау жиілігін талдау жүргізушінің назар деңгейін бағалауға және қауіпті жағдайларды ерте кезеңде анықтауға мүмкіндік береді. Алынған нәтижелер классикалық компьютерлік көру әдістерінің жүргізуші жағдайын мониторингтеу міндеттерін шешуде тиімді екенін көрсетті. Haar Cascade, Dlib және EAR көрсеткіштерін біріктіріп қолдану нақты уақыт режимінде жұмыс істейтін, есептеу ресурстарын аз қажет ететін және мобильді құрылғыларда іске асыруға болатын жүргізуші мониторингі жүйесін құруға мүмкіндік береді.

Жалпы алғанда, жүргізілген зерттеу нәтижелері ұсынылған әдістің жүргізушінің шаршау белгілерін анықтауда практикалық тұрғыдан тиімді екенін және оны интеллектуалды көлік жүйелерінде қолдануға болатынын дәлелдейді.

Қорытынды

Осы жұмыста жүргізушінің жағдайын нақты уақыт режимінде бақылауға арналған классикалық компьютерлік көру әдістеріне негізделген мониторинг жүйесінің моделі ұсынылды. Жүйені әзірлеу барысында жүргізушінің бет-әлпетін, көз күйін және бас қалпын анықтауға мүмкіндік беретін Haar Cascade, Dlib және Eye Aspect Ratio (EAR) әдістері қолданылды. Ұсынылған алгоритм бейнеағыннан алынған кескіндерді өңдеу арқылы жүргізушінің ұйқышылдық және шаршау белгілерін анықтауға мүмкіндік береді.

Зерттеу нәтижелері көздің жабылу ұзақтығын, жыпылықтау жиілігін және бастың кеңістіктегі орналасуын талдау жүргізушінің қауіпті жағдайларын анықтаудың тиімді көрсеткіштері екенін көрсетті. Сонымен қатар, кескіндерді алдын ала өңдеу және кадрлар санын бейімдеп басқару тәсілдері жүйенің мобильді құрылғыларда нақты уақыт режимінде жұмыс істеуін қамтамасыз етеді.

Ұсынылған модель жүргізушінің шаршауын ерте кезеңде анықтауға және жол-көлік оқиғаларының алдын алуға бағытталған интеллектуалды жүргізуші мониторингі жүйелерін құру үшін негіз бола алады. Болашақта зерттеу шеңберінде жүйенің дәлдігін арттыру мақсатында машиналық оқыту және нейрондық желілер әдістерін енгізу, сондай-ақ әртүрлі жарықтандыру және пайдалану жағдайларында эксперименттік зерттеулер жүргізу жоспарлануда.

Әдебиеттер тізімі

1. Soo S. Object Detection Using Haar-Cascade Classifier / S. Soo // Institute of Computer Science, University of Tartu. – 2014. – Vol. 2, № 3. – P. 1-12.
2. Kazemi V. One Millisecond Face Alignment with an Ensemble of Regression Trees / V. Kazemi, J. Sullivan // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – 2014. – P. 1867-1874.
3. Dalal N. Histograms of Oriented Gradients for Human Detection / N. Dalal, B. Triggs // 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05). – San Diego, USA, 2005. – Vol. 1. – P. 886-893. https://doi.org/10.1109/CVPR.2005.177.
4. Bradski G. The OpenCV Library / G. Bradski // Dr. Dobb's Journal of Software Tools. – 2000. – Vol. 25, № 11. – P. 120-125.

5. Driver Inattention Monitoring System for Intelligent Vehicles: A Review / Y. Dong et al // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2011. – Vol. 12, № 2. – P. 596-614.
6. Sikander G. Driver Fatigue Detection Systems: A Review / G. Sikander, S. Anwar // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2019. – Vol. 20, № 6. – P. 2339-2352.
7. Salvucci D.D. Identifying Fixations and Saccades in Eye-Tracking Protocols / D.D. Salvucci, J.H. Goldberg // Proceedings of the 2000 Symposium on Eye Tracking Research & Applications. – 2000. – P. 71-78.
8. Hu S. Driver Fatigue Detection Based on Eye State Analysis and Deep Learning / S. Hu, Y. Li X. Wang // Applied Sciences. – 2022. – Vol. 12, № 15. – P. 7654.
9. Real-Time Driver Drowsiness Detection for Embedded Systems Using Model Compression of Deep Neural Networks / B. Reddy et al // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops. – 2017. – P. 121-128.
10. Kumar A. Driver Drowsiness Monitoring System Using Visual Behaviour and Machine Learning / A. Kumar, R. Patra // 2018 IEEE Symposium on Computer Applications & Industrial Electronics (ISCAIE). – IEEE, 2018. – P. 339-344.
11. Advancements in the Intelligent Detection of Driver Fatigue and Distraction: A Comprehensive Review / S. Fu et al // Applied Sciences. – 2024. – Vol. 14, № 7. – Article 3016.
12. Khan M.Q. Gaze and Eye Tracking: Techniques and Applications in ADAS / M.Q. Khan, S. Lee // Sensors. – 2019. – Vol. 19, № 24. – Article 5540.
13. Mobile-Based Kernel-Fuzzy-C-Means-Wavelet for Driver Fatigue Prediction with Cloud Computing / B.G. Lee et al // IEEE Sensors Conference. – 2014. – P. 1236-1239.
14. A Real-Time Driving Drowsiness Detection Algorithm with Individual Differences Consideration / F. You et al // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 179396-179408.
15. Deep Learning-Based Computer Vision for Surveillance in ITS: Evaluation of State-of-the-Art Methods / J. Xie et al // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2021. – Vol. 70, № 4. – P. 3027-3042.
16. Predicting the Driver's Focus of Attention: The DR(eye)VE Project / A. Palazzi et al // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2018. – Vol. 41, № 7. – P. 1720-1733.
17. On Creating Vision-Based Advanced Driver Assistance Systems / M. Nieto et al // IET Intelligent Transport Systems. – 2015. – Vol. 9, № 1. – P. 59-66.
18. Rahman A. Computer Vision-Based Approach to Detect Fatigue Driving and Face Mask for Edge Computing Device / A. Rahman, M.B.H. Hriday, R. Khan // Heliyon. – 2022. – Vol. 8, № 10.

Қаржыландыру туралы ақпарат

Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырады (ЖТН AP25795477 Жасанды интеллект әдістерінің негізінде нақты уақыт режимінде жүргізушінің жағдайын бақылаудың интеллектуалды цифрлық жүйесін әзірлеу»).

Б.С. Смақанов[1], И.М. Увалиева[1]*, А.К. Шайханова[2]
[1]Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева,
Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск, ул. Серикбаева, 19
[2]Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева,
Республика Казахстан, г. Астана, ул. Сатпаева, 2
*e-mail: s.bauyrzhan.10@gmail.com

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ВОДИТЕЛЯ НА ОСНОВЕ КЛАССИЧЕСКИХ МЕТОДОВ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

В статье представлена модель интеллектуальной системы мониторинга состояния водителя в режиме реального времени, основанная на классических методах компьютерного зрения. Целью исследования является разработка эффективного алгоритма автоматического обнаружения признаков усталости, сонливости и снижения внимания водителя на основе анализа лица, состояния глаз и положения головы. Для обнаружения лица и глаз использовались классификаторы Haar Cascade, для определения ключевых точек лица – алгоритмы библиотеки Dlib, а оценка состояния глаз осуществлялась с использованием показателя Eye Aspect Ratio (EAR). Дополнительно анализировались углы наклона и поворота головы, позволяющие выявлять признаки

снижения концентрации внимания. Алгоритм реализован с использованием библиотеки OpenCV и языка программирования Python и протестирован на мобильном устройстве под управлением операционной системы Android. Экспериментальные исследования выполнены на наборе видеоданных общей продолжительностью около трех часов, включающем различные условия освещения, повороты головы и наличие очков у участников. Полученные результаты показали, что предложенная система обеспечивает обработку видеопотока со средней скоростью 28 кадров в секунду и позволяет эффективно выявлять признаки усталости водителя в режиме реального времени. Использование классических методов компьютерного зрения обеспечивает невысокие вычислительные затраты, стабильную работу на мобильных устройствах и отсутствие необходимости в специализированном аппаратном обеспечении. Разработанная модель может быть использована в интеллектуальных транспортных системах, системах помощи водителю и комплексах повышения безопасности дорожного движения.

Ключевые слова: *мониторинг состояния водителя, компьютерное зрение, Haar Cascade, Dlib, Eye Aspect Ratio, обнаружение усталости, OpenCV.*

B.S. Smakanov[1], I.M. Uvaliyeva[1]*, A.K. Shaikhanova[2]
[1]D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University,
19 Serikbayev St., Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan
[2]L.N. Gumilyov Eurasian National University,
2 Satbayev St., Astana, Republic of Kazakhstan
*e-mail: s.bauyrzhan.10@gmail.com

DEVELOPMENT OF A DRIVER STATE MONITORING MODEL BASED ON CLASSICAL COMPUTER VISION METHODS

This paper presents a real-time driver state monitoring model based on classical computer vision techniques. The primary objective of the study is to develop an algorithm for detecting fatigue, drowsiness, and reduced attention by analyzing facial features, eye state, and head pose. The proposed system employs Haar Cascade classifiers for face and eye detection, Dlib facial landmark detection for extracting facial feature points, and the Eye Aspect Ratio (EAR) metric for estimating eye openness and detecting prolonged eye closure. In addition, head orientation and tilt are analyzed as supplementary indicators of reduced attention and fatigue-related states. The algorithm was implemented using the OpenCV library and the Python programming language and evaluated on an Android-based mobile device. Experimental studies were conducted using approximately three hours of video recordings collected under different lighting conditions, head orientations, and with participants wearing glasses. Experimental results showed that the proposed system processes the video stream at an average speed of 28 frames per second and can detect prolonged eye closure and other fatigue-related indicators in real time. The use of classical computer vision methods provides low computational complexity and enables implementation on mobile devices with limited hardware resources. The obtained results demonstrate the practical applicability of the proposed approach for real-time driver state monitoring. The developed model can serve as a basis for driver assistance systems, intelligent transportation systems, and other safety-oriented applications.

Key words: *driver state monitoring, computer vision, Haar Cascade, Dlib, Eye Aspect Ratio, fatigue detection, OpenCV.*

Авторлар туралы мәліметтер

Бауыржан Серікқанұлы Смақанов – PhD, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан; e-mail: bauka.10.10@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4343-0463.

Индира Махмутовна Увалиева* – PhD, қауымдастырылған профессор, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан; e-mail: iuvalieva@ektu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2117-5390.

Айгуль Кайрулаевна Шайханова – PhD, қауымдастырылған профессор, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., Қазақстан; e-mail: shaikhanova_ak@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6006-4813.

Сведения об авторах

Бауыржан Серікқанұлы Смақанов – PhD, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан; e-mail: bauka.10.10@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4343-0463.

Индира Махмутовна Увалиева* – PhD, ассоциированный профессор, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан; e-mail: iuvalieva@ektu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2117-5390.

Айгуль Кайрулаевна Шайханова – PhD, ассоциированный профессор, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, г. Астана, Казахстан; e-mail: shaikhanova_ak@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6006-4813.

Information about the authors

Bauyrzhan Smakanov – PhD, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; e-mail: bauka.10.10@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4343-0463.

Indira Uvaliyeva* – PhD, Associate Professor, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; e-mail: iuvalieva@ektu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2117-5390.

Aigul Shaikhanova – PhD, Associate Professor, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; e-mail: shaikhanova_ak@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6006-4813.

Редакцияға енуі 02.06.2026
Өңдеуден кейін түсуі 19.08.2026
Жариялауға қабылданды 25.08.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-21

IRSTI: 20.53.19

I. Bainazarova[1], Zh. Umarova[1]*, Yu. Jusoh[2], Zh. Iztayev[1], S. Botayeva[3]
[1]South Kazakhstan Research University, Tauke Khan Avenue, 5, Shymkent, Kazakhstan
[2]Universiti Putra Malaysia, Serdang, Selangor, Malaysia
[3]Tashenev University, Konayev Avenue, 16, Shymkent, Kazakhstan
*e-mail: Zhanat-u@mail.ru

CONTEXT-DEPENDENT TRAJECTORY FORECASTING FOR AUTONOMOUS TRANSPORT SYSTEMS USING HYBRID GRAPH AND TRANSFORMER NEURAL NETWORKS

Abstract: *Trajectory forecasting is a critical component of autonomous transport systems because it supports conflict assessment and safe motion planning in dynamic road environments. This study proposes a hybrid forecasting architecture that combines adaptive graph-based modeling of local agent interactions with a transformer module that encodes the global scene context. The model was evaluated on the Argoverse 2 Motion Forecasting and Waymo Open Motion Dataset benchmarks using ADE, FDE, Miss Rate, minADE, and minFDE, together with analyses of robustness, interaction density, and inference time. On Argoverse 2, the proposed model reduced ADE from 1.21 to 1.17, FDE from 2.81 to 2.69, and Miss Rate from 0.25 to 0.23 compared with Motion Transformer. On Waymo, the improvement was smaller but consistent: ADE decreased from 1.58 to 1.53 and FDE from 3.82 to 3.69. The largest gain was observed in high-density interaction scenes, where ADE decreased from 1.52 to 1.45. These results indicate that adaptive interaction weighting improves forecasting robustness in complex multi-agent road scenarios, although it increases computational cost.*

Key words: *autonomous transport; trajectory forecasting; deep learning; graph neural networks; transformers; multi-agent interaction; computer vision; motion prediction.*

Introduction

Autonomous transport systems operate in environments where the future trajectory of one road user is rarely independent of surrounding agents, road geometry, and potential motion conflicts. A forecasting error may propagate to the planning layer and lead to an unsafe maneuver. For this reason, trajectory forecasting remains a central component of autonomous driving. Recent methods have evolved from recurrent models and social pooling approaches to graph- and attention-based architectures that model inter-agent relationships and scene-level context [1-5]. A remaining problem is the context-dependent selection of relevant interactions. In many existing models, neighboring agents are processed either through a predefined graph structure or through a general attention mechanism. Such representations do not always distinguish between agents that genuinely affect the future trajectory and agents whose presence has little influence on the forecast. In practice, interaction relevance depends on several factors at once: distance, relative velocity, heading

©I. Bainazarova, Zh. Umarova, Yu. Jusoh, Zh. Iztayev, S. Botayeva, 2026

difference, scene density, and the likelihood of trajectory conflict. Insufficient differentiation among interactions may therefore reduce forecasting robustness in dense traffic, at intersections, and during late lane changes.

This study proposes a hybrid trajectory forecasting architecture in which local interactions are modeled through an adaptively weighted graph, while global scene context is encoded by a transformer module. Unlike Motion Transformer, which uses attention-based intention localization and motion refinement [5], the proposed model explicitly computes inter-agent interaction weights from distance, relative velocity, and heading difference. Also, unlike conventional graph-based models such as Social-STGCNN [2], the interaction graph does not use static edge weights: the contribution of neighboring agents changes with the current scene configuration.

The novelty of the study lies in the adaptive weighting of inter-agent interactions and its integration with transformer-based global context encoding. The contribution is not the mere combination of a GNN and a transformer, but the context-dependent identification of agents that exert the strongest influence on the target agent's future trajectory. This is particularly relevant in high-density traffic, late lane changes, and ambiguous maneuvers.

The experimental evaluation was conducted on Argoverse 2 Motion Forecasting and the Waymo Open Motion Dataset. Both datasets are designed for autonomous driving research and include multi-agent road scenes, trajectories of different road users, and map-related information. Compared with pedestrian-oriented datasets such as ETH/UCY, they are better aligned with forecasting tasks in autonomous driving. Other datasets, including nuScenes and INTERACTION, are also relevant for motion prediction; however, they were not used in this study in order to keep the evaluation focused on large-scale motion forecasting scenarios with high-definition (HD) maps and comparable validation protocols [6-9].

The aim of this study was to develop and evaluate a hybrid trajectory forecasting model for autonomous transport that combines adaptive graph-based modeling of local interactions with attention-based encoding of global scene context.

The study addressed the following objectives:

1. to develop an adaptive interaction weighting mechanism based on distance, relative velocity, and heading difference;
2. to design a hybrid architecture combining a graph module and a transformer-based context encoder;
3. to compare the proposed model with Social-LSTM, Social-STGCNN, VectorNet, and Motion Transformer on Argoverse 2 and the Waymo Open Motion Dataset;
4. to evaluate forecasting quality using ADE, FDE, MR, minADE, and minFDE;
5. to analyze robustness to input noise and the change in inference time as the number of agents in a scene increases.

Materials and Methods

The experimental evaluation was conducted on two open datasets for motion forecasting in autonomous driving: Argoverse 2 Motion Forecasting and the Waymo Open Motion Dataset (Table 1). Both datasets contain multi-agent road scenes, agent trajectories, object categories, and map-related information. They were processed separately because they differ in temporal structure, data splits, and evaluation protocols.

Table 1 – Characteristics of the datasets used in the study

Dataset	Split	Temporal horizon	Frequency	Object types	HD maps	Use in the study
Argoverse 2 Motion Forecasting	train: 199,908; validation: 24,988; test: 24,984	11 s; typical protocol: 5 s observation and 6 s prediction	10 Hz	vehicles, pedestrians, cyclists, motorcyclists, buses, etc.	yes	urban scenes with diverse road geometry
Waymo Open Motion Dataset	train: 486,995; validation: 44,097; test: 44,920	10 historical steps + current step + 80 future steps; 11 observed states were used as input	10 Hz	vehicles, pedestrians, cyclists	yes	dense multi-agent road scenes

All locally computed metrics were obtained from the validation splits. The test splits were not used because the future trajectories in the Waymo test split are withheld for server-side evaluation.

For each scenario, agent coordinates, velocity, heading, object type, and map fragments were extracted. Coordinates were normalized with respect to the target agent: the scene was centered at the target agent's position in the last observed frame and rotated into the agent-centric coordinate frame. For scene-complexity analysis, the number of active agents, the mean nearest-neighbor distance, the share of agents within the interaction radius, and the presence of potentially conflicting motion directions were also computed.

The baseline models represented sequential, graph-based, map-aware, and attention-based approaches to trajectory forecasting (Table 2).

Table 2 – Architectural characteristics of the compared models

Model	Architecture type	Input representation	Interaction modeling	Map use	Main mechanism
Social-LSTM [1]	RNN	coordinate sequences	social pooling	no	temporal dependency modeling
Social-STGCNN [2]	GNN	spatio-temporal graph	explicit graph-based interaction	no	graph convolutions
VectorNet [10]	hybrid architecture	vectorized trajectories and HD map	indirect	yes	hierarchical polyline encoding
Motion Transformer [5]	Transformer	tokenized scene representation	attention-based	yes	self-attention
Proposed model	Hybrid GNN + Transformer	interaction graph and spatial scene context	adaptive interaction weighting	yes	joint modeling of local and global context

This set of models was used to examine whether adaptive interaction weighting provides an additional benefit over strong architectural baselines, rather than only over a simple sequential model.

Each road scene was represented as a directed graph, where nodes corresponded to road users and edges denoted potential interactions. Directed edges were added only between agents located within the specified interaction radius: 50 m for vehicles and 20 m for pedestrians and cyclists. Before computing edge weights, all input features were normalized to reduce dependence on measurement units.

The edge weight between agents (i) and (j) was computed as follows:

$$\boldsymbol{w_{ij} = \sigma(\beta_0 + \alpha_1 \widetilde{d_{ij}} + \alpha_2 \Delta\widetilde{v_{ij}} + \alpha_3 \widetilde{\theta_{ij}})} \quad \textbf{(1)}$$

where w_{ij} is the interaction weight, σ(·) is the sigmoid function, β_0 is the bias term, and α_1, α_2, α_3 are feature coefficients.

The normalized features were defined as

$$\widetilde{d_{ij}} = \exp\left(-\frac{d_{ij}}{R_c}\right), \Delta\widetilde{v_{ij}} = \min\left(\frac{\|\Delta v_{ij}\|}{v_{95}}, 1\right), \widetilde{\theta_{ij}} = \frac{1+\cos(\Delta\theta_{ij})}{2} \quad (2)$$

Here, d_{ij} is the distance between agents, R_c is the interaction radius, Δv_{ij} is the relative speed magnitude, v_{95} is the 95th percentile of relative speeds in the training split, and Δv_{ij} is the heading difference. The coefficients β_0 and α_1, α_2, α_3 were tuned by grid search on the validation split. Fifty configurations were evaluated, and the configuration that achieved the lowest minADE on the validation split was selected (Table 3).

Table 3 – Parameters of the interaction weighting function

Parameter	Meaning	Setting
β_0	baseline interaction level	grid search, 50 trials on validation split
α_1	distance contribution	grid search, 50 trials on validation split
α_2	relative velocity contribution	grid search, 50 trials on validation split
α_3	heading contribution	grid search, 50 trials on validation split
R_c	interaction radius	50 m for vehicles; 20 m for pedestrians and cyclists
v_{95}	velocity normalization coefficient	95th percentile of relative speeds in the training split

The target agent is connected to surrounding vehicles through weighted graph edges. Edge weights w_{ij} are computed from normalized distance, relative velocity, and heading difference according to Equation (1). Higher values indicate a stronger influence on the predicted future trajectory of the target agent (Figure 1).

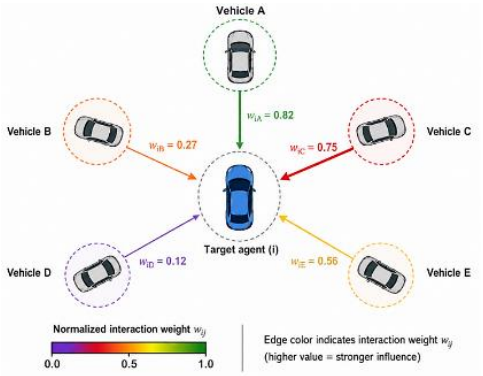


Figure 1 – Adaptive interaction weighting between neighboring agents

Hybrid Model Architecture

The model consisted of three components: a graph-based local encoder, a transformer-based global context module (Table 4), and a multimodal trajectory decoder. The graph module used the interaction weights w_{ij} from Equation (1) and updated each node representation as

$$h_i^{(l+1)} = \phi(h_i^{(l)}, \sum_{j \in N(i)} w_{ij} * \psi(h_i^{(l)}, h_j^{(l)})) \quad (3)$$

The function ψ $(\cdot)$ was implemented as a two-layer MLP for generating inter-agent messages, whereas $\phi(\cdot)$ was implemented as a two-layer MLP with a residual connection and LayerNorm to update the node states. After graph encoding, the features were passed to the transformer module:

$$\boldsymbol{Attention(Q,K,V) = softmax(\frac{QK^T}{\sqrt{d_k}})V} \quad (4)$$

The decoder generated $K = 6$ future trajectory modes and their corresponding probabilities. The loss combined the error of the best-matching trajectory with a classification loss for mode selection:

$$\boldsymbol{L = \min_{k \in K} \frac{1}{T} \sum_{t=1}^{T} \left\| \hat{p}_t^k - p_t \right\|_2 + \lambda L_{cls}} \quad (5)$$

$$\boldsymbol{L_{cls} = -log \frac{\exp(s_{k^*})}{\sum_{k=1}^{K} \exp(s_k)}} \quad (6)$$

$$\boldsymbol{k^* = arg \min_{K \in \{1,..,K\}} \frac{1}{T} \sum_{t=1}^{T} \left\| \widehat{p_t^k} - p_t \right\|_2} \quad (7)$$

In the main configuration, λ = 0.2. This value was selected on the validation split from {0.1, 0.2, 0.5, 1.0}.

Table 4 – Main parameters of the proposed model

Parameter	Value
Number of graph layers	3
Hidden dimension h_i	128
Implementation of ψ(·)	two-layer MLP, 128 hidden units, ReLU
Implementation of ϕ(·)	two-layer MLP + residual connection + LayerNorm
Number of transformer layers	4
Number of attention heads	8
Key dimension d_k	64
Dropout	0.1
Number of trajectory modes *K*	6
Loss coefficient λ	0.2
Decoder	MLP trajectory head + classification head
Optimizer	AdamW

The architecture consists of the following sequence of blocks: Trajectory History → Scene Encoding → Interaction Graph Construction → Graph Neural Network → Transformer Context Module → Feature Fusion → Multi-Modal Trajectory Decoder → Predicted Future Trajectories (Figure 2).

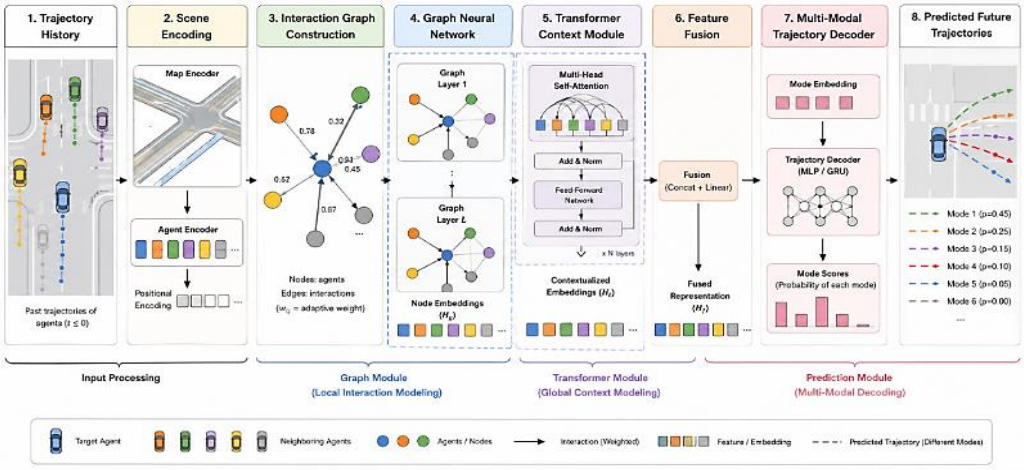


Figure 2 – Overall architecture of the hybrid trajectory forecasting system

Forecasting quality was evaluated using ADE, FDE, MR, minADE, and minFDE. Since the model generated multiple future trajectories, ADE and FDE were computed for the most probable mode, whereas minADE and minFDE were computed for the best-matching trajectory among all *K* modes.

$$k^{prob} = arg \max_{K\in\{1,..,K\}} s_k \quad (8)$$

$$ADE = \frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T} \left\| \hat{p}_t^{prob} - p_t \right\|_2 \quad FDE = \left\| \hat{p}_t^{prob} - p_T \right\|_2 \quad (9)$$

$$\min ADE = \min_{k\in K} \frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T} \left\| \hat{p}_t^{k} - p_t \right\|_2, \min FDE = \min_{k\in K} \frac{1}{T} \left\| \hat{p}_t^{k} - p_T \right\|_2 \quad (10)$$

Miss Rate was defined as the proportion of predictions whose final displacement error exceeded a fixed threshold:

$$MR = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \mathbb{I}(FDE_i > \tau) \quad (11)$$

For the Waymo Open Motion Dataset, MR was computed using the WOMD evaluator protocol, in which the thresholds depend on the agent type and evaluation horizon. Therefore, MR values were compared only within each dataset and were not interpreted as directly comparable between Argoverse 2 and Waymo.

Experiments were conducted separately on Argoverse 2 Motion Forecasting and the Waymo Open Motion Dataset. All reported numerical results were computed on the validation split. The test splits were not used for local evaluation, since future trajectories in the Waymo test split are hidden and used for server-side leaderboard evaluation (Table 5).

Table 5 – Main experimental protocol

Parameter	Value
Datasets	Argoverse 2 Motion Forecasting; Waymo Open Motion Dataset
Argoverse 2 split	train: 199,908; validation: 24,988; test: 24,984
Waymo Open Motion split	train: 486,995; validation: 44,097; test: 44,920
Basis of numerical results	validation split for both datasets
Test split	not used for local evaluation; Waymo test has hidden future ground truth
Data frequency	10 Hz
Main metrics	ADE, FDE, MR, minADE, minFDE
Miss Rate threshold	Argoverse 2: τ = 2.0 m; Waymo: WOMD evaluator protocol
Random seeds	13, 21, 42, 77, 101
Optimizer	AdamW
Learning rate range	1×10^{-4} to 5×10^{-4}
Batch size	16–64, depending on model and GPU memory
Early stopping	validation minADE; (patience = 10) epochs
Hyperparameter budget	50 trials per model
Unit of analysis	scene / target agent
Additional analyzes	noise, interaction density, inference time

Each model used the same hyperparameter budget of 50 trials. Training was stopped if validation minADE did not improve for 10 epochs. Hyperparameters were not tuned on the test split.

Robustness was evaluated by adding Gaussian noise only to the observed part of the trajectory; the future ground truth was unchanged. The main robustness indicator was the change in ADE relative to the no-noise condition.

Computational efficiency was assessed by inference time per scene and peak GPU memory usage. All measurements were performed on a single NVIDIA A100 40GB GPU with batch size = 1 and float32 precision, using PyTorch 2.1 and CUDA 12.1. Inference time excluded data loading and scene preprocessing.

For each model, the mean, standard deviation, median, interquartile range, and 95% confidence interval were computed. Comparisons were conducted separately for each dataset on the validation split.

When error distributions departed from normality, the Friedman test for related samples was used; each scene served as a block across the compared models. Kendall's W was calculated to estimate the consistency of model differences. Post hoc pairwise comparisons were adjusted for multiple testing. In addition, the distribution tails and high-error scenes were analyzed, because rare large errors may be more critical in autonomous driving than small improvements in mean error.

Results

Model performance was evaluated on the validation splits of Argoverse 2 Motion Forecasting and the Waymo Open Motion Dataset using ADE, FDE, MR, minADE, and minFDE. Lower values indicate better forecasting performance (Table 6). The reported results should not be directly compared with public leaderboard scores because all models were trained and evaluated under a unified local protocol without server-side submission or leaderboard-specific optimization.

Table 6 – Performance comparison on the Argoverse 2 Motion Forecasting validation split

Model	ADE ↓	FDE ↓	MR ↓	minADE ↓	minFDE ↓
Social-LSTM	1.93 ± 0.07	4.37 ± 0.16	0.41 ± 0.02	1.76 ± 0.06	3.92 ± 0.15
Social-STGCNN	1.61 ± 0.06	3.72 ± 0.14	0.35 ± 0.02	1.48 ± 0.05	3.28 ± 0.12
VectorNet	1.34 ± 0.05	3.08 ± 0.11	0.29 ± 0.02	1.22 ± 0.04	2.71 ± 0.10
Motion Transformer	1.21 ± 0.04	2.81 ± 0.10	0.25 ± 0.01	1.08 ± 0.04	2.46 ± 0.09
Proposed Model	1.17 ± 0.04	2.69 ± 0.09	0.23 ± 0.01	1.03 ± 0.03	2.31 ± 0.08

Note: Values are reported as mean ± standard deviation across five independent runs.

On Argoverse 2, the proposed model achieved the lowest error across all evaluation metrics. Compared with Motion Transformer, ADE decreased from 1.21 to 1.17 m, FDE from 2.81 to 2.69 m, and MR from 0.25 to 0.23. Although the improvement was moderate, it remained consistent across all metrics (Table 7).

Table 7 – Performance comparison on the Waymo Open Motion Dataset validation split

Model	ADE ↓	FDE ↓	MR ↓	minADE ↓	minFDE ↓
Social-LSTM	2.48 ± 0.09	5.94 ± 0.21	0.49 ± 0.02	2.22 ± 0.08	5.21 ± 0.19
Social-STGCNN	2.11 ± 0.08	5.07 ± 0.18	0.44 ± 0.02	1.89 ± 0.07	4.58 ± 0.17
VectorNet	1.76 ± 0.06	4.13 ± 0.15	0.37 ± 0.02	1.55 ± 0.06	3.66 ± 0.13
Motion Transformer	1.58 ± 0.05	3.82 ± 0.13	0.33 ± 0.01	1.39 ± 0.05	3.37 ± 0.12
Proposed Model	1.53 ± 0.05	3.69 ± 0.12	0.31 ± 0.01	1.34 ± 0.05	3.24 ± 0.11

Errors were generally higher on Waymo, which may reflect differences in scene complexity, traffic density, and uncertainty in future motion. Nevertheless, the proposed model maintained a consistent advantage over Motion Transformer, reducing ADE from 1.58 to 1.53 m, FDE from 3.82 to 3.69 m, and MR from 0.33 to 0.31.

The Friedman test was applied to compare ADE distributions across models for each dataset separately (Table 8).

Table 8 – Statistical comparison of models based on ADE

Dataset	Friedman χ^2	p-value	Kendall's W
Argoverse 2	41.82	< 0.001	0.23
Waymo	37.15	< 0.001	0.19

Although the overall differences were statistically significant, Kendall's W values below 0.30 indicate a small overall effect of model choice across scenes. Consequently, the results should be interpreted as differences in error distributions rather than evidence that one architecture is consistently superior across all scenarios.

Interaction density (Table 9) was defined by the number of neighboring agents within the interaction radius of the target agent: low density (≤ 5 agents), medium density (6-15 agents), and high density (> 15 agents).

Table 9 – ADE as a function of interaction density

Interaction Density	Social-LSTM	Social-STGCNN	VectorNet	Motion Transformer	Proposed Model
Low (≤ 5 agents)	1.47	1.32	1.18	1.12	1.10
Medium (6-15 agents)	1.89	1.61	1.36	1.23	1.18
High (> 15 agents)	2.54	2.03	1.69	1.52	1.45

Differences between Motion Transformer and the proposed model were minimal in sparse scenes. As interaction density increased, the performance gap widened, suggesting that adaptive graph-based interaction modeling is particularly beneficial when multiple neighboring agents simultaneously influence the target trajectory.

Gaussian noise was added only to the observed trajectory segment, while future ground-truth trajectories remained unchanged (Table 10).

Table 10 – Robustness to input noise measured by ADE

Noise Level	Social-LSTM	Social-STGCNN	VectorNet	Motion Transformer	Proposed Model
0%	1.93	1.61	1.34	1.21	1.17
5%	2.18	1.79	1.47	1.32	1.27
10%	2.51	2.03	1.68	1.49	1.42
15%	2.94	2.37	1.95	1.71	1.63

Performance deteriorated for all models as noise increased. Social-LSTM exhibited the fastest degradation, whereas Motion Transformer and the proposed model remained more robust. Across all noise levels, the proposed architecture consistently achieved the lowest ADE (Figure 3).

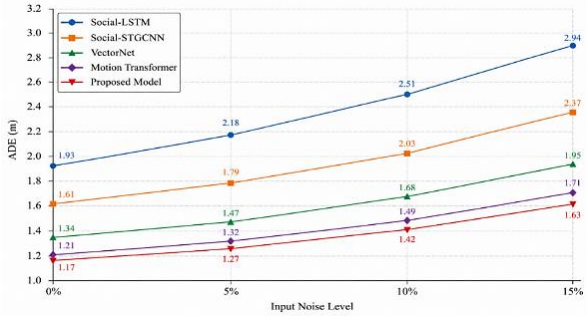


Figure 3 – Effect of input noise on ADE

Curves illustrate the increase in ADE at noise levels of 0%, 5%, 10%, and 15% for all evaluated models.

Inference benchmarks were conducted on an NVIDIA A100 GPU with 40 GB of memory using batch size of 1, float32 precision, PyTorch 2.1, and CUDA 12.1. Reported inference times exclude data loading and preprocessing (Table 11).

Table 11 – Inference time per scene (ms)

Number of Agents	Social-LSTM	Social-STGCNN	VectorNet	Motion Transformer	Proposed Model
≤10	4.8	7.6	9.2	11.4	12.7
11–25	6.5	11.8	13.7	18.2	19.6
26–50	9.4	19.3	21.5	31.8	33.7
>50	14.7	33.5	37.4	58.1	61.8

Social-LSTM was the fastest model but also the least accurate. The proposed model had the longest inference time; in scenes containing more than 50 agents, its inference time exceeded Motion Transformer by 3.7 ms (Figure 4).

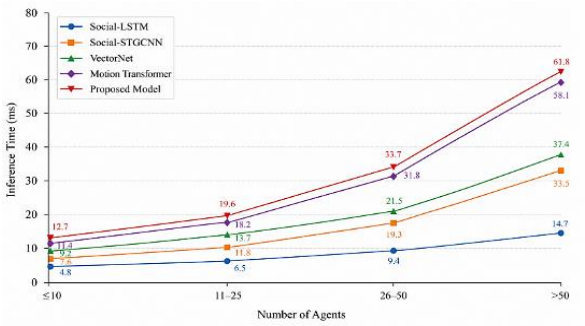


Figure 4 – Inference time as a function of the number of agents

The figure shows how computational cost increases with scene complexity for all evaluated models (Table 12).

Table 12 – Peak GPU memory consumption (GB)

Model	≤10 Agents	11-25	26-50	>50
Social-LSTM	1.3	1.5	1.7	2.0
Social-STGCNN	2.1	2.8	3.6	4.8
VectorNet	2.7	3.4	4.5	5.9
Motion Transformer	3.4	4.7	6.3	8.6
Proposed Model	3.8	5.2	7.1	9.4

GPU memory consumption increased most markedly for the transformer-based and hybrid architectures. This may limit the deployment of the proposed model in high-density scenes without additional inference optimization or neighbour-selection strategies.

Average metrics do not fully capture rare but potentially critical forecasting failures. Therefore, ADE distributions and representative trajectory predictions were analyzed qualitatively (Figure 5).

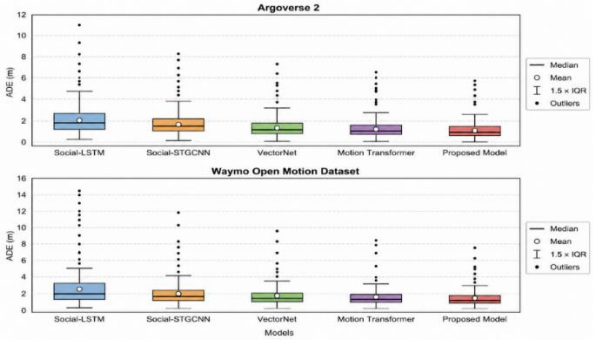


Figure 5 – ADE distributions across models

Boxplots illustrate medians, interquartile ranges, and outliers separately for Argoverse 2 and the Waymo Open Motion Dataset (Figure 6).

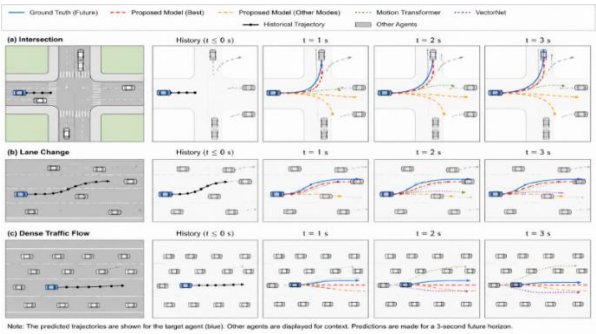


Figure 6 – Examples of predicted trajectories in different traffic scenarios

Three representative cases are shown: (a) intersection crossing, (b) lane-change maneuver, and (c) dense traffic flow.

The largest forecasting errors occurred at complex intersections, during late lane changes, and in scenarios involving overlapping trajectories of multiple agents. In such cases, the observed motion history was often insufficient to determine a unique future maneuver, even when a multimodal decoder was employed.

Discussion

The results show that the adaptive graph module provides a modest but consistent improvement over a strong attention-based baseline. This gain appears to be associated with the explicit selection and weighting of local interactions rather than with architectural complexity alone. Although Motion Transformer captures global scene context, it does not explicitly assign interaction weights based on distance, relative velocity, and heading difference. The proposed graph module addresses this by passing a context-weighted local representation to the transformer.

This finding is consistent with prior work on explicit inter-agent modeling [1-3]. Unlike fixed graph structures, the proposed model varies the influence of neighboring agents according to distance, relative velocity, and heading difference. Its advantage therefore becomes more visible in dense traffic, where several agents may affect the target trajectory at the same time.

The results do not imply that one architecture is universally superior. Low Kendall's W values indicate that model rankings changed across scenes, and in some cases Motion Transformer and VectorNet produced comparable predictions. The proposed model should therefore be interpreted as improving robustness in difficult scenarios rather than dominating across all traffic conditions.

The largest errors occurred at complex intersections, during late lane changes, and in dense traffic with partially overlapping trajectories. In these cases, the observed history often does not contain enough information to determine a single future maneuver. Even multimodal prediction cannot fully remove this uncertainty. Computational cost remains a limitation. The proposed model required more memory and longer inference times than the baseline models, especially in dense scenes. Since forecasting is only one part of an autonomous-driving pipeline, practical deployment would require optimization of the graph module, neighbor selection, or inference acceleration. The study was also limited to evaluation on the validation splits of two datasets. Ffuture work should include official benchmark submissions, additional datasets, and richer semantic cues such as intent and traffic-rule context.

Conclusion

This study presented a hybrid trajectory forecasting model, combining adaptive graph-based interaction modeling with transformer-based encoding of the global scene context. Experiments on Argoverse 2 Motion Forecasting and the Waymo Open Motion Dataset showed consistent, moderate improvements over Motion Transformer, especially in dense interaction scenarios. The findings suggest that context-dependent weighting of neighboring agents is most useful when multiple road users influence the target trajectory. In simpler scenes, differences between strong architectures remained small.

The proposed model should not be viewed as universally optimal: performance varied across scenes, and accuracy gains increased computational cost. Future research should focus on evaluation through official benchmark submissions, broader dataset coverage, and reductions in inference latency and memory consumption without compromising forecasting accuracy.

References

1. Social LSTM: Human trajectory prediction in crowded spaces / A. Alahi et al // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – Las Vegas, USA, 2016. – P. 961-971. https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.110.

2. Social-STGCNN: A social spatio-temporal graph convolutional neural network for human trajectory prediction / A. Mohamed et al // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – Seattle, USA, 2020. – P. 14424-14432. https://doi.org/10.1109/CVPR42600.2020.01444.

3. Learning lane graph representations for motion forecasting / M. Liang et al // Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV). – Glasgow, United Kingdom, 2020. – P. 541-556. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58536-5_32.

4. AgentFormer: Agent-aware transformers for socio-temporal multi-agent forecasting / Y. Yuan et al // Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). – Montreal, Canada, 2021. – P. 9813-9823. https://doi.org/10.1109/ICCV48922.2021.00967.
5. Motion Transformer with global intention localization and local movement refinement / S. Shi et al // Advances in Neural Information Processing Systems. – 2022. – Vol. 35. – New York: Curran Associates. – P. 6531-6543. https://doi.org/10.48550/arXiv.2209.13508.
6. nuScenes: A multimodal dataset for autonomous driving / H. Caesar et al // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – Seattle, USA, 2020. – P. 11618-11628. https://doi.org/10.1109/CVPR42600.2020.01164.
7. Zhan W. et al. INTERACTION dataset: An INTERnational, adversarial and cooperative moTION dataset in interactive driving scenarios with semantic maps [The electron. resource]. – 2019. https://arxiv.org/abs/1910.03088 (date of request: 17.05.2025). https://doi.org/10.48550/arXiv. 1910.03088.
8. Argoverse 2: Next generation datasets for self-driving perception and forecasting / B. Wilson et al // Proceedings of the Neural Information Processing Systems Track on Datasets and Benchmarks. – 2023. https://arxiv.org/abs/2301.00493 (date of request: 17.05.2025). https://doi.org/10.48550/ arXiv.2301.00493.
9. Large scale interactive motion forecasting for autonomous driving: The Waymo Open Motion Dataset / S. Ettinger et al // Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). – Montreal, Canada, 2021. – P. 9710-9719. https://doi.org/10.1109/ ICCV48922.2021.00957.
10. VectorNet: Encoding HD maps and agent dynamics from vectorized representation / J. Gao et al // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – Seattle, USA, 2020. – P. 11525-11533. https://doi.org/10.1109/CVPR42600.2020.01154.

И. Байназарова[1], Ж. Умарова[*], Ю. Джусох[2], Ж. Изтаев[1], С. Ботаева[3]
[1]Южно-Казахстанский исследовательский университет,
Республика Казахстан, г. Шымкент, проспект Тауке Хана, 5
[2]Университет Путра, Малайзия, Серданг, Селангор
[3]Университет Ташенова, Республика Казахстан, г. Шымкент, проспект Конаева, 16
[*]e-mail: Zhanat-u@mail.ru

КОНТЕКСТНО-ЗАВИСИМОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИЙ УЧАСТНИКОВ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМ АВТОНОМНОГО ТРАНСПОРТА НА ОСНОВЕ ГИБРИДНЫХ ГРАФОВЫХ И ТРАНСФОРМЕРНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Прогнозирование траекторий участников дорожного движения является одним из ключевых компонентов систем автономного транспорта, поскольку обеспечивает оценку потенциальных конфликтов и поддержку безопасного планирования движения в динамической дорожной среде. В работе предложена гибридная архитектура прогнозирования, объединяющая адаптивное графовое моделирование локальных взаимодействий между участниками движения и трансформерный модуль для кодирования глобального контекста сцены. Оценка модели проводилась на наборах данных Argoverse 2 Motion Forecasting и Waymo Open Motion Dataset с использованием метрик ADE, FDE, Miss Rate, minADE и minFDE, а также анализа устойчивости, плотности взаимодействий и времени инференса. На наборе Argoverse 2 предложенная модель снизила значение ADE с 1,21 до 1,17, FDE – с 2,81 до 2,69, а Miss Rate – с 0,25 до 0,23 по сравнению с Motion Transformer. На наборе Waymo улучшение оказалось менее выраженным, однако сохранялось по всем основным показателям: ADE уменьшилась с 1,58 до 1,53, а FDE – с 3,82 до 3,69. Наиболее заметное преимущество наблюдалось в сценах с высокой плотностью взаимодействий, где значение ADE снизилось с 1,52 до 1,45. Полученные результаты показывают, что адаптивное взвешивание взаимодействий повышает устойчивость прогнозирования в сложных многоагентных дорожных сценариях, хотя сопровождается увеличением вычислительных затрат.

Ключевые слова: *автономный транспорт; прогнозирование траекторий; глубокое обучение; графовые нейронные сети; трансформеры; многоагентные взаимодействия; компьютерное зрение; прогнозирование движения.*

И. Байназарова[1], Ж. Умарова[1*], Ю. Джусох[2], Ж. Изтаев[1], С. Ботаева[3]
[1]М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті,
Қазақстан Республикасы, Шымкент қаласы, Тәуке хан даңғылы, 5
[2]Путра Малайзия университеті, Малайзия, Серданг, Селангор
[3]Тәшенев университеті, Қазақстан Республикасы, Шымкент қаласы, Қонаев даңғылы, 16

ГИБРИДТІ ГРАФТЫҚ ЖӘНЕ ТРАНСФОРМЕРЛІК НЕЙРОНДЫҚ ЖЕЛІЛЕР НЕГІЗІНДЕ АВТОНОМДЫ КӨЛІК ЖҮЙЕЛЕРІ ҮШІН ЖОЛ ҚОЗҒАЛЫСЫНА ҚАТЫСУШЫЛАР ТРАЕКТОРИЯЛАРЫН КОНТЕКСТКЕ ТӘУЕЛДІ БОЛЖАУ

Жол қозғалысына қатысушылардың траекторияларын болжау автономды көлік жүйелерінің маңызды құрамдас бөліктерінің бірі болып табылады, өйткені ол ықтимал қақтығыстарды бағалауға және динамикалық жол жағдайында қауіпсіз қозғалысты жоспарлауға мүмкіндік береді. Бұл жұмыста жол қозғалысына қатысушылар арасындағы жергілікті өзара әрекеттесулерді адаптивті графтық модельдеуді және көріністің жаһандық контекстін кодтауға арналған трансформер модулін біріктіретін гибридті болжау архитектурасы ұсынылған. Модель Argoverse 2 Motion Forecasting және Waymo Open Motion Dataset деректер жиынтықтарында ADE, FDE, Miss Rate, minADE және minFDE метрикалары, сондай-ақ орнықтылықты, өзара әрекеттесу тығыздығын және инференс уақытын талдау негізінде бағаланды. Argoverse 2 жиынтығында ұсынылған модель Motion Transformer моделіне қарағанда ADE көрсеткішін 1,21-ден 1,17-ге, FDE көрсеткішін 2,81-ден 2,69-ға және Miss Rate көрсеткішін 0,25-тен 0,23-ке дейін төмендетті. Waymo деректер жиынтығында жақсару деңгейі төменірек болғанымен, барлық негізгі көрсеткіштер бойынша сақталды: ADE 1,58-ден 1,53-ке, ал FDE 3,82-ден 3,69-ға дейін азайды. Ең айқын артықшылық өзара әрекеттесу тығыздығы жоғары сценарийлерде байқалды, мұнда ADE мәні 1,52-ден 1,45-ке дейін төмендеді. Алынған нәтижелер өзара әрекеттесулерді адаптивті түрде салмақтау күрделі көпагентті жол сценарийлерінде болжаудың орнықтылығын арттыратынын көрсетті, алайда бұл есептеу шығындарының өсуімен қатар жүреді.

Түйін сөздер: автономды көлік, траекторияларды болжау, терең оқыту, графтық нейрондық желілер, трансформерлер, көпагентті өзара әрекеттесу, компьютерлік көру, қозғалысты болжау.

Information about authors

Indira Bainazarova – PhD student, Department of Automation and Control, M. Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Kazakhstan; e-mail: B.k.indira@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-1553-7090.

Zhanat Umarova* – PhD, Associate Professor, Department of Information Systems and Modeling, M. Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Kazakhstan; e-mail: Zhanat-u@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0257-4417.

Yusmadi Jusoh – Associate Professor, Faculty of Computer Science and Information Technology, Universiti Putra Malaysia, Malaysia; e-mail: yusmadi@upm.edu.my. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7767-5001.

Zhalgasbek Iztayev – Candidate of pedagogucal sceinces, Associate Professor, Department of Information Systems and Modeling, M. Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Kazakhstan; e-mail: zhalgasbek71@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3210-2963.

Saule Botayeva – Candidate of technical sceinces, Department of IT and Digital Technologies, Tashenev University, Shymkent, Kazakhstan; e-mail: saule_bb@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4995-7730.

Сведения об авторах

Индира Байназарова – докторант, кафедра Автоматизации и управления, Южно-Казахстанский университет имени М. Ауэзова, Шымкент, Казахстан; e-mail: B.k.indira@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-1553-7090.

Жанат Умарова* – PhD, ассоциированный профессор, кафедра Информационных систем и моделирования, Южно-Казахстанский университет имени М. Ауэзова, Шымкент, Казахстан; e-mail: Zhanat-u@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0257-4417.

Юсмади Джусох – ассоциированный профессор, факультет Компьютерных наук и информационных технологий, Университет Путра Малайзия, Малайзия; e-mail: yusmadi@upm.edu.my. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7767-5001.

Жалгасбек Изтаев – кандидат педагогических наук, ассоциированный профессор, кафедра Информационных систем и моделирования, Южно-Казахстанский университет имени М. Ауэзова, Шымкент, Казахстан; e-mail: zhalgasbek71@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3210-2963.

Сауле Ботаева – кандидат технических наук, кафедра IT и цифровых технологий, Университет Ташенова, Шымкент, Казахстан; e-mail: saule_bb@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4995-7730.

Авторлар туралы мәліметтер

Индира Байназарова – PhD докторант, Автоматтандыру және басқару кафедрасы, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент, Қазақстан; e-mail: B.k.indira@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-1553-7090.

Жанат Умарова* – PhD, қауымдастырылған профессор, Ақпараттық жүйелер және модельдеу кафедрасы, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент, Қазақстан; e-mail: Zhanat-u@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0257-4417.

Юсмади Джусох – қауымдастырылған профессор, Компьютерлік ғылымдар және ақпараттық технологиялар факультеті, Путра Малайзия университеті, Малайзия; e-mail: yusmadi@upm.edu.my. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7767-5001.

Жалғасбек Изтаев – педагогика ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, Ақпараттық жүйелер және модельдеу кафедрасы, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент, Қазақстан; e-mail: zhalgasbek71@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3210-2963.

Сәуле Ботаева – техника ғылымдарының кандидаты, IT және цифрлық технологиялар кафедрасы, Тәшенев университеті, Шымкент, Қазақстан; e-mail: saule_bb@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4995-7730.

Received 01.06.2026
Revised 18.08.2026
Accepted 19.08.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-22

МРНТИ: 28.23.15

Г.К. Абишева, Б.Ш. Разахова, Т.А. Айдынов*, М.К. Сапарбек
Евразийский национальный университет имени Л. Н.Гумилева,
10000, Республика Казахстан, г. Астана, ул. Сатпаева, 2
*e-mail: tolegen.ch@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ПУБЛИЧНЫХ ДАТАСЕТОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ

Аннотация: *Развитие технологий искусственного интеллекта (ИИ) в железнодорожной отрасли напрямую зависит от наличия качественных и репрезентативных публичных датасетов. В статье представлен систематический анализ открытых наборов данных, применяемых для задач обнаружения дефектов рельсов, диагностики контактной сети, мониторинга подвижного состава и обеспечения безопасности железнодорожной инфраструктуры. Анализ выполнен в соответствии с методологией PRISMA: поиск проводился в базах IEEE Xplore, Scopus и Web of Science, а также в репозиториях Kaggle, GitHub и Zenodo. Проанализировано 30 ключевых публикаций и 13 открытых датасетов, которые классифицированы по типу сенсоров (RGB, LiDAR, вибрационные, мультисенсорные), задачам машинного обучения (детекция, сегментация, классификация), объёму данных и формату аннотаций. Установлено, что большинство наборов данных основаны на RGB-изображениях, тогда как доля мультимодальных датасетов постепенно увеличивается. Выявлены ключевые ограничения существующих наборов данных -малый объём выборок, дисбаланс классов, ограниченная географическая вариативность и отсутствие унифицированных benchmark-протоколов, и определены направления дальнейших исследований. Полученные результаты подчёркивают необходимость создания крупных мультимодальных наборов данных и разработки единых стандартов аннотации и оценки моделей ИИ.*

Ключевые слова. *железная дорога; искусственный интеллект; датасет; компьютерное зрение; дефект рельса; сегментация; YOLO; U-Net.*

Введение. Железнодорожный транспорт является одной из ключевых составляющих современной транспортной инфраструктуры и играет важную роль в обеспечении устойчивого развития экономики. Повышение интенсивности перевозок и увеличение скорости движения поездов предъявляют высокие требования к надёжности и безопасности железнодорожной инфраструктуры. В связи с этим особое значение приобретает своевременное обнаружение

©Г.К. Абишева, Б.Ш. Разахова, Т.А. Айдынов, М.К. Сапарбек, 2026

дефектов элементов железнодорожного пути, таких как рельсы, шпалы, крепления и балластный слой. Традиционные методы инспекции железнодорожных путей, основанные на визуальном осмотре и специализированных измерительных вагонах, требуют значительных временных и трудовых ресурсов и не всегда позволяют оперативно выявлять потенциально опасные дефекты. Согласно международным исследованиям в области транспортной безопасности, значительная часть инцидентов на железных дорогах связана с дефектами инфраструктуры, выявленными с задержкой [1].

В настоящее время инспекция путей преимущественно осуществляется традиционными методами: визуальным осмотром, ультразвуковой и магнитной дефектоскопией, а также с использованием специализированных вагонов-путеизмерителей. Несмотря на высокую точность, данные методы характеризуются значительными эксплуатационными затратами и ограниченной масштабируемостью в рамках всей сети железных дорог [2]. В последние годы развитие методов искусственного интеллекта (ИИ) и глубокого обучения позволило перейти к автоматизированным системам мониторинга, основанным на компьютерном зрении и анализе сенсорных данных.

В последние годы мониторинг путевой инфраструктуры всё чаще осуществляется с применением нейронных сетей и методов компьютерного зрения. Вместо ручного анализа видеозаписей системы обучаются выполнять данную задачу автоматически: камеры, установленные на дронах или инспекционных поездах, передают видеопоток, а алгоритмы, такие как YOLO и U-Net, обнаруживают трещины и иные повреждения в режиме, близком к реальному времени. В условиях зашумлённых изображений подобные глубокие нейронные сети демонстрируют существенно более высокую эффективность по сравнению с традиционными методами [3].

Результаты исследований последних лет свидетельствуют о том, что применение ИИ в диагностике железнодорожной инфраструктуры перешло из экспериментальной стадии в разряд практической необходимости. Нейросетевые модели способны обнаруживать мелкие дефекты с точностью, превышающей возможности человека-оператора, а также снижать вероятность ошибок, связанных с человеческим фактором.

Основные направления, где ИИ демонстрирует наилучшие результаты:

- поиск повреждений на рельсах [4];
- контроль отсутствия посторонних предметов на путях [5];
- контроль состояния балласта и шпал [6];
- проверка контактных сетей [7];
- анализ вибраций для прогнозирования неисправностей подвижного состава [8].

Одними из первых применение сверточных нейронных сетей (CNN) для дефектоскопии рельсов продемонстрировали Faghih-Roohi et al. [9]. Впоследствии Zhang et al. [10] расширили данный подход за счёт использования более мощных архитектур, таких как ResNet [11] и U-Net [12], что позволило существенно повысить точность сегментации дефектов. Тем не менее ключевой проблемой на сегодняшний день остаётся не столько развитие самих алгоритмов, сколько поиск качественных обучающих данных и разработка эффективных методов обработки больших объёмов сенсорной информации.

В задачах контроля путевой инфраструктуры широко применяются алгоритмы детекции объектов, такие как YOLO [13] и Faster R-CNN [14]. Если ранние версии данных архитектур требовали выбора между скоростью и точностью, то современные модификации YOLO позволяют обрабатывать видеопоток в реальном времени без существенной потери качества. Для задач, требующих точного выделения границ элементов инфраструктуры, чаще применяются архитектуры семантической сегментации, такие как DeepLabV3+ [15], либо трансформерные модели, например Vision Transformer [16].

Вместе с тем ключевым ограничивающим фактором для любого алгоритма остаётся качество и объём обучающих данных: без достаточного количества размеченных изображений эффективность нейросетевых моделей существенно снижается. Поиск подходящих датасетов затруднён узкоспециализированным характером разметки, требуемой для задач железнодорожной отрасли. Данная проблема постепенно решается – в частности, для задач семантической сегментации широкое распространение получил датасет RailSem19 [17], характеризующийся детальной проработкой элементов железнодорожной сцены.

Помимо специализированных датасетов для отдельных задач, исследователи всё чаще используют мультисенсорные наборы данных, такие как OSDaR23 [18], объединяющие данные камер и лидаров, установленных на подвижном составе. Комбинирование различных типов сенсоров имеет существенное значение для разработки систем автономного управления, поскольку позволяет алгоритмам получать не только плоскостное, но и объёмное представление об окружающей среде. Появление подобных открытых датасетов способствует развитию отрасли, предоставляя разработчикам возможность тестировать модели на реальных, а не синтетических данных.

Тем не менее ситуация с доступностью данных в отрасли остаётся неоднозначной. Pappaterra et al. [19] провели систематический анализ и установили, что количество открытых железнодорожных датасетов по-прежнему критически недостаточно. Несмотря на широкий охват рассмотренных источников - от данных на переездах до сенсорных данных подвижного состава, - прогресс в данной области существенно ограничен дефицитом качественных общедоступных массивов данных по сравнению, например, с автомобильным сектором.

Несмотря на стремительный рост числа публикаций после 2018 года [20-22], ключевой проблемой остаётся ограниченность и фрагментарность доступных обучающих данных. В отличие от универсальных компьютерных датасетов, таких как ImageNet [23] и COCO [24], железнодорожные наборы данных характеризуются:

- малым объёмом выборок;
- дисбалансом классов;
- ограниченной географической и климатической вариативностью;
- отсутствием мультимодальности;
- отсутствием унифицированных benchmark-протоколов (эталонных протоколов сравнительного тестирования).

Большинство исследований сосредоточено на разработке алгоритмов, в то время как систематизированный анализ самих датасетов остаётся недостаточно представленным в научной литературе. Отсутствие комплексного обзора публичных железнодорожных датасетов затрудняет воспроизводимость экспериментов, объективное сравнение моделей и формирование стандартизированных метрик оценки.

В связи с этим возникает необходимость в проведении систематического анализа существующих публичных датасетов ИИ для железнодорожных приложений с использованием формализованной методологии отбора и оценки публикаций.

Научная новизна настоящей работы состоит не в самом факте проведения систематического обзора, выполненного ранее Pappaterra et al. [19] для публикаций до 2021 года, а в существенном обновлении и переосмыслении ландшафта открытых железнодорожных датасетов за период 2021-2026 годов. В отличие от предшествующего обзора, в данном исследовании: (1) систематизированы недавно появившиеся мультимодальные (камера + LiDAR + радар), трёхмерные (облака точек LiDAR) и синтетические либо AR-дополненные наборы данных (OSDaR23, OSDaR-AR, WHU-Railway3D, SynRailObs, SynDRA, RailGoerl24), отсутствовавшие на момент публикации [19]; (2) предложена трёхуровневая классификация датасетов одновременно по типу сенсоров, задачам машинного обучения и уровню аннотации; (3) выявлен и количественно охарактеризован сдвиг от одномодальных RGB-наборов к мультимодальным и синтетическим данным, а также установлено отсутствие унифицированных benchmark-протоколов как ключевого барьера воспроизводимости. Тем самым работа не дублирует, а развивает и актуализирует результаты [19].

Таким образом, актуальной задачей является анализ существующих открытых наборов данных, используемых в железнодорожных исследованиях, а также оценка их применимости для разработки интеллектуальных систем мониторинга и диагностики железнодорожной инфраструктуры.

Методы исследования. Для обеспечения прозрачности и воспроизводимости процедуры отбора исследований в настоящей работе используется подход, рекомендованный международным руководством PRISMA 2020 (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) [25].

Железнодорожная инфраструктура является критически важной системой транспортной безопасности. Современные методы ИИ активно внедряются для:

- обнаружения трещин рельсов;
- детекции препятствий;
- анализа состояния балласта;
- мониторинга контактной сети;
- предиктивной диагностики подвижного состава.

Ключевым фактором развития является наличие открытых, стандартизированных и масштабируемых датасетов. Цель исследования - систематически проанализировать существующие публичные датасеты ИИ для железнодорожных приложений.

2.1 Источники поиска

Поиск осуществлялся в следующих научных базах данных и репозиториях: IEEE Xplore, Scopus, Web of Science, Google Scholar, Kaggle, GitHub, Zenodo.

Ключевые поисковые запросы: “railway defect dataset”, “rail crack public dataset”, “railway computer vision dataset”, “rail track inspection dataset”.

2.2 Критерии включения

Включались датасеты, которые: 1) публично доступны; 2) используются для задач ИИ; 3) имеют аннотацию; 4) относятся к железнодорожной инфраструктуре. Сводные критерии включения и исключения приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Критерии включения и исключения

Критерии включения	Критерии исключения
Публикация относится к железнодорожной инфраструктуре	Проприетарные или закрытые датасеты
Используются методы искусственного интеллекта	Отсутствие описания структуры данных
Описан публично доступный датасет	Статьи без эмпирической проверки
Указаны характеристики данных (объём, формат, аннотация)	Дублирующие публикации
Доступна полнотекстовая версия статьи	Технические отчёты без научного рецензирования

2.3 Стратегия поиска

Поиск публикаций осуществлялся в период январь–март 2026 года в следующих научных базах данных: IEEE Xplore, Scopus, Web of Science Core Collection, ScienceDirect, SpringerLink, Google Scholar. Для поиска публичных датасетов дополнительно использовались: Kaggle, GitHub, Zenodo, Mendeley Data, IEEE DataPort. Данные источники кратко описаны в таблице 2.

Таблица 2 – Источники поиска

Репозиторий	Краткое описание	URL
Kaggle	Платформа для задач машинного обучения и размещения публичных датасетов, поддерживаемая Google	https://www.kaggle.com
IEEE DataPort	Репозиторий научных датасетов, поддерживаемый IEEE, включает рецензируемые наборы данных	https://ieee-dataport.org
Zenodo	Европейский открытый репозиторий научных публикаций и датасетов (поддержка CERN)	https://zenodo.org
Mendeley Data	Репозиторий исследовательских данных, связанный с Elsevier	https://data.mendeley.com
Figshare	Платформа для публикации научных данных и материалов исследований	https://figshare.com
Google Dataset Search	Поисковая система Google для обнаружения открытых датасетов	https://datasetsearch.research.google.com
Data.gov	Портал открытых данных правительства США	https://www.data.gov
Data.gov.uk	Портал открытых данных правительства Великобритании	https://data.gov.uk
European Data Portal	Портал открытых данных стран Европейского союза	https://data.europa.eu
OpenRail Data (UK)	Платформа открытых железнодорожных данных Великобритании (расписания, движение, API)	https://opendata.nationalrail.co.uk

Поисковая строка формировалась с использованием булевых операторов AND/OR:

(“railway” OR “rail track” OR “rail infrastructure”) AND (“dataset” OR “public dataset”) AND (“deep learning” OR “artificial intelligence” OR “computer vision”).

Дополнительно применялись уточняющие запросы: “rail crack dataset”, “rail defect segmentation dataset”, “railway intrusion dataset”, “railway LiDAR dataset”. Период публикаций: 2010–2026 гг. Язык публикаций: английский.

2.4 Процедура отбора исследований

Процедура отбора выполнялась в четыре этапа:

- Идентификация - первичный поиск по ключевым словам (n = 412).
- Удаление дубликатов - автоматическая фильтрация и ручная проверка (n = 326).
- Скрининг аннотаций - исключение нерелевантных работ (n = 118).
- Полнотекстовая оценка - анализ методологии и доступности данных (n = 54).

В итоговый обзор включено 30 научных публикаций.

Все включённые датасеты были распределены по четырём основным категориям:

1. Дефекты рельсов (поверхностные трещины, сколы, износ).
2. Обнаружение препятствий и вторжений.
3. LiDAR и 3D-сегментация инфраструктуры.
4. Вибрационная и акустическая диагностика.

Дополнительно проводилась классификация по уровню аннотации: Image-level labels (аннотации на уровне изображения), Bounding box (ограничивающая рамка), Pixel-wise segmentation (попиксельная сегментация), 3D semantic annotation (трёхмерная семантическая аннотация).

На основании описанной методологии в следующем разделе представлен детальный анализ выявленных публичных датасетов, их количественных характеристик и сравнительная классификация по типу задач и сенсоров.

Результаты исследований. В результате систематического поиска и отбора публикаций было выявлено 13 публичных датасетов, каждый из которых проверен по первоисточнику, применяемых для задач искусственного интеллекта в железнодорожной отрасли. Данные наборы используются для задач обнаружения дефектов рельсов, мониторинга инфраструктуры, обнаружения препятствий и анализа сенсорных данных. Полный перечень выявленных датасетов и их характеристики представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Публичные датасеты для железнодорожных приложений, выявленные в ходе систематического обзора

Датасет	Год	Тип данных	Основная задача	Объём данных	Источник
1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*
RailSem19	2019	RGB-изображения	семантическая сегментация ж/д сцены	~8500 изображений	Zendel et al. [17]
OSDaR23	2023	RGB + LiDAR + радар	мультимодальная сегментация/ детекция	45 последовательностей, ~204k кадров	Tagiew et al. [18]
Rail-5K	2021	RGB-изображения	детекция дефектов рельсов	5000 размеченных + 3000 неразмеченных	Zhang et al. [26]
SynRailObs	2025	синтетические RGB	детекция препятствий	~1000 изображений	Guo, Rambach [27]
OSDaR-AR	2026	RGB + LiDAR (AR-дополнение)	детекция препятствий, аугментация данных	18 дополненных последовательностей (2 камеры + LiDAR)	Nesti et al. [28]
RSDDs (Type I/II)	2014	RGB (Ч/Б)	Детекция /сегментация дефектов рельсов	195 изображений (67 + 128)	Niu et al. [29]
WHU-Railway3D	2024	LiDAR (облако точек)	семантическая сегментация инфраструктуры	~30 км, 4.6 млрд точек, 11 классов	Qiu et al. [30]
FRSign	2020	RGB-изображения	детекция/ распознавание сигналов	>100 000 изображений	Harb et al. [31]
GERALD	2023	RGB-изображения	детекция сигналов (Германия)	5000 изображений	Leibner et al. [32]

1	2	3	4	5	6
RailGoerl24	2025	RGB (Full HD) + LiDAR	детекция людей на путях	12 205 кадров, 33 556 аннотаций	Tagiew et al. [33]
SynDRA	2025	синтетические RGB	семантическая сегментация ж/д сцены	RGB-последовательности + карты сегментации	D'Amico et al. [34]
Railway Track Fault Detection	2022	RGB-изображения	классификация дефектов рельсов/креплений	383 изображения	Eunus et al. [35]
Augmented Ballast Dataset	2024	RGB-изображения (реальные + синтетические)	сегментация/оценка состояния балласта	многомерный агрегированный набор	Ding et al. [36]

3.1 Классификация датасетов по типу сенсоров

Для более детального анализа выявленных наборов данных была проведена их классификация по типу используемых сенсоров. Тип сенсорных данных является одним из ключевых факторов, определяющих возможности применения датасета в задачах искусственного интеллекта, поскольку он влияет на выбор архитектуры моделей машинного обучения, методы обработки данных и точность алгоритмов обнаружения и сегментации объектов.

В современных системах мониторинга железнодорожной инфраструктуры используются различные типы сенсоров, включая оптические камеры, лазерные сканеры (LiDAR), а также вибрационные и акустические датчики. RGB-камеры обеспечивают высокую детализацию изображений и широко применяются для задач компьютерного зрения, в то время как LiDAR позволяет получать трёхмерную информацию о геометрии инфраструктуры.

В рамках настоящего исследования все выявленные публичные датасеты были распределены по типу используемых сенсоров. Результаты классификации представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Классификация датасетов по типу сенсоров

Тип сенсора	Количество датасетов
RGB-изображения	9
LiDAR	1
Мультисенсорные данные (RGB + LiDAR/радар)	3

Анализ показывает, что большинство датасетов основаны на RGB-изображениях, поскольку камеры являются наиболее доступным и относительно недорогим источником данных для мониторинга железнодорожной инфраструктуры. Это объясняется высокой доступностью камерных систем и простотой сбора данных: RGB-камеры широко применяются в системах автоматической инспекции путей, поскольку позволяют фиксировать визуальные дефекты рельсов, состояние шпал, балластного слоя и других элементов инфраструктуры.

Видеопоток остаётся основным источником данных для задач, связанных с безопасностью – мониторинга переездов и поиска препятствий на путях, поскольку позволяет анализировать динамику сцены в момент возникновения угрозы.

Датасеты на основе LiDAR встречаются заметно реже, однако именно они рассматриваются как основной источник данных для построения точных 3D-моделей инфраструктуры: в отличие от камер, лидары обеспечивают точную пространственную геометрию, что критически важно при переходе от простого распознавания объектов к их картографированию и решению задач автономного управления.

Мультимодальные датасеты, объединяющие данные камер, LiDAR и инерциальных датчиков, представляют собой наиболее перспективное направление развития железнодорожных систем искусственного интеллекта, поскольку позволяют повысить устойчивость алгоритмов и точность обнаружения объектов и дефектов в сложных условиях эксплуатации.

3.2 Анализ датасетов по задачам искусственного интеллекта

Анализ выявленных наборов данных показал, что большинство железнодорожных датасетов разрабатываются для задач компьютерного зрения, связанных с обнаружением

дефектов инфраструктуры и мониторингом безопасности движения. Основными задачами искусственного интеллекта, для которых используются данные наборы данных, являются обнаружение объектов, семантическая сегментация, классификация и мультимодальный анализ.

Наиболее распространённой задачей является детекция объектов, применяемая для обнаружения посторонних предметов на путях, сигналов и людей в опасной зоне. Для решения таких задач широко используются алгоритмы глубокого обучения, включая архитектуры YOLO, Faster R-CNN и SSD.

Второй по распространённости задачей является семантическая сегментация, позволяющая проводить детальный анализ железнодорожной сцены на уровне пикселей или точек облака. Для данных задач используются архитектуры U-Net, DeepLabV3+ и специализированные сети для облаков точек.

Задачи классификации применяются преимущественно для оценки состояния железнодорожных элементов – например, определения степени износа рельсов или наличия дефекта на изображении. Мультимодальный анализ, объединяющий данные нескольких типов сенсоров, представлен пока небольшим числом датасетов, однако их доля постепенно растёт (табл. 5).

Таблица 5 – Классификация датасетов по задачам машинного обучения

Задача ИИ	Количество датасетов	Пример
Детекция объектов/дефектов	6	SynRailObs, RailGoerl24, Rail-5K
Сегментация	3	RailSem19, WHU-Railway3D, SynDRA
Классификация	2	Railway Track Fault Detection, Augmented Ballast Dataset
Мультимодальный анализ	2	OSDaR23, OSDaR-AR

Анализ выявленных датасетов показывает несколько ключевых тенденций. Во-первых, большинство доступных наборов данных ориентированы на задачи компьютерного зрения, такие как обнаружение дефектов рельсов и сегментация железнодорожных объектов, что объясняется высокой эффективностью методов глубокого обучения в обработке изображений. Во-вторых, наблюдается постепенный рост числа мультимодальных датасетов, включающих данные LiDAR и видео, что позволяет разрабатывать более устойчивые модели для автономных систем мониторинга. В-третьих, большинство существующих датасетов имеют относительно небольшой объём данных по сравнению с крупными компьютерными датасетами общего назначения, такими как ImageNet или COCO, что ограничивает возможности обучения глубоких нейронных сетей и снижает обобщающую способность моделей.

3.3 Ограничения существующих датасетов

Проведённый анализ позволил выявить несколько ключевых ограничений существующих публичных железнодорожных датасетов:

– Большинство наборов данных имеют ограниченный объём, что затрудняет обучение глубоких нейронных сетей и снижает точность моделей при работе с новыми данными; многие датасеты ориентированы только на один тип сенсорных данных, чаще всего RGB-изображения, в то время как современные системы мониторинга требуют мультимодальных данных.

– Отсутствие стандартизированных протоколов оценки и унифицированных benchmark-наборов данных усложняет объективное сравнение различных алгоритмов и моделей искусственного интеллекта.

– Часть датасетов содержит ограниченную или неполную аннотацию, что снижает возможности их использования для задач семантической сегментации или трёхмерного анализа инфраструктуры.

На основе полученных результатов в следующем разделе проводится обсуждение ключевых ограничений существующих железнодорожных датасетов и формулируются направления дальнейших исследований.

Обсуждение научных результатов. Проведённый систематический анализ публичных датасетов показал, что развитие методов искусственного интеллекта в железнодорожной отрасли тесно связано с доступностью качественных обучающих данных.

Несмотря на активный рост публикаций в области применения глубокого обучения для диагностики железнодорожной инфраструктуры, количество открытых и хорошо структурированных датасетов остаётся относительно ограниченным.

Одной из ключевых тенденций является доминирование датасетов, основанных на RGB-изображениях. Это связано с тем, что камеры являются наиболее доступным и широко используемым источником данных для мониторинга железнодорожных путей. Такие датасеты позволяют эффективно решать задачи обнаружения дефектов рельсов, сегментации инфраструктурных элементов и выявления препятствий на путях. Однако использование исключительно визуальных данных может ограничивать возможности анализа, особенно в условиях плохой освещённости, неблагоприятных погодных условий или при наличии скрытых дефектов.

Другой важной тенденцией является постепенное появление мультимодальных датасетов, включающих данные LiDAR, тепловизионных камер и других сенсорных систем. Такие наборы данных позволяют значительно расширить возможности анализа инфраструктуры и повышают надёжность алгоритмов искусственного интеллекта. Мультимодальный подход становится особенно важным для задач автономного управления железнодорожным транспортом и интеллектуальных систем поддержки машиниста.

Тем не менее проведённый анализ выявил ряд существенных ограничений существующих датасетов. Во-первых, многие наборы данных имеют относительно небольшой объём, что затрудняет обучение глубоких нейронных сетей и снижает способность моделей к обобщению. Во-вторых, значительная часть датасетов охватывает ограниченные географические регионы, что может влиять на универсальность разработанных алгоритмов. Кроме того, в большинстве случаев отсутствуют стандартизированные benchmark-наборы данных и унифицированные методики оценки моделей, что усложняет объективное сравнение алгоритмов и снижает воспроизводимость исследований.

Таким образом, дальнейшее развитие интеллектуальных систем мониторинга железнодорожной инфраструктуры требует создания крупных и разнообразных датасетов, включающих мультимодальные сенсорные данные, а также разработки единых стандартов аннотации и оценки моделей искусственного интеллекта.

Заключение. В данной работе представлен систематический обзор публичных датасетов искусственного интеллекта, применяемых для задач железнодорожных приложений. Обзор выполнен с использованием методологии PRISMA и включает анализ научных публикаций и открытых репозиториев данных.

В результате проведённого исследования было выявлено 13 публичных датасетов, используемых для задач обнаружения дефектов рельсов, мониторинга инфраструктуры, обнаружения препятствий и диагностики подвижного состава. Датасеты были классифицированы по типу сенсоров, типу аннотаций и задачам машинного обучения.

Анализ показал, что большинство существующих наборов данных основаны на RGB-изображениях и ориентированы на задачи компьютерного зрения, такие как детекция объектов и семантическая сегментация. При этом количество мультимодальных датасетов, включающих данные LiDAR и других сенсоров, постепенно увеличивается, что отражает современную тенденцию развития интеллектуальных транспортных систем.

В ходе исследования также были выявлены ключевые ограничения существующих датасетов, включая небольшой объём данных, дисбаланс классов, ограниченную географическую вариативность и отсутствие стандартизированных benchmark-протоколов.

Полученные результаты показывают необходимость разработки новых масштабируемых и мультимодальных датасетов для железнодорожных приложений. Создание таких наборов данных позволит повысить точность моделей искусственного интеллекта и ускорить внедрение интеллектуальных систем мониторинга и диагностики железнодорожной инфраструктуры.

В дальнейшем исследования могут быть направлены на формирование открытых международных benchmark-датасетов, объединяющих различные типы сенсорных данных, а также на разработку методов автоматизированной разметки данных для повышения эффективности подготовки обучающих выборок.

Список литературы

1. European Union Agency for Railways. Railway Safety Performance in the European Union 2022. – Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2022.
2. Papaelias M. A review on non-destructive evaluation of rails / M. Papaelias, C. Roberts, C. Davis // Insight -Non-Destructive Testing and Condition Monitoring. – 2008. – Vol. 50, № 7. – P. 367-373.
3. Goodfellow I. Deep Learning / I. Goodfellow, Y. Bengio, A. Courville. – Cambridge: MIT Press, 2016. – 775 p.
4. Rail surface defect detection method based on YOLOv3 deep learning networks / S. Yanan et al // 2018 Chinese Automation Congress (CAC). – IEEE, 2018. – P. 1563-1568. https://doi.org/10.1109/CAC.2018.8623082.
5. Ning S. Research on the method of foreign object detection for railway tracks based on deep learning / S. Ning, F. Ding, B. Chen // Sensors. – 2024. – Vol. 24, № 14. – Article 4483. https://doi.org/10.3390/s24144483.
6. Deep learning approach for automated railroad ballast condition evaluation / J. Luo et al // Proceedings of the 5th International Conference on Transportation Geotechnics (ICTG 2024). Lecture Notes in Civil Engineering. – Springer, 2025. – Vol. 402. – P. 49-57. https://doi.org/10.1007/978-981-97-8213-0_7.
7. A robust pantograph-catenary interaction condition monitoring method based on deep convolutional network / D. Zhang et al // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2020. – Vol. 69, № 5. – P. 1920-1929. https://doi.org/10.1109/TIM.2019.2920721.
8. Applications of machine learning to machine fault diagnosis: A review and roadmap / Y. Lei et al // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2020. – Vol. 138. – Article 106587. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.106587.
9. Deep convolutional neural networks for detection of rail surface defects / S. Faghih-Roohi et al // Proceedings of the 2016 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN). – IEEE, 2016. – P. 2584-2589. https://doi.org/10.1109/IJCNN.2016.7727522.
10. MCnet: Multiple context information segmentation network of no-service rail surface defects / D. Zhang et al // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2021. – Vol. 70. – Article 5004909. https://doi.org/10.1109/TIM.2020.3040890.
11. Deep residual learning for image recognition / K. He et al // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2016. – P. 770-778.
12. Ronneberger O. U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation / O. Ronneberger, P. Fischer, T. Brox // Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention. – Cham: Springer, 2015. – P. 234-241.
13. You Only Look Once: Unified, real-time object detection / J. Redmon et al // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2016. – P. 779-788.
14. Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks / S. Ren et al // Advances in Neural Information Processing Systems. – 2015. – Vol. 28.
15. Encoder-decoder with atrous separable convolution for semantic image segmentation / L.-C. Chen et al // Proceedings of the European Conference on Computer Vision. – 2018. – P. 801-818.
16. An image is worth 16x16 words: Transformers for image recognition at scale / A. Dosovitskiy et al // International Conference on Learning Representations. – 2021.
17. RailSem19: A Dataset for Semantic Rail Scene Understanding / O. Zendel et al // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops. – 2019.
18. OSDaR23: Open sensor data for rail 2023 / R. Tagiew et al // 2023 8th International Conference on Robotics and Automation Engineering. – IEEE, 2023. – P. 270-276.
19. A systematic review of artificial intelligence public datasets for railway applications / M.J. Pappaterra et al // Infrastructures. – 2021. – Vol. 6, № 9. – Article 136.
20. A survey on audio-video based defect detection through deep learning in railway maintenance / L. De Donato et al // IEEE Access. – 2022. – Vol. 10. – P. 65376-65400. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3183102.
21. Liu S. A review of applications of visual inspection technology based on image processing in the railway industry / S. Liu, Q. Wang, Y. Luo // Transportation Safety and Environment. – 2019. – Vol. 1, № 3. – P. 185-204. https://doi.org/10.1093/tse/tdz007.

22. Artificial intelligence in railway transport: Taxonomy, regulations and applications / N. Bešinović et al // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2022. – Vol. 23, № 9. – P. 14011-14024. https://doi.org/10.1109/TITS.2021.3131637.
23. ImageNet: A large-scale hierarchical image database / J. Deng et al // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2009. – P. 248-255.
24. Microsoft COCO: Common objects in context / T.-Y. Lin et al // Proceedings of the European Conference on Computer Vision. – Cham: Springer, 2014. – P. 740-755.
25. The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews / M. Page et al // BMJ. – 2021. – Vol. 372. – Article n71.
26. Rail-5k: A real-world dataset for rail surface defects detection / Z. Zhang et al // arXiv preprint. – 2021. – arXiv:2106.14366.
27. Guo Q. SynRailObs: A synthetic dataset for obstacle detection in railway scenarios / Q. Guo, J. Rambach // arXiv preprint. – 2025. -arXiv:2505.10784.
28. OSDaR-AR: Enhancing Railway Perception Datasets via Multi-modal Augmented Reality / F. Nesti et al // arXiv preprint. – 2026. – arXiv:2602.22920.
29. Unsupervised saliency detection of rail surface defects using stereoscopic images / M. Niu et al // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2021. – Vol. 17, № 3. – P. 2271-2281.
30. WHU-Railway3D: A diverse dataset and benchmark for railway point cloud semantic segmentation / B. Qiu et al // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2024. – Vol. 25. – P. 20900-20916.
31. FRSign: A large-scale traffic light dataset for autonomous trains / J. Harb et al // arXiv preprint. – 2020.
32. Leibner P. GERALD: A novel dataset for the detection of German mainline railway signals / P. Leibner, F. Hampel, C. Schindler // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. – 2023.
33. RailGoerl24: Görlitz Rail Test Center CV Dataset 2024 / R. Tagiew et al // arXiv preprint. – 2025. – arXiv:2504.00204.
34. SynDRA: Synthetic dataset for railway applications / G. D'Amico et al // 2025 IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision. – IEEE, 2025. – P. 3437-3446.
35. Eunus S.I. Railway Track Fault Detection [Electronic resource] / S.I. Eunus, S. Hossain, A.E.M. Ridwan // Kaggle Dataset. – 2022. https://www.kaggle.com/datasets/salmaneunus/railway-track-fault-detection (accessed: 09.07.2026).
36. Augmented dataset for vision-based analysis of railroad ballast via multi-dimensional data synthesis / K. Ding et al // Algorithms. – 2024. – Vol. 17, № 8. – Article 367.

Финансирование. *Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP25796503).*

G.K. Abisheva, B.Sh. Razakhova, T.A. Aidynov*, M.K. Saparbek
L.N. Gumilyov Eurasian National University,
10000 Kazakhstan, Astana city, 2 Satbaev st.
*e-mail: tolegen.ch@gmail.com

RESEARCH OF PUBLIC ARTIFICIAL INTELLIGENCE DATASETS FOR RAILWAY APPLICATIONS

The development of artificial intelligence (AI) technologies in the railway industry directly depends on the availability of high-quality and representative public datasets. This article provides a systematic analysis of open datasets used for the tasks of rail defect detection, contact network diagnostics, rolling stock monitoring and railway infrastructure safety. The analysis was conducted following the PRISMA methodology: the search covered IEEE Xplore, Scopus and Web of Science, as well as the Kaggle, GitHub and Zenodo repositories. In total, 30 key publications and 13 open datasets were analysed and classified by sensor type (RGB, LiDAR, vibration, multi-sensor), machine learning task (detection, segmentation, classification), data volume and annotation format. The analysis shows that most datasets are based on RGB images, while the share of multimodal datasets is gradually increasing. Key limitations of existing datasets were identified -small sample size, class imbalance, limited geographical variability and the absence of unified benchmark protocols and directions for further research were defined. The results highlight the need to create large multimodal datasets and to develop unified standards for the annotation and evaluation of AI models.

Key words: *railway dataset, artificial intelligence, computer vision, rail defect detection, PRISMA, deep learning.*

Г.К. Абишева, Б.Ш. Разахова, Т.А. Айдынов*, М.К. Сапарбек
Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия Ұлттық Университеті,
10000 Қазақстан, Астана қ., Сәтбаев к-сі, 2
*e-mail: tolegen.ch@gmail.com

ТЕМІРЖОЛ ҚОСЫМШАЛАРЫНА АРНАЛҒАН ҚОҒАМДЫҚ ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ДЕРЕКТЕРІН ЗЕРТТЕУ

Теміржол саласында жасанды интеллект (ЖИ) технологияларының дамуы сапалы әрі репрезентативті ашық деректер жиынтықтарының болуына тікелей байланысты. Мақалада рельс ақауларын анықтау, контакт желісін диагностикалау, жылжымалы құрам мониторингі және теміржол инфрақұрылымының қауіпсіздігін қамтамасыз ету міндеттері үшін қолданылатын ашық деректер жиынтықтарына жүйелі талдау жасалған. Шолу PRISMA әдіснамасы негізінде орындалды: іздеу IEEE Xplore, Scopus, Web of Science дереккөздерінде, сондай-ақ Kaggle, GitHub және Zenodo репозиторийлерінде жүргізілді. Барлығы 30 негізгі басылым және 13 ашық датасет талданып, олар сенсор түрі (RGB, LiDAR, вибрациялық, мультисенсорлық), машиналық оқыту міндеті (детекция, сегментация, классификация), деректер көлемі және аннотация форматы бойынша жіктелді. Талдау көрсеткендей, датасеттердің басым бөлігі RGB-кескіндерге негізделген, ал мультимодальды датасеттердің үлесі біртіндеп артып келеді. Қолданыстағы датасеттердің негізгі шектеулері -іріктеме көлемінің аздығы, кластар теңгерімсіздігі, географиялық вариативтіліктің шектеулілігі және бірыңғай benchmark-хаттамалардың болмауы анықталып, әрі қарайғы зерттеу бағыттары ұсынылды. Алынған нәтижелер ірі мультимодальды деректер жиынтықтарын құру және ЖИ модельдерін аннотациялау мен бағалаудың бірыңғай стандарттарын әзірлеу қажеттілігін көрсетеді.

Түйін сөздер: *теміржол, жасанды интеллект, датасет, компьютерлік көру, рельс ақауы, сегментация, YOLO, U-Net.*

Авторлар туралы мәліметтер

Гульсипат Кайыргаликызы Абишева – жасанды интеллект технологиялары кафедрасының докторанты, Л.Н. Гумилев Атындағы Еуразия Ұлттық Университеті, Астана қ., Қазақстан; e-mail: gulsipat.abisheva@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-6692-197X.

Бибигул Шамшановна Разахова – т.ғ.к., жасанды интеллект технология кафедрасының басқарушысы, Л.Н. Гумилев Атындағы Еуразия Ұлттық Университеті, Астана қ., Қазақстан; e-mail: razakhova_bsh@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8152-8661.

Төлеген Айдынұлы Айдынов* – хат-хабар авторы, ақпараттық қауіпсіздік кафедрасының докторанты, Л.Н. Гумилев Атындағы Еуразия Ұлттық Университеті, Астана қ., Қазақстан; e-mail: tolegen.ch@gmail.com. ORCID: http://orcid.org/0009-0005-3327-9719.

Минира Қайырғалиқызы Сапарбек – жасанды интеллект технологиялары кафедрасының магистранты, Л.Н. Гумилев Атындағы Еуразия Ұлттық Университеті, Астана қ., Қазақстан; e-mail: sapminira@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-0334-0910.

Сведения об авторах

Гульсипат Кайыргаликызы Абишева – докторант кафедры искусственного интеллекта Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан; e-mail: gulsipat.abisheva@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-6692-197X.

Бибигул Шамшановна Разахова – к.т.н., заведующий кафедрой технологий искусственного интеллекта Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан; e-mail: razakhova_bsh@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8152-8661.

Төлеген Айдынұлы Айдынов* – корреспондент автор, докторант кафедры информационной безопасности Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан; e-mail: tolegen.ch@gmail.com. ORCID: http://orcid.org/0009-0005-3327-9719.

Минира Кайыргаликызы Сапарбек – магистрант кафедры искусственного интеллекта Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан; e-mail: sapminira@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-0334-0910.

Information about the authors

Gulsipat Abisheva – doctoral student of the Department of artificial intelligence, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; e-mail: gulsipat.abisheva@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-6692-197X.

Bibigul Razakhova – c.t.s., Head of the Department of Artificial Intelligence Technologies, L.N. Gumilev Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; e-mail: razakhova_bsh@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8152-8661.

Tolegen Aidynov* – doctoral student of the Department of Information Security, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; e-mail: tolegen.ch@gmail.com. ORCID: http://orcid.org/0009-0005-3327-9719.

Minira Saparbek – master of the Department of artificial intelligence, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; e-mail: sapminira@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-0334-0910.

Поступила в редакцию 19.07.2026
Поступила после доработки 29.08.2026
Принята к публикации 01.09.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-23

CC BY 4.0
Check for updates

IRSTI: 28.23.02

K.E. Iklassova[1]*, L.N. Abdullah[2], M.Zh. Bazarova[3]
[1]M. Kozybayev North Kazakhstan University,
150000, Republic of Kazakhstan, Petropavllovsk, Pushkina Str, 86
[2]Putra University of Malaysia, Malaysia, Serang, Selangor, 43400 Seri Kembangan
[3]Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University,
070002, Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk, 30th Gvardeiskoy Divisii Str, 34
*e-mail: keiklasova@ku.edu.kz

ASSESSMENT OF INSTITUTIONAL DATA HETEROGENEITY FOR ARTIFICIAL INTELLIGENCE SYSTEMS

Abstract: *This study quantifies institutional heterogeneity in digital engagement and academic outcomes using anonymized data from Kazakhstani schools, comprising records from two EdTech platforms (Twig-bilim.kz, BilimLand.kz) and entry diagnostic test scores. Applying one-way ANOVA/intraclass correlation (ICC) decomposition and random-intercept mixed-effects modeling, we find that school membership explains 8.8-9.8% of variance in digital platform engagement and 30.0-30.7% of variance in entry test scores, with close numerical agreement between the ANOVA-based variance shares and the mixed-effects ICC estimates. These estimates indicate non-negligible school-level heterogeneity, particularly for entry diagnostic-test scores. The findings indicate that pooled, school-agnostic machine learning models risk systematically miscalibrated predictions for students in schools that deviate from the national average, and argue for school-aware calibration in the design of AI-based early-warning and adaptive-learning systems intended to support flexible and equitable access to education. The results are discussed in relation to Kazakhstan's ongoing school digitalization initiatives and to the broader literature on algorithmic fairness in education.*

Key words: *artificial intelligence, learning analytics, institutional heterogeneity, intraclass correlation, multilevel modeling, algorithmic fairness, educational data mining.*

Introduction

The development of artificial intelligence (AI) in education – from early warning systems to adaptive personalized-learning platforms – is increasingly regarded as an important means of improving the flexibility and accessibility of education. Recent systematic reviews indicate that generative AI, intelligent tutoring systems, and learning analytics are increasingly positioned as technologies capable of transforming personalized learning from a static, uniform model into an adaptive, data-driven process that supports dynamic learning pathways [1].

©K.E. Iklassova, L.N. Abdullah, M.Zh. Bazarova, 2026

At the same time, Kazakhstan – a country in which education digitalization is a national prioritycontinues to face disparities in digital infrastructure between urban and rural schools. Empirical evidence from a nationally representative teacher sample shows that the digital-access divide narrows when schools provide teachers with ICT resources; internet quality and rural-urban location are also significantly associated with the use of synchronous digital tools [2]. More recent public reporting continues to highlight uneven infrastructure and digital readiness, raising the risk that AI deployment may reproduce rather than reduce existing educational inequalities [3].

This creates a methodological issue for AI-based learning-support systems: when educational data are analyzed using pooled models without explicitly accounting for school membership, their hierarchical structure may be overlooked. Students are nested within schools that may differ in digital readiness and other contextual characteristics. Multilevel modeling explicitly represents this institutional level, and the intraclass correlation coefficient (ICC) quantifies the proportion of outcome variance attributable to between-cluster differences. Ignoring clustering can distort standard errors and statistical inference for individual-level associations [4].

Study [5] applies school-level random-intercept multilevel models to examine the relationship between institutional AI readiness and student AI literacy, using an unconditional multilevel model to quantify between-institution variance before adding higher-level predictors. This supports the methodological relevance of multilevel analysis in contemporary AIED research. However, such work has largely focused on large national survey or linked administrative datasets rather than behavioral logs from EdTech platforms in an emerging digital ecosystem.

A systematic mapping study of machine-learning fairness in education identifies a growing but fragmented research landscape in which unfairness may arise both from pre-existing structural inequalities and from algorithmic decisions that reproduce or amplify them [6]. Particularly relevant is [7], which uses the Open University Learning Analytics Dataset (OULAD) and reports institutional data as the strongest contributor to measured model discrimination among the examined data-source categories, followed by VLE activity data, with assessment data contributing less. This provides direct empirical evidence that institutional information can be a material source of systematic bias in educational AI models.

A recent study [8] directly audits intersectional fairness across gender and rural–urban location in an academic early warning system. The study demonstrates that aggregate performance can conceal substantial subgroup disparities and that fairness post-processing changes error trade-offs across intersectional groups. It is a relevant example of explicitly testing geographic and demographic inequality in an EWS; however, it is based on a single Moroccan region and does not establish whether comparable institutional effects generalize to other national settings, including post-Soviet Central Asia.

The scoping review of adaptive mechanisms for learning management systems [9] synthesizes adaptive-learning approaches and shows that the literature is predominantly learner-centered, with adaptation driven mainly by individual characteristics, behavior, or performance. Institutional context is rarely treated as an explicit clustering level in the design or evaluation of adaptive mechanisms. This supports the gap addressed here: school or institution membership is seldom modeled explicitly when assessing the performance or potential bias of adaptive systems.

The updated systematic review of personalized learning in the AI era [1] confirms that personalization is increasingly conceptualized as a flexible, data-driven process. Nevertheless, the literature remains centered primarily on learner-level personalization, terminology, privacy, bias, and ethical issues rather than on heterogeneity in the institutional environments in which AI-enabled learning systems are deployed.

Studies of digitalization in Kazakhstan’s higher education sector report persistent institutional barriers and uneven readiness despite expanded access to digital technologies [10]. Evidence from secondary education during pandemic-era online learning similarly documents rural–urban and regional disparities in access, experience, and technological conditions [11]. These studies, however, rely primarily on survey or self-reported data rather than behavioral logs from EdTech platforms and do not quantify the magnitude of school-level variance using multilevel variance decomposition. The scale of the institutional effect in operational educational data therefore remains insufficiently established.

In 2026, Kazakhstan announced the Qazaq Digital Mektebi pilot, intended to reduce disparities in educational quality between rural and urban schools through the use of AI-supported teaching

approaches [12]. Thus, policy decisions concerning the scaling of AI in schools are already being made, while open empirical evidence quantifying institutional heterogeneity for the calibration and evaluation of such systems remains limited.

The reviewed literature points to three intersecting gaps relevant to the present study. First, multilevel variance decomposition and ICC estimation are not consistently incorporated as diagnostic tools when the suitability of educational data for pooled AI models is assessed. Second, educational algorithmic-fairness studies more commonly examine individual-level attributes than institutional or geospatial heterogeneity. Third, the cited literature on Kazakhstan documents digital inequalities primarily through survey-based or descriptive evidence, while quantitative estimates of school-level heterogeneity based on behavioral EdTech logs remain limited. Against this background, the present study estimates the magnitude of between-school heterogeneity and examines its implications for AI-system design.

To quantify the magnitude of institutional (between-school) heterogeneity in digital engagement and learning outcomes using operational data from Kazakhstani schools and to assess its relevance to the calibration and validation of AI-based learning-support systems. Research Objectives: 1) To conduct descriptive and statistical analyses of between-school variation in students' digital activity on educational platforms. 2) To analyze between-school variation in entry diagnostic-test results and compare the magnitude of the institutional effect with that observed for digital activity. 3) To estimate school-level variance components using random-intercept mixed-effects models and compare them with ANOVA-based variance shares. 4) To formulate practical implications of the identified institutional heterogeneity for the design of early warning and adaptive-learning AI systems. 5) To relate the findings to the broader context of the digital divide in Kazakhstan and current school-digitalization initiatives.

Research Methods

The empirical dataset is an anonymized institutional extract of user activity and student test results from Kazakhstani schools. It contains three worksheets: (1) "BC tests," comprising entry diagnostic-test results for Grades 3-4 and functional-literacy test results; (2) "Twig," containing counts of student visits to Twig-bilim.kz; and (3) "BilimLand," containing analogous activity data for BilimLand.kz. Records are identified only by anonymized school_id and user_id codes; the extract contains no directly identifying personal data. A key limitation is that the school_id sets in the testing worksheet and the platform-activity worksheets do not overlap (zero shared school_id values). Digital-activity and academic-outcome measures therefore refer to different school subsamples and are analyzed as separate case studies (Table I).

Table 1 – Structure of the analyzed data subsamples

Subsample	N observations	N students	N schools	Outcome
Digital activity (Twig+BilimLand)	1784	1784	22	Total visits
Entry diagnostic tests	743	495	52	Score, %
Functional literacy (illustrative)	257	95	3	Score, %

The analysis was conducted in Python 3 using Google Colab, with the source file uploaded by the analyst. Tabular data processing used pandas [13]; statistical testing used scipy.stats; mixed-effects modeling used statsmodels [14]; and visualization used matplotlib and seaborn. The code was organized into reproducible modules.

Because the distribution of platform-visit counts was strongly right-skewed, a logarithmic transformation was used for statistical analysis of activity:

$$y' = \ln(1 + visits) \quad (1)$$

Between-school heterogeneity was quantified using two complementary approaches.

(a) One-way ANOVA with the proportion of total sum of squares attributable to between-school differences (η^2):

$$\eta^2 = SSbetween / (SSbetween + SSwithin) \quad (2)$$

(b) A school-level random-intercept mixed-effects model estimated by restricted maximum likelihood (REML):

$$Y_{ij} = \beta_0 + u_j + \varepsilon_{ij} \quad (3)$$
$$u_j \sim N(0, \sigma^2_b), \ \varepsilon_{ij} \sim N(0, \sigma^2_w)$$

where Yij is the outcome for student i in school j; β0 is the overall fixed intercept; uj is the random school effect; and εij is the residual error. The model-based ICC is:

$$ICC = \sigma^2_b / (\sigma^2_b + \sigma^2_w) \quad (4)$$

1) The study is cross-sectional and does not support causal inference. 2) Platform activity and test outcomes come from non-overlapping school subsamples. 3) The functional-literacy subsample (three schools) is illustrative only. 4) Schools with n < 3 were excluded from comparisons of school mean scores. 5) The extract is not guaranteed to constitute a nationally representative sample of Kazakhstani schools.

Results

Analysis of the combined Twig-bilim.kz and BilimLand.kz data (N = 1,784 students, 22 schools) yielded a mean of 24.64 visits (SD = 67.29) with pronounced right skew. School-level means ranged from 7.2 to 86.6 visits, a twelvefold difference. To examine the between-school structure of digital engagement in greater detail, the distribution of log-transformed platform activity was compared across the 22 schools. As shown in Fig. 1, both the central tendency and dispersion of student activity vary across schools. The logarithmic scale reduces the influence of the strongly right-skewed visit distribution while preserving visible differences in school-level activity patterns.

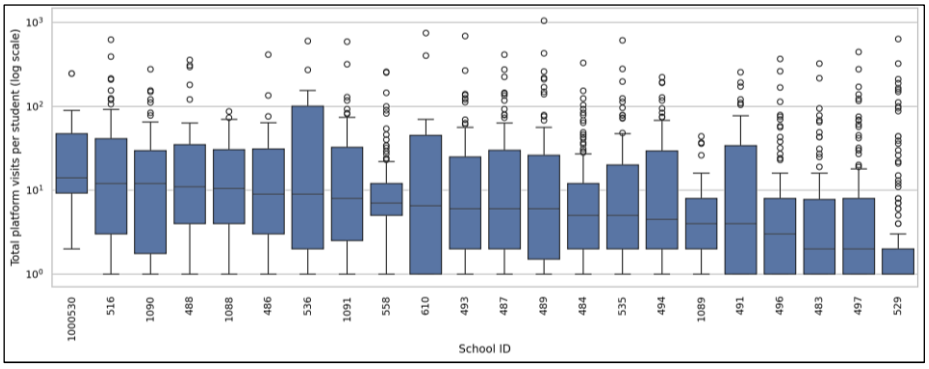


Fig. 1 – Distribution of student digital activity across schools (log scale)

To complement the distributional comparison, school-level mean activity was estimated together with 95% confidence intervals. Fig. 2 shows substantial variation in the average number of platform visits across schools, with school means ranging from 7.2 to 86.6 visits. The confidence intervals also reflect differences in within-school variability and sample size, providing a descriptive representation of the institutional heterogeneity subsequently quantified by the ANOVA-based variance share and the mixed-effects model.

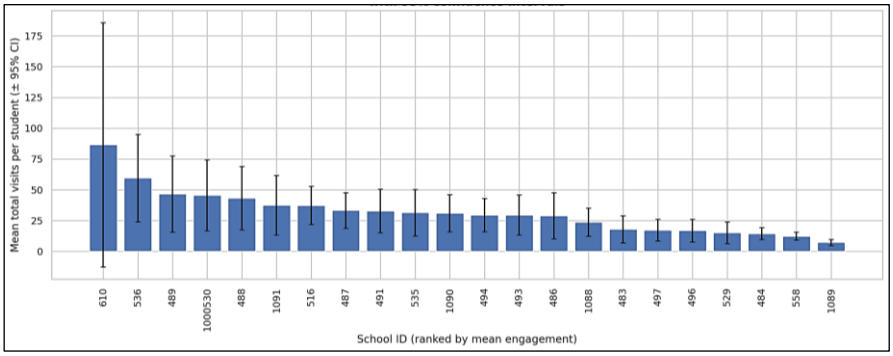


Fig. 2 – Mean number of visits by school with 95% confidence intervals

ANOVA on the log-transformed variable yielded F = 9.17, p = 5.75 × 10^{-28}, with an ANOVA-based between-school variance share η² = 0.098. The mixed-effects model yielded σ²b = 0.153 and σ²w = 1.597, corresponding to ICC = 0.088. The two complementary measures therefore indicate a similar magnitude of school-level heterogeneity.

Analysis of entry diagnostic tests (N = 743 records, 495 students, 52 schools) revealed substantially greater between-school variation. The overall mean score was 79.0%, while school means ranged from 26.0% to 95.0%, a gap of 69 percentage points. The between-school variation

in academic outcomes is further illustrated in Fig. 3, which presents the distribution of entry diagnostic-test scores for schools with at least three observations. The figure reveals marked differences in both school-level central tendencies and within-school score distributions, indicating that the overall mean of 79.0% masks considerable institutional variation

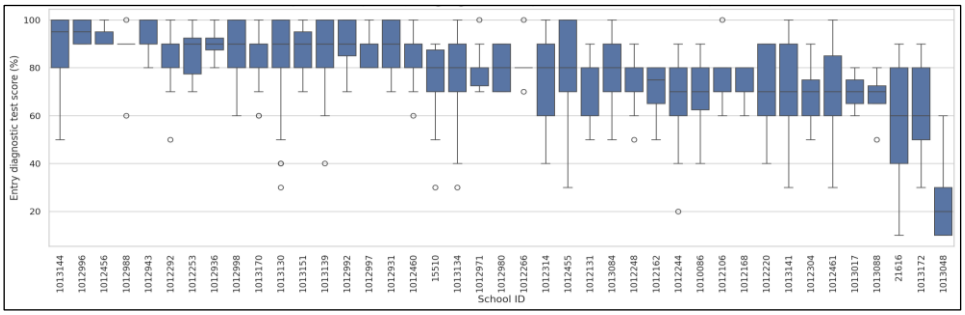


Fig. 3 – Entry diagnostic-test scores by school (n ≥ 3)

Because estimates of school-level means may be sensitive to the number of tested students, the relationship between school sample size and mean diagnostic-test performance was examined separately. As shown in Fig. 4, smaller schools exhibit greater dispersion in their mean scores, forming a visible funnel-like pattern. However, deviations from the overall mean are also observed among several schools with larger samples, suggesting that differences in sample size alone are unlikely to account for all of the observed between-school variation.

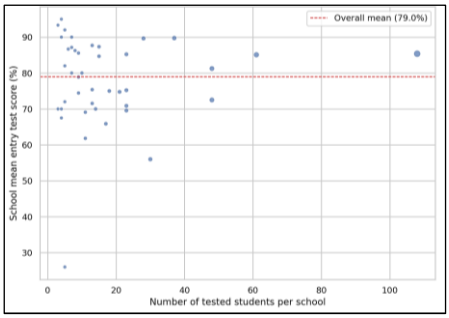


Fig. 4 – School mean score versus number of tested students

ANOVA yielded $F = 6.76$, $p = 5.97 \times 10^{-32}$, with $\eta^2 = 0.307$. The mixed-effects model yielded $\sigma^2 b = 99.71$ and $\sigma^2 w = 232.80$, corresponding to ICC = 0.300. Schools with $n < 10$ show wider dispersion, consistent with a funnel pattern; however, several larger schools ($n > 60$) also remain visibly displaced from the overall mean, indicating that the observed between-school differences cannot be attributed solely to small-sample variability.

The functional-literacy subsample (N = 257 records, 95 students, 3 schools) yielded an ANOVA-based between-school variance share $\eta^2 = 0.122$ ($F = 17.69$; $p = 6.43 \times 10^{-8}$). Although the functional-literacy subsample contains only three schools and is therefore insufficient for generalizable inference, it provides an additional descriptive view of institutional variation across assessment domains. Fig. 5 presents functional-literacy scores by school and domain, illustrating differences in score distributions across the three institutions. Given the limited number of schools, this result is treated as illustrative and is not used as primary evidence for the study's conclusions.

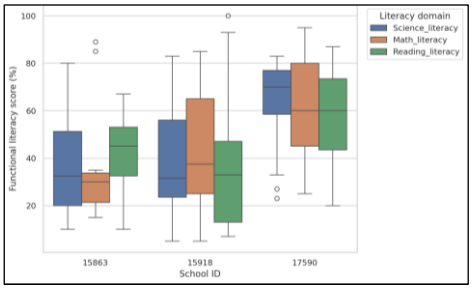


Fig. 5 – Functional-literacy scores by school and domain (three schools)

To compare the magnitude of between-school heterogeneity across the analyzed outcomes, the estimated variance measures are summarized in Fig. 6. The strongest institutional clustering is observed for entry diagnostic-test scores, for which the ANOVA-based between-school variance share reaches $\eta^2 = 0.307$ and the mixed-effects ICC is 0.300. Digital activity shows a smaller but non-negligible between-school component ($\eta^2 = 0.098$; ICC = 0.088), whereas the functional-literacy estimate ($\eta^2 = 0.122$) should be interpreted cautiously because it is based on only three schools.

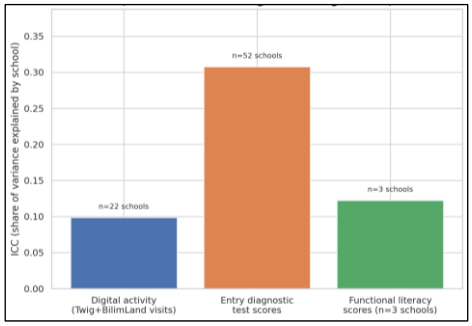


Fig. 6 – Comparison of between-school variance measures across the three outcomes

The numerical results underlying this comparison are summarized in Table 2. For both primary outcomes, the ANOVA-based between-school variance shares and the ICC estimates obtained from the random-intercept models are numerically close: $\eta^2 = 0.098$ versus ICC = 0.088 for digital activity, and $\eta^2 = 0.307$ versus ICC = 0.300 for entry diagnostic-test scores. Although η^2 and ICC are not identical statistical estimands, their close numerical agreement provides convergent evidence of between-school heterogeneity in both analyzed subsamples.

Table 2 – Summary statistical results. $H^2(a)$ – anova-based variance share; icc(m) – mixed-effects icc. * – illustrative subsample

Outcome	N schools	$\eta^2(A)$	ICC(M)	F	p
Digital activity	22	0,098	0,088	9,17	5,75e-28
Entry tests	52	0,307	0,300	6,76	5,97e-32
Functional literacy*	3	0,122	—	17,69	6,43e-8

The functional-literacy result is reported separately as an illustrative estimate because the corresponding subsample includes only three schools.

Discussion

The results provide a quantitative answer to the question posed in the Introduction: institutional heterogeneity in these Kazakhstani educational data is statistically significant and substantively non-negligible. Hedges and Hedberg [15] report substantial variation in school-level ICCs across educational outcomes and grade levels, supporting the need to account for clustering in educational research. In the present data, the mixed-model ICC is 0.088 for digital activity and 0.300 for entry diagnostic-test scores, indicating considerably stronger school-level clustering for academic outcomes than for platform engagement.

The close numerical agreement between the ANOVA-based variance shares ($\eta^2 = 0.098$ and 0.307) and the mixed-model ICCs (0.088 and 0.300) provides convergent evidence of between-school heterogeneity. Because η^2 and ICC are related but not identical estimands, their agreement is interpreted as complementary evidence rather than as replication by two independent ICC estimators.

The observed institutional effect is consistent with the broader literature on digital inequality in Kazakhstan at both higher-education [10] and secondary-school levels [2], [11]. The present study extends that literature by expressing institutional heterogeneity as a quantitative variance component in operational educational data. From an AI-design perspective, the findings are also consistent with [7], which identifies institutional data as an important source of measured algorithmic bias in OULAD-based student-progress models, and with [8], which shows that EWS error rates can differ across rural–urban and gender intersections. Because the present samples are not nationally representative and are not linked across outcomes, the magnitude observed here should not be interpreted as a national benchmark.

The practical implication is that school membership should be considered explicitly during model development and validation. A non-zero school-level ICC indicates statistical dependence among observations within schools and provides a reason to test whether pooled models generalize and calibrate consistently across institutions. The present analysis does not train or compare pooled and school-aware predictive models; therefore, any improvement in predictive accuracy or calibration from school-aware modeling remains to be established in subsequent validation studies.

The non-overlapping subsamples prevented testing the student-level relationship between platform activity and academic outcomes. The functional-literacy subsample includes only three schools and cannot support generalization. The study is cross-sectional and does not permit causal inference. The institutional extract is not known to be nationally representative. In addition, the study quantifies clustering but does not directly evaluate predictive-model calibration or fairness metrics across schools.

Conclusion

The analysis confirms substantial institutional heterogeneity in the examined Kazakhstani educational data. For digital engagement, the ANOVA-based between-school variance share is 0.098 and the mixed-model ICC is 0.088; for entry diagnostic-test scores, the corresponding values are 0.307 and 0.300. Thus, school-level clustering is markedly stronger for academic outcomes than for platform engagement, and the magnitude is similar across the two complementary variance-decomposition approaches.

These findings support treating institutional clustering as a design and validation consideration for AI-based learning-support systems in the studied Kazakhstani context, rather than assuming a priori that a single pooled model will perform uniformly across schools. Given ongoing school-digitalization initiatives, including the announced Qazaq Digital Mektebi pilot [12], school-level variance diagnostics may be incorporated into model-development and evaluation workflows before large-scale deployment.

Future research should: 1) obtain school geolocation or rural–urban indicators to test geospatial-fairness hypotheses; 2) collect linked platform-activity and outcome data for the same students and schools; 3) validate the estimated ICCs in a nationally representative sample; and 4) directly compare pooled and school-aware predictive models using calibration and fairness metrics.

References

1. Khalifeh F. Redefining personalized learning in the artificial intelligence era: An updated systematic review from 2019 to 2025 / F. Khalifeh, R. Santiago, R. Palau // Smart Learning Environments. – 2026. – Vol. 13. – Art. 19. https://doi.org/10.1186/s40561-026-00440-6.
2. The impact of the digital divide on synchronous online teaching in Kazakhstan during COVID-19 school closures / A. Amirova et al // Frontiers in Education. – 2023. – Vol. 7. – Art. 1083651. https://doi.org/10.3389/feduc.2022.1083651.
3. How artificial intelligence transforms education in Kazakhstan // The Astana Times. – 2026. – 7 January. https://astanatimes.com/2026/01/how-artificial-intelligence-transforms-education-in-kazakhstan/ (date of access: 02.09.2026).
4. Raudenbush S.W. Hierarchical Linear Models: Applications and Data Analysis Methods / S.W. Raudenbush, A.S. Bryk. – 2nd ed. – Thousand Oaks, CA: Sage Publications, 2002.
5. From school AI readiness to student AI literacy: A national multilevel mediation analysis of institutional capacity and teacher capability / X. Guan et al // arXiv. – 2026. – arXiv:2603.20056. – https://doi.org/10.48550/arXiv.2603.20056.
6. To N.P. Fairness for machine learning software in education: A systematic mapping study / N.P. To, P.N. Hung, A. NguyenDuc // SSRN. – 2024. https://doi.org/10.2139/ssrn.4713827.
7. Idowu J.A. Investigating algorithmic bias in student progress monitoring / J.A. Idowu, A.S. Koshiyama, P. Treleaven // Computers and Education: Artificial Intelligence. – 2024. – Vol. 7. – Art. 100267. https://doi.org/10.1016/j.caeai.2024.100267.
8. El Jihaoui M. Towards a fair and transparent early warning system for identifying students at risk of academic failure / M. El Jihaoui, O.E.K. Abra, K. Mansouri // Frontiers in Education. – 2026. – Vol. 11. – Art. 1878686. https://doi.org/10.3389/feduc.2026.1878686.
9. Adaptive learning mechanisms for learning management systems: A scoping review and practical considerations / S. Kucharski et al // arXiv. – 2025. – arXiv:2512.18383.
10. The role of digital technologies in higher education institutions: The case of Kazakhstan / D. Nurtayeva et al // Problems and Perspectives in Management. – 2024. – Vol. 22, № 1. – P. 562-577. https://doi.org/10.21511/ppm.22(1).2024.45.

11. COVID-19 online learning challenges: Kazakhstan secondary schools case study / S. Nurgaliyeva et al // Frontiers in Education. – 2024. – Vol. 9. – Art. 1448594. https://doi.org/10.3389/feduc.2024.1448594.
12. Pokidaev D. Kazakhstan to launch digital schools project / D. Pokidaev // The Times of Central Asia. – 2026. – 2 April. https://timesca.com/kazakhstan-to-launch-digital-schools-project/ (date of access: 02.09.2026).
13. McKinney W. Data structures for statistical computing in Python / W. McKinney // Proceedings of the 9th Python in Science Conference (SciPy 2010). – 2010. – P. 56-61. https://doi.org/10.25080/Majora-92bf1922-00a.
14. Seabold S. Statsmodels: Econometric and statistical modeling with Python / S. Seabold, J. Perktold // Proceedings of the 9th Python in Science Conference (SciPy 2010). – 2010. – P. 92-96. https://doi.org/10.25080/Majora-92bf1922-011.
15. Hedges L.V. Intraclass correlation values for planning group-randomized trials in education / L.V. Hedges, E.C. Hedberg // Educational Evaluation and Policy Analysis. – 2007. – Vol. 29, № 1. – P. 60-87. https://doi.org/10.3102/0162373707299706.

Funding

This research is funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant № AP23488869)

К.Е. Икласова[1*], Л.Н. Абдулла[2], М.Ж. Базарова[3]
[1]Северо-Казахстанский университет имени М. Козыбаева,
150000, Республика Казахстан, г. Петропавловск, ул. Пушкина, 86
[2]Университет Путра Малайзия, Малайзия, Серданг, Селангор, 43400 Сери Кембанган
[3]Восточно-Казахстанский университет имени С. Аманжолова,
070002, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск, ул. 30-й Гвардейской дивизии, 34
*e-mail: keiklasova@ku.edu.kz

ОЦЕНКА ИНСТИТУЦИОНАЛЬНОЙ ГЕТЕРОГЕННОСТИ ДАННЫХ ДЛЯ СИСТЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

В работе количественно оценивается институциональная гетерогенность цифровой вовлечённости и учебных результатов на анонимизированных данных школ Казахстана, включающих записи двух EdTech-платформ (Twig-bilim.kz, BilimLand.kz) и баллы входного диагностического тестирования. С помощью однофакторного ANOVA/декомпозиции коэффициента внутриклассовой корреляции (ICC) и многоуровневого моделирования со случайным пересечением показано, что принадлежность к школе объясняет 8,8-9,8% дисперсии цифровой вовлечённости и 30,0-30,7% дисперсии баллов входного тестирования, при этом ANOVA-оценки доли межшкольной дисперсии и ICC из модели смешанного влияния численно близки. Полученные оценки указывают на содержательно заметную межшкольную гетерогенность, особенно для результатов входного диагностического тестирования. Результаты показывают, что институциональную кластеризацию следует явно учитывать при оценке калибровки и обобщающей способности моделей машинного обучения между школами с различающимися распределениями результатов, и обосновывают необходимость валидации при проектировании ИИ-систем раннего предупреждения и адаптивного обучения, призванных поддерживать гибкий и справедливый доступ к образованию. Результаты обсуждаются в контексте текущих инициатив цифровизации школ Казахстана и более широкой литературы об алгоритмической справедливости в образовании.

Ключевые слова: *искусственный интеллект, аналитика обучения, институциональная гетерогенность, коэффициент внутриклассовой корреляции, многоуровневое моделирование, алгоритмическая справедливость, интеллектуальный анализ образовательных данных.*

К.Е. Икласова[1*], Л.Н. Абдулла[2], М.Ж. Базарова[3]
[1]М.Қозыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университеті,
150000, Қазақстан Республикасы, Петропав қаласы, Пушкин көшесі, 86
[2]Putra университеті, Малайзия, Серанг, Селангор, 43400 Сери Кембанган
[3]С. Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті,
070002, Қазақстан Республикасы, Өскемен қаласы, 30-шы Гвардиялық дивизия, 34 к.
*e-mail: keiklasova@ku.edu.kz

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ЖҮЙЕЛЕРІНЕ АРНАЛҒАН ДЕРЕКТЕРДІҢ ИНСТИТУЦИОНАЛДЫҚ ГЕТЕРОГЕНДІЛІГІН БАҒАЛАУ

Бұл жұмыста Қазақстан мектептерінің анонимделген деректері негізінде цифрлық қатысу мен оқу нәтижелеріндегі институционалдық (мектепаралық) гетерогенділік сандық түрде бағаланады; деректер екі EdTech-платформасының (Twig-bilim.kz, BilimLand.kz) жазбаларын және кіру диагностикалық тестілеу балдарын қамтиды. Бірфакторлы ANOVA/ішкі сыныптық корреляция коэффициентін (ICC) ыдырату және кездейсоқ қиылысы бар көпдеңгейлі модельдеу арқылы мектепке тиесілілік цифрлық қатысу дисперсиясының 8,8-9,8%-ын және кіру тестілеу балдары дисперсиясының 30,0-30,7%-ын түсіндіретіні анықталды, әрі ANOVA негізіндегі мектепаралық дисперсия үлесі мен mixed-effects моделіндегі ICC сандық тұрғыдан жақын болды. Алынған бағалар мектепаралық гетерогенділіктің, әсіресе кіру диагностикалық тестілеу нәтижелері үшін, мазмұндық тұрғыдан елеулі екенін көрсетеді. Нәтижелер нәтижелерінің үлестірімі әртүрлі мектептер арасында машиналық оқыту модельдерінің калибрленуі мен жалпылану қабілетін бағалау кезінде институционалдық кластерленуді айқын ескеру қажеттігін көрсетеді және білімге икемді әрі әділ қолжетімділікті қолдауға арналған ерте ескерту мен бейімделген оқыту ЖИ-жүйелерін жобалауда мектепті ескеретін валидацияның маңызын негіздейді. Нәтижелер Қазақстандағы мектептерді цифрландыру бойынша ағымдағы бастамалар және білім берудегі алгоритмдік әділдік туралы кеңірек әдебиет аясында талқыланады.

Түйінді сөздер: *жасанды интеллект, оқыту аналитикасы, институционалдық гетерогенділік, ішкі сыныптық корреляция коэффициенті, көпдеңгейлі модельдеу, алгоритмдік әділдік, білім беру деректерін өндіру.*

Сведения об авторах

Кайнижамал Есимсеитовна Икласова* – PhD, доцент кафедры «Информационно-коммуникационные технологии», Северо-Казахстанский университет имени М. Козыбаева; e-mail: keiklasova@ku.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8330-4282.

Лили Нурлияна Абдулла – PhD, ассоциированный профессор кафедры мультимедиа, факультет компьютерных наук и информационных технологий, Университет Путра Малайзия; e-mail: liyana@upm.edu.my. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8704-2390.

Мадина Жомартовна Базарова – PhD, ассоциированный профессор кафедры «Компьютерное моделирование и информационные технологии», Восточно-Казахстанский университет имени С. Аманжолова; e-mail: madina_vkgtu@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2580-6580.

Авторлар туралы мәліметтер

Кайнижамал Есимсеитовна Икласова* – PhD, «Ақпараттық-коммуникациялық технологиялар» кафедраның доценті, М. Козыбаев атындағы Солтүстік-Қазақстан университеті; e-mail: keiklasova@ku.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8330-4282.

Лили Нурлияна Абдулла – PhD, мультимедиа кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Компьютерлік ғылымдар және ақпараттық технологиялар факультеті, Путра Малайзия университеті; e-mail: liyana@upm.edu.my. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8704-2390.

Мадина Жомартовна Базарова – PhD, «Компьютерлік үлгілеу және ақпараттық технологиялар» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, С. Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті; e-mail: madina_vkgtu@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2580-6580.

Information about the authors

Kainizhamal Iklassova* – PhD, associate professor, Department of Information and Communication Technologies, Manash Kozybayev North Kazakhstan University; e-mail: keiklasova@ku.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8330-4282.

Lili Nurliyana Abdullah – PhD, Associate Professor, Department of Mulitimedia, Faculty of Computer Science and Information Technology, Universiti Putra Malaysia; e-mail: liyana@upm.edu.my. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8704-2390.

Madina Zhomartovna Bazarova – PhD, associate professor of the Department of Computer Modeling and Information Technology, Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University; e-mail: madina_vkgtu@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2580-6580.

Received 16.06.2026
Revised 18.08.2026
Accepted 31.08.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-24

IRSTI: 28.23.15; 28.23.29

G.N. Kazbekova*, Y.U. Serdaliyev
Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University,
29 Bekzat Sattarkhanov Avenue. Turkestan, Kazakhstan
*e-mail: gulnur.kazbekova@ayu.edu.kz

LEAKAGE-FREE CAUSAL CONTEXT REPRESENTATION FOR POSE-BASED EXERCISE PHASE RECOGNITION

Abstract: *Pose-based exercise recognition provides a computationally efficient approach for analyzing human movement; however, classification based solely on the current pose may fail to capture short-term motion context. This study investigates whether leakage-free causal context can improve exercise-phase recognition without requiring a complex temporal neural architecture. A time-series exercise dataset containing 1,372 ordered pose observations from five exercises and ten exercise-phase classes was analyzed using seven pose representations derived from body landmarks, joint angles, and spatial distances. To reduce the risk of optimistic evaluation caused by neighboring observations appearing across training and testing partitions, a contiguous block-aware validation protocol was employed. A leakage-free causal mean context representation was constructed using only the current and preceding observations, without future samples or ground-truth labels. History-length ablation showed that a five-observation causal history achieved the best performance. The proposed representation increased mean Macro-F1 from 0.8358 for current-pose classification to 0.8973, corresponding to a 7.36% relative improvement, and improved performance in all five evaluation blocks. A causal Temporal Convolutional Network achieved a Macro-F1 of 0.8699, indicating that the simpler causal aggregation was more effective under the evaluated dataset conditions. Paired analysis yielded a mean Macro-F1 improvement of 0.0615 with a 95% confidence interval of [0.0308, 0.0921] and a large observed effect size (Cohen's $d_z = 2.49$); however, exact two-sided tests did not reach the conventional significance threshold ($p = 0.0625$) because only five paired blocks were available. These findings suggest that short causal pose context can provide useful information for exercise-phase recognition while remaining compatible with real-time processing.*

Key words: *human pose estimation, exercise recognition, causal context, pose representation, temporal modeling, block-aware validation, TCN.*

1. Introduction

Human action recognition has become an important research area in computer vision due to its applications in intelligent monitoring, human–computer interaction, rehabilitation, sports analysis, and automated exercise assessment. Conventional video-based approaches can extract rich visual information, but their performance may be affected by background appearance, illumination, clothing, and other environmental factors. Skeleton-based representations provide a compact alternative by describing human motion through body-joint coordinates and their spatial relationships, allowing recognition models to focus primarily on movement structure [1, 2]. Recent reviews demonstrate that skeleton-based human action recognition has evolved from handcrafted geometric descriptors toward deep spatial-temporal representation learning using graph convolutional networks, temporal architectures, and Transformer-based models [3, 4].

A central challenge in skeleton-based recognition is the effective representation of both body configuration and movement dynamics. Spatial coordinates of body landmarks provide detailed pose information, while joint angles and inter-joint distances can encode geometric relationships that are less directly represented by raw coordinates. Modern approaches increasingly learn these relationships using graph-based architectures such as ST-GCN, CTR-GCN, InfoGCN, and related models [5-7]. Other studies have investigated efficient skeleton representations and combinations of handcrafted geometric features with learned spatial-temporal features [8, 9]. These developments indicate that recognition performance depends not only on classifier complexity but also on how pose information is represented before classification.

Temporal information is particularly relevant when visually similar body configurations may correspond to different stages of an action. Modeling an observation independently ignores the

©G.N. Kazbekova, Y.U. Serdaliyev, 2026

movement trajectory that precedes it. Temporal Convolutional Networks (TCNs) provide one approach for learning such dependencies through convolutional sequence modeling [10, 11], while more recent skeleton-based methods employ graph convolution, attention, and Transformer architectures to capture increasingly complex spatial-temporal relationships [12, 13]. However, greater architectural complexity does not necessarily guarantee superior performance, particularly when the available dataset is limited. For practical exercise-monitoring systems, a useful temporal representation should therefore improve recognition while maintaining low computational complexity and causal operation suitable for real-time inference.

Evaluation methodology is another important consideration when working with ordered observations. If neighboring or strongly related samples are randomly distributed between training and testing partitions, a model may be evaluated on observations that are highly similar to samples already encountered during training. Such partitioning can produce optimistic performance estimates and obscure the model's ability to generalize to separated portions of the data. Data-leakage studies in human action recognition have demonstrated that evaluation protocols can substantially influence reported recognition performance [14]. Consequently, ordered pose observations require particular care when constructing validation partitions and temporal context.

In this study, we investigate whether short causal context can improve pose-based exercise-phase recognition without relying on a complex temporal neural architecture. Seven pose representations based on landmarks, joint angles, three-dimensional distances, coordinate-wise distances, and their combinations are first evaluated. A contiguous block-aware protocol is then used to reduce the influence of neighboring observations across evaluation partitions. Based on this protocol, we introduce a Leakage-Free Causal Mean Context Representation (LF-CMCR) that combines the current pose representation with an aggregated representation of strictly preceding observations. Context construction uses neither future observations nor ground-truth class labels and does not cross evaluation-partition boundaries. The method is additionally compared with a causal TCN using the same ordered-context principle.

The main contributions of this study are threefold. First, we systematically evaluate seven pose representations under both random and block-aware validation to examine representation robustness under a more restrictive evaluation protocol. Second, we propose LF-CMCR, a lightweight causal representation that incorporates short-term ordered context without future observations or label information, and analyze the effect of different history lengths. Third, we compare the proposed representation with both current-pose classification and a learnable causal TCN using paired block-wise evaluation and statistical analysis. The resulting framework is intended to clarify whether simple causal aggregation can provide a practical alternative to more complex temporal models for pose-based exercise-phase recognition.

2. Materials and Methods

2.1. Dataset and Pose Representation

The experiments were conducted using the Physical Exercise Recognition Time-Series dataset, which contains pose-based representations of human exercise movements. The dataset consists of 1,372 pose samples distributed across 10 exercise-state classes, representing the upward and downward phases of five common physical exercises: jumping jacks, pull-ups, push-ups, sit-ups, and squats. The class distribution is moderately imbalanced, with the number of samples per class ranging from 99 to 189.

Each sample is associated with a unique pose_id and a corresponding exercise-state label. Examination of the sample ordering showed that pose_id values form a strictly consecutive sequence from 0 to 1,371. Moreover, samples belonging to each class occupy a contiguous range in this ordering. Since the dataset does not provide original video, subject, repetition, or verified frame-sequence identifiers, the pose_id ordering is treated in this study as an ordered pose sequence rather than as confirmed temporal video frames. This distinction is important for preventing unsupported assumptions regarding the temporal structure of the dataset.

Four groups of pose descriptors were available: 3D body landmarks, joint angles, three-dimensional inter-joint distances, and axis-wise XYZ distance components. After alignment by pose_id, all descriptor groups contained the same 1,372 samples, with no missing identifiers, duplicated identifiers, or missing values. The resulting master dataset contained 170 numerical input features for each pose sample.

To investigate how different pose representations affect exercise recognition, seven feature configurations were constructed. R1 contained 99 raw 3D landmark coordinates, while R2 consisted of seven joint-angle features. R3 represented the pose using 16 three-dimensional inter-joint distance features, and R4 contained 48 axis-wise XYZ distance components. Two combined representations were additionally evaluated: R5, consisting of the 99 landmark coordinates and seven joint angles (106 features), and R6, containing the angle and distance-based geometric descriptors (71 features). Finally, R7 combined all available descriptors into a 170-dimensional representation.

Formally, the complete pose representation for an ordered observation t can be expressed as

$$\mathbf{x}_t = \left[\mathbf{L}_t, \mathbf{A}_t, \mathbf{D}_t, \mathbf{D}_t^{xyz}\right], \quad (1)$$

where $\mathbf{L}_t \in \mathbb{R}^{99}$ denotes the 3D landmark coordinates, $\mathbf{A}_t \in \mathbb{R}^7$ represents joint angles, $\mathbf{D}_t \in \mathbb{R}^{16}$ contains three-dimensional distance features, and $\mathbf{D}_t^{xyz} \in \mathbb{R}^{48}$ represents axis-wise distance components. Thus, the complete representation has dimensionality

$$99 + 7 + 16 + 48 = 170.$$

The seven representations were evaluated independently to determine whether compact geometric descriptors could preserve the discriminative information of the complete feature set. This representation analysis also provided the basis for selecting the feature space used in the subsequent ordered-context experiments (Table 1).

Table 1 – Pose representations evaluated in the study

Representation	Description	Features
R1	3D landmarks	99
R2	Joint angles	7
R3	3D inter-joint distances	16
R4	XYZ distance components	48
R5	Landmarks + angles	106
R6	Geometric descriptors	71
R7	All available features	170

2.2. Experimental Protocol and Evaluation

A rigorous evaluation protocol was designed to account for the ordered structure observed in the dataset. Initial inspection revealed that samples belonging to each exercise-state class were stored in contiguous pose_id ranges. Consequently, conventional random stratified splitting may place neighboring observations into both the training and test sets, potentially producing overly optimistic estimates of generalization performance.

To quantify this effect, two validation strategies were compared. The first employed five-fold random stratified validation, preserving the class distribution across folds. The second used a contiguous block-aware protocol. For each of the 10 classes, its ordered samples were divided into five approximately equal contiguous blocks. During each evaluation fold, one block from every class was assigned to the test partition, while the remaining four blocks were used for training. This produced five evaluation folds while preserving representation of all exercise-state classes in each test set.

The importance of this protocol was confirmed empirically. Under random stratified validation, the complete R7 representation achieved a mean Macro-F1 of 0.8704, whereas block-aware evaluation reduced the score to 0.8358 ± 0.0274. This corresponds to an absolute decrease of 0.0346 and a relative decrease of approximately 3.97%. Furthermore, approximately 96.57% of randomly selected test observations had an immediate ordered neighbor in the corresponding training data. These findings indicate that random splitting can benefit from strong local similarity between neighboring observations.

The block-aware protocol was subsequently applied consistently when comparing the seven pose representations. Under this evaluation, R7 achieved the highest Macro-F1 (0.8358), followed by R1 (0.8263) and R5 (0.8246). Interestingly, the compact R4 representation, containing only 48 features, achieved 0.8200 Macro-F1, retaining approximately 98.10% of the performance of the full 170-dimensional representation while reducing the feature dimensionality by 71.76%.

Because the blocks were constructed from the available pose_id ordering rather than original sequence metadata, they should not be interpreted as independent subjects, videos, or repetitions. Instead, the block-aware procedure serves as a more conservative evaluation mechanism that reduces direct adjacency between training and test observations while respecting the structure available in the dataset.

For all subsequent ordered-context experiments, feature construction was performed independently within each evaluation partition. Context vectors were therefore prevented from crossing training, validation, or test boundaries. In addition, future observations and ground-truth class labels were not used when constructing causal context features.

For the causal-context experiments, the complete R7 representation was used as the base feature space because it achieved the highest mean Macro-F1 under block-aware evaluation. The proposed CausalMean representation was evaluated with history lengths $h \in \{1,3,5,10\}$. For a history length h, each current observation was combined with a causal mean calculated from the available current and preceding observations within the same evaluation partition. The history length was treated as an experimental parameter, and $h = 5$ was selected as the primary configuration based on the history-ablation results.

A causal Temporal Convolutional Network (TCN) was additionally implemented as a learnable temporal baseline. To ensure a fair causal comparison, the TCN used the same history setting of $h = 5$, corresponding to a maximum input sequence length of six observations including the current pose. Only past and current observations were supplied to the network. Sequence windows were generated independently within the training, validation, and test partitions and were not allowed to cross partition boundaries. Feature standardization for the TCN was performed using a StandardScaler fitted exclusively on the training partition and subsequently applied to the corresponding validation and test data.

Macro-averaged F1 score was used as the primary evaluation metric because the 10 exercise-phase classes contained different numbers of samples. Classification accuracy and weighted F1 score were additionally calculated, while inference latency per sample was recorded to assess computational efficiency. Performance was reported across the five contiguous evaluation blocks using the mean and standard deviation of the block-wise scores.

To assess whether the observed improvements were consistent across evaluation blocks, paired statistical comparisons were performed using the Macro-F1 scores obtained on the same five blocks. The analysis included the mean paired difference, a 95% confidence interval for the mean difference, Cohen's d_z as a paired-sample effect-size measure, the Wilcoxon signed-rank test, an exact sign-flip permutation test, and an exact sign test. Because only five paired blocks were available, inferential p -values were interpreted cautiously and were considered together with the direction of the block-wise differences, effect size, confidence interval, and magnitude of the observed performance change.

Finally, three principal configurations were compared under the same block-aware framework: classification using the current R7 pose representation alone, the proposed leakage-free CausalMean representation with $h = 5$, and the causal TCN with $h = 5$. This paired design enabled direct assessment of whether ordered causal context improved recognition and whether a learnable temporal architecture provided an advantage over the proposed fixed causal aggregation.

2.3. Causal Ordered-Context Framework

To incorporate local ordered information without introducing future-sample leakage, a leakage-free causal ordered-context representation was constructed. Unlike symmetric temporal windows, which may use observations occurring after the current sample, the proposed representation relies exclusively on the current observation and a fixed number of preceding observations. This design makes the representation compatible with causal and potentially real-time inference.

Let $\mathbf{x}_t \in \mathbb{R}^d$ denote the feature vector of the current ordered pose observation at position t, where $d = 170$ for the complete R7 representation. For a history length h, the available causal context is defined as

$$\mathcal{H}_t^{(h)} = \{\mathbf{x}_{\max(0,t-h)}, \dots, \mathbf{x}_{t-1}, \mathbf{x}_t\}, \quad (2)$$

Thus, the context contains at most $h+1$ observations and never includes a future observation $\mathbf{x}_{t+k}$, where $k > 0$. At the beginning of an evaluation partition, shorter histories are retained rather than being completed using observations from another partition.
The local context is summarized using a causal mean vector:

$$\boldsymbol{\mu}_t^{(h)} = \frac{1}{|\mathcal{H}_t^{(h)}|} \sum_{\mathbf{x}_i \in \mathcal{H}_t^{(h)}} \mathbf{x}_i, \quad (3)$$

The final representation is obtained by concatenating the current pose vector with its causal contextual mean:

$$\mathbf{z}_t^{(h)} = \left[\mathbf{x}_t \parallel \boldsymbol{\mu}_t^{(h)}\right], \quad (4)$$

where ‖ denotes vector concatenation. With the 170-dimensional R7 representation, the resulting CausalMean descriptor therefore contains $170 + 170 = 340$ features.

History lengths $h \in \{1,3,5,10\}$ were evaluated to determine the amount of preceding ordered context required for effective recognition. A history of $h = 5$ was selected as the primary configuration based on the validation experiments. It represents each observation using the current pose together with information aggregated from up to five preceding ordered observations.

A central requirement of the proposed procedure is partition-aware context construction. For every block-aware fold, causal histories were generated independently within the training, validation, and test partitions. Consequently, no context window was permitted to cross a partition boundary. The construction procedure also used neither ground-truth exercise labels nor future observations. Therefore, the contextual representation available for a sample was derived solely from feature observations accessible up to its current ordered position within the corresponding partition.

This distinction is particularly important because the dataset provides ordered pose_id values but does not contain verified original-video frame sequences. Accordingly, the proposed method is referred to as causal ordered-context representation rather than conventional video temporal modeling. The method exploits local continuity present in the available ordering while avoiding assumptions about unavailable subject, repetition, or original frame-sequence metadata.

3. Results

3.1. Pose Representation and Validation Results

The initial experiments examined the discriminative performance and robustness of the seven pose representations under both random stratified and contiguous block-aware evaluation. Under random stratified validation, the complete R7 representation achieved a mean Macro-F1 of 0.8704, followed closely by R1 landmarks (0.8655), R4 XYZ distances (0.8632), R5 landmarks and angles (0.8624), and R6 geometric descriptors (0.8594). In contrast, the compact R3 distance and R2 angle representations achieved substantially lower scores of 0.6749 and 0.5631, respectively.

When the more conservative contiguous block-aware protocol was applied, performance decreased for all seven representations. R7 remained the highest-performing representation with a mean Macro-F1 of 0.8358 ± 0.0274, corresponding to an absolute decrease of 0.0346 relative to random stratified validation. R1 achieved 0.8263 ± 0.0372, while R5, R4, and R6 obtained Macro-F1 scores of 0.8246, 0.8200, and 0.8142, respectively. The largest relative reductions were observed for R3 and R2, which achieved block-aware Macro-F1 scores of only 0.6170 and 0.5159 (Table 2, Figure 1).

Table 2 – Performance of pose representations under random and block-aware evaluation

Representation	Features	Random Macro-F1	Block Macro-F1	F1 drop	Relative drop
R7 All features	170	0.8704	0.8358 ± 0.0274	0.0346	3.97%
R1 Landmarks	99	0.8655	0.8263 ± 0.0372	0.0392	4.53%
R5 Landmarks + angles	106	0.8624	0.8246 ± 0.0437	0.0378	4.38%
R4 XYZ distances	48	0.8632	0.8200 ± 0.0456	0.0432	5.01%
R6 Geometric	71	0.8594	0.8142 ± 0.0375	0.0452	5.25%
R3 3D distances	16	0.6749	0.6170 ± 0.0248	0.0579	8.58%
R2 Angles	7	0.5631	0.5159 ± 0.0444	0.0473	8.39%

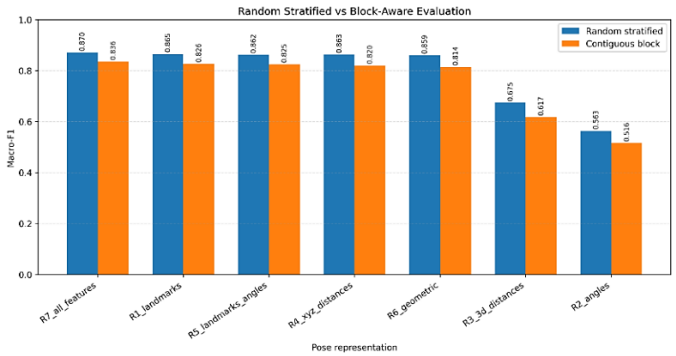


Figure 1 – Comparison of random stratified and contiguous block-aware Macro-F1 scores across the seven pose representations.

The difference between the two validation strategies was further supported by the neighborhood analysis. Under random stratified splitting, an average of 96.57% of test observations had an immediate ordered neighbor present in the corresponding training set. For R7, random validation produced a Macro-F1 of 0.8704 compared with 0.8358 under contiguous block evaluation, representing a relative reduction of approximately 3.97%. This indicates that evaluation methodology has a measurable influence on the reported recognition performance when observations exhibit strong local ordering.

Despite the overall advantage of R7, several lower-dimensional representations preserved most of its block-aware performance. R1 retained 98.86% of R7 performance while reducing the feature dimensionality by 41.76%. More notably, R4 retained approximately 98.10% of R7 performance using only 48 features, corresponding to a 71.76% reduction in dimensionality. This suggests that the axis-wise geometric distance representation contains substantial discriminative information despite its considerably smaller feature space.

Paired comparison across the five contiguous blocks showed that R7 outperformed R1, R5, and R4 in four of the five blocks. The mean Macro-F1 differences were 0.0095, 0.0113, and 0.0158, respectively. However, after correction for multiple comparisons, these differences were not statistically significant. Given that only five paired blocks were available, the absence of statistical significance should not be interpreted as evidence of equivalence between the representations.

Overall, R7 provided the highest block-aware Macro-F1 and was therefore selected as the base representation for the subsequent causal ordered-context experiments. At the same time, the results demonstrate that substantially more compact pose descriptors, particularly R4, can preserve a large proportion of the discriminative performance of the complete representation.

3.2. Causal Context and History Analysis

After selecting R7 as the base pose representation, the effect of causal ordered context was investigated using different history lengths. The leakage-free CausalMean representation was evaluated with $h \in \{1,3,5,10\}$, where only the current observation and preceding observations available within the same evaluation partition were used. No future samples or ground-truth labels were involved in context construction.

The results demonstrate that incorporating a short causal history consistently improved recognition performance compared with using the current pose alone. The baseline R7 representation achieved a mean Macro-F1 of 0.8358 ± 0.0274. Using a single preceding observation ($h = 1$) increased Macro-F1 to 0.8540 ± 0.0239. Extending the history to three observations further improved performance to 0.8871 ± 0.0371, while the best result was obtained with $h = 5$, reaching a Macro-F1 of 0.8973 ± 0.0329 and an accuracy of 0.8966. Increasing the history to $h = 10$, however, reduced Macro-F1 to 0.8473 ± 0.0284 (Table 3).

Table 3 – Effect of causal history length on recognition performance

History	Macro-F1	Std.	Accuracy	Gain vs. current
Current (h=0)	0.8358	0.0274	0.8339	—
(h=1)	0.8540	0.0239	0.8565	+0.0182
(h=3)	0.8871	0.0371	0.8851	+0.0512
(h=5)	0.8973	0.0329	0.8966	+0.0615
(h=10)	0.8473	0.0284	0.8566	+0.0115

The optimal $h = 5$ configuration produced an absolute Macro-F1 improvement of 0.0615, corresponding to a relative gain of 7.36% over the current-pose baseline. Importantly, the improvement was observed in all five evaluation blocks. The block-wise Macro-F1 increased from 0.8515 to 0.8803, 0.8136 to 0.8866, 0.7994 to 0.8635, 0.8555 to 0.9492, and 0.8592 to 0.9070 for blocks 1-5, respectively.

Paired statistical analysis further showed a mean Macro-F1 difference of +0.0615, with a 95% confidence interval of [0.0308, 0.0921]. The observed paired effect size was large (Cohen's $d_z = 2.49$), and CausalMean outperformed the baseline in all five paired blocks. However, the Wilcoxon signed-rank test, exact sign-flip permutation test, and exact sign test each yielded $p = 0.0625$. Thus, the conventional $p < 0.05$ threshold was not reached (Figure 2).

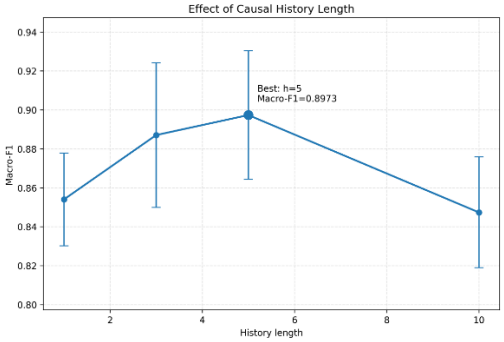


Figure 2 – Macro-F1 performance of the leakage-free CausalMean representation across different causal history lengths

This result should be interpreted in light of the small number of paired evaluation blocks ($n = 5$). With five consistently positive paired differences, the exact two-sided tests are inherently limited in attainable significance. Therefore, the statistical evidence is better characterized by the consistent 5/5 improvement direction, the large observed effect size, the positive confidence interval, and the magnitude of the performance gain rather than by the p-value alone.

The history ablation also indicates that additional context is not necessarily beneficial indefinitely. Performance increased substantially from $h = 1$ to $h = 5$, but declined at $h = 10$. This suggests that a relatively short local context captures useful ordered variation, whereas a longer history may incorporate less relevant observations and dilute information associated with the current pose.

3.3. Comparison with Causal TCN

To determine whether the observed benefit of causal ordered context required a learnable temporal model, the proposed CausalMean representation was compared with a causal Temporal Convolutional Network (TCN). Both approaches used the same history length of $h = 5$, corresponding to a maximum context of five preceding observations plus the current pose. The comparison was performed using the same five block-aware evaluation folds.

The causal TCN improved the mean Macro-F1 from 0.8358 ± 0.0274 for the current-pose baseline to 0.8699 ± 0.0195, corresponding to an absolute gain of 0.0340 and a relative improvement of 4.07%. However, the proposed CausalMean representation achieved the highest performance, with a mean Macro-F1 of 0.8973 ± 0.0329. This represents an absolute improvement of 0.0615 (7.36%) over the current-pose baseline and an improvement of 0.0275 over the causal TCN (Table 4).

Table 4 – Final comparison of current-pose, causal TCN, and CausalMean approaches

Method	Macro-F1	Std.	Gain vs. current	Relative gain
Current R7	0.8358	0.0274	–	–
Causal TCN (h=5)	0.8699	0.0195	+0.0340	+4.07%
CausalMean (h=5)	0.8973	0.0329	+0.0615	+7.36%

The paired block-wise comparison showed a consistent ranking. Causal TCN outperformed the current-pose baseline in all five blocks, with a mean Macro-F1 difference of +0.0340. CausalMean likewise outperformed the current representation in all five blocks and, importantly, also

exceeded the causal TCN in all five paired blocks. The mean difference between CausalMean and causal TCN was +0.0275, with a 95% confidence interval of [0.0021, 0.0529] and Cohen's $d_z = 1.34$.

The exact two-sided tests yielded $p = 0.0625$ for each of the three principal paired comparisons. As discussed previously, this value reflects the limited number of independent paired blocks rather than evidence that the observed differences are absent. In particular, the consistent 5/5 direction of the differences and the positive effect sizes support the practical relevance of the observed improvements, while formal statistical significance at the conventional 0.05 threshold cannot be claimed.

The computational comparison also favored the fixed causal representation. CausalMean required approximately 0.066 ms per sample, whereas the causal TCN required approximately 0.963 ms per sample under the experimental implementation. Thus, the fixed causal aggregation achieved higher recognition performance while avoiding the additional training and inference complexity of the learnable temporal network.

Overall, the final experimental ranking was

$$\text{CausalMean}_{h=5} > \text{CausalTCN}_{h=5} > \text{Current R7}$$

These results indicate that the primary benefit was obtained from incorporating short-range causal ordered context itself, while increasing model complexity through a TCN did not provide an additional advantage on the present dataset.

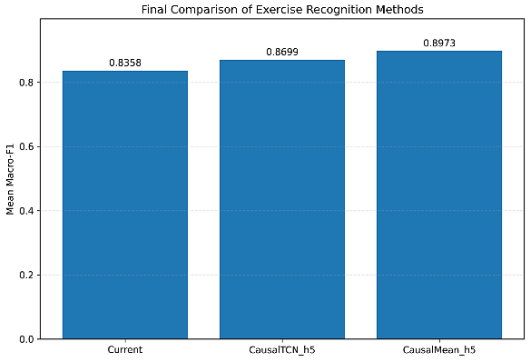


Figure 3 – Mean block-aware Macro-F1 comparison of the current-pose baseline, causal TCN, and the proposed CausalMean representation

4. Discussion

The experimental results demonstrate that both pose representation and evaluation protocol substantially influence exercise-recognition performance. Although the complete R7 representation achieved the highest overall block-aware performance, several compact representations retained most of its discriminative capability. In particular, the 48-dimensional R4 representation preserved approximately 98% of the performance of the full 170-dimensional representation. This observation supports previous studies showing that geometric relationships between skeletal joints can provide informative and computationally efficient descriptors for human action recognition [3, 4, 9]. Recent work has similarly demonstrated that handcrafted geometric information can complement skeletal representations while maintaining efficient inference [15, 16].

A second important finding concerns the evaluation protocol. Performance consistently decreased when random stratified validation was replaced by contiguous block-aware evaluation. The relatively high proportion of randomly selected test observations with immediate neighbors in the training set suggests that conventional random splitting can benefit from local similarity in ordered data. Therefore, randomly partitioned observations may provide an optimistic estimate of generalization when neighboring samples are strongly related. This finding is consistent with concerns raised in previous HAR research regarding inappropriate partitioning and data leakage [14]. More generally, recent evidence in human activity and exercise-recognition tasks confirms that inappropriate splitting can substantially overestimate generalization performance [14, 17]. Importantly, the present study does not claim that the derived blocks correspond to independent subjects or video sequences; rather, block-aware evaluation was introduced as a more conservative strategy given the metadata available in the dataset.

The central finding of this study is that short-range causal ordered context provided a clear advantage over isolated pose classification. The proposed CausalMean representation with $h = 5$ improved Macro-F1 from 0.8358 to 0.8973, with positive differences across all five evaluation blocks. This indicates that individual pose observations do not contain all discriminative information available in their local ordering. Aggregating recent observations can stabilize the representation and provide information about local movement evolution that is unavailable from a single pose. This observation is conceptually consistent with temporal action-recognition approaches, where relationships across observations are used to capture movement dynamics [5, 7, 10-13].

The history-ablation experiment provides additional insight into the scale of useful context. Increasing history from $h = 1$ to $h = 5$ progressively improved recognition, whereas extending the history to $h = 10$ reduced performance. A plausible interpretation is that short histories capture locally relevant changes associated with an exercise phase, while longer windows increasingly incorporate observations that are less representative of the current state. Thus, the results favor selective short-range context rather than simply maximizing temporal receptive field. Because original frame-level temporal metadata are unavailable, however, this interpretation should be understood in terms of ordered pose continuity rather than verified physical time.

An important result is that the fixed CausalMean representation outperformed the causal TCN under the same $h = 5$ setting. TCNs are designed to model temporal dependencies through hierarchical temporal convolutions and have demonstrated strong performance in action modeling [10], [11]. In the present experiments, the TCN improved substantially over current-pose classification, confirming the value of causal context, but it did not exceed the simpler aggregation approach. One explanation is the relatively limited dataset size of 1,372 observations. The additional parameters of a learnable temporal architecture may require substantially more independent sequential data to exploit their modeling capacity effectively, whereas CausalMean introduces no trainable temporal parameters and directly summarizes local ordered information. Therefore, increased architectural complexity did not translate into improved performance under the present experimental conditions.

From a practical perspective, this finding is relevant for lightweight and real-time exercise-recognition systems, where computational efficiency is an important consideration [16], [22], [23]. The proposed representation requires only the computation of a running local mean and feature concatenation before classification. In the experimental implementation, its inference latency was approximately 0.066 ms per sample compared with approximately 0.963 ms for the causal TCN. The combination of higher recognition performance and lower computational complexity suggests that fixed causal aggregation may be useful when low latency and limited computational resources are important.

The statistical results nevertheless require cautious interpretation. CausalMean improved Macro-F1 in all five paired blocks and produced a large observed effect size ($d_z = 2.49$) relative to the current-pose baseline. However, the exact two-sided tests yielded $p = 0.0625$, slightly above the conventional significance threshold. With only five paired evaluation blocks, statistical power is inherently limited. Consequently, the results support a consistent and practically meaningful observed improvement, but they should not be presented as definitive statistical evidence of superiority.

Several limitations should therefore be acknowledged. First, the dataset does not provide original video identifiers, subject identities, repetition boundaries, or verified frame-sequence metadata. Consequently, pose_id ordering cannot be interpreted as confirmed temporal video continuity. Second, the five contiguous blocks are derived evaluation groups rather than genuinely independent subject or repetition partitions. Third, the relatively small dataset limits both statistical power and the ability of higher-capacity temporal models such as TCNs to learn complex motion patterns. Finally, the present experiments address exercise-state recognition rather than complete exercise-technique assessment or error diagnosis.

These limitations define a clear direction for future work. The proposed framework should be validated on larger datasets containing explicit subject, repetition, and frame-level temporal identifiers [21, 24, 25]. Subject-independent protocols such as leave-one-subject-out evaluation would enable stronger assessment of generalization, while genuine video sequences would permit direct comparison of causal aggregation with TCNs, recurrent architectures, graph-based temporal models, and transformer-based motion representations [19, 20]. Such validation would determine

whether the advantage observed for lightweight causal aggregation persists when richer and independently structured temporal data are available.

5. Conclusion

This study investigated pose-based exercise recognition under ordered-data conditions and proposed a leakage-free causal ordered-context representation (LF-CMCR) for incorporating short-range contextual information without using future observations or ground-truth labels. Seven pose representations were first evaluated using random stratified and contiguous block-aware validation. The complete R7 representation achieved the highest block-aware Macro-F1 of 0.8358, while several lower-dimensional representations retained a substantial proportion of its performance, demonstrating the potential of compact geometric pose descriptors.

The experiments further showed that evaluation protocol has a measurable influence on recognition performance. For R7, Macro-F1 decreased from 0.8704 under random stratified validation to 0.8358 under contiguous block-aware evaluation. This result highlights the importance of accounting for local ordering when neighboring observations may otherwise be distributed across training and test partitions.

The proposed causal representation substantially improved recognition performance. Among the evaluated history lengths, $h = 5$ achieved the best result, increasing mean Macro-F1 from 0.8358 to 0.8973, corresponding to an absolute gain of 0.0615 and a relative improvement of 7.36%. The improvement occurred across all five evaluation blocks and produced a large paired effect size ($d_z = 2.49$). However, because only five paired blocks were available, the exact two-sided tests yielded $p = 0.0625$; therefore, statistical significance at the conventional 0.05 level is not claimed.

Comparison with a causal TCN further demonstrated that the benefit was not dependent on a complex learnable temporal architecture. The causal TCN achieved a Macro-F1 of 0.8699, improving over the current-pose baseline but remaining below the proposed CausalMean representation. This finding suggests that, under the present dataset conditions, a short and computationally inexpensive causal aggregation can capture useful ordered information without the additional complexity of a trainable temporal model. TCNs nevertheless remain well-established sequence-modeling architectures, making this comparison an informative baseline rather than evidence against temporal convolutional modeling in general [10], [11].

The principal limitation of the study is that the available dataset does not provide verified original-video frame sequences, subject identities, or repetition boundaries. Consequently, the observed relationships should be interpreted as ordered-pose context rather than confirmed video-temporal dynamics. Future work will therefore validate the proposed framework using genuine sequential exercise datasets with explicit subject and repetition information, subject-independent evaluation protocols, and real-time exercise recordings.

Overall, the results indicate that carefully constructed short-range causal context can improve pose-based exercise recognition while preserving causal inference and low computational complexity, providing a practical foundation for future real-time exercise assessment systems.

References

1. Feng M. Skeleton Graph-Neural-Network-Based Human Action Recognition: A Survey / M. Feng, J. Meunier // Sensors. – 2022. – Vol. 22, № 6. – Art. 2091. https://doi.org/10.3390/s22062091.
2. Yue R. Action recognition based on RGB and skeleton data sets: A survey / R. Yue, Z.-Q. Tian, S. Du // Neurocomputing. – 2022. – Vol. 512. – P. 287-306. https://doi.org/10.1016/j.neucom.2022.09.071.
3. A Survey on 3D Skeleton-Based Action Recognition Using Learning Method / B. Ren et al // Cyborg and Bionic Systems. – 2024. – Vol. 5. – Art. 0100. https://doi.org/10.34133/cbsystems.0100.
4. Huang Q. A Review of Skeleton-Based Human Action Recognition / Q. Huang, J. Cui, C. Li // Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics. – 2024. – Vol. 36, № 2. – P. 173-194. https://doi.org/10.3724/SP.J.1089.2024.2023-00358.
5. Yan S. Spatial Temporal Graph Convolutional Networks for Skeleton-Based Action Recognition / S. Yan, Y. Xiong, D. Lin // Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. – 2018. – Vol. 32, № 1. https://doi.org/10.1609/aaai.v32i1.12328.
6. Channel-Wise Topology Refinement Graph Convolution for Skeleton-Based Action Recognition / Y. Chen et al // Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). – 2021. – P. 13359-13368.

7. InfoGCN: Representation Learning for Human Skeleton-Based Action Recognition / H.-g. Chi et al // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – 2022. – P. 20186-20196. https://doi.org/10.1109/CVPR52688.2022.01955.
8. Constructing Stronger and Faster Baselines for Skeleton-Based Action Recognition / Y.-F. Song et al // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2023. – Vol. 45, № 2. – P. 1474-1488. https://doi.org/10.1109/TPAMI.2022.3157033.
9. Nan M. Spatio-temporal neural network with handcrafted features for skeleton-based action recognition / M. Nan, M. Trăscău, A.-M. Florea // Neural Computing and Applications. – 2024. – Vol. 36. – P. 9221-9243. https://doi.org/10.1007/s00521-024-09559-4.
10. Temporal Convolutional Networks for Action Segmentation and Detection / C. Lea et al // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – 2017. – P. 156-165.
11. Bai S. An Empirical Evaluation of Generic Convolutional and Recurrent Networks for Sequence Modeling / S. Bai, J. Z. Kolter, V. Koltun. – 2018. – arXiv:1803.01271.
12. Plizzari C. Skeleton-based action recognition via spatial and temporal transformer networks / C. Plizzari, M. Cannici, M. Matteucci // Computer Vision and Image Understanding. – 2021. – Vol. 208-209. – Art. 103219. https://doi.org/10.1016/j.cviu.2021.103219.
13. MotionBERT: A Unified Perspective on Learning Human Motion Representations / W. Zhu et al // Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). – 2023. – P. 15085-15099.
14. Varga D. Critical Analysis of Data Leakage in WiFi CSI-Based Human Action Recognition Using CNNs / D. Varga // Sensors. – 2024. – Vol. 24, № 10. – Art. 3159. https://doi.org/10.3390/s24103159.
15. Recognition and Scoring Physical Exercises via Temporal and Relative Analysis of Skeleton Nodes Extracted from the Kinect Sensor / R. Esmaeeli et al // Sensors. – 2024. – Vol. 24, № 20. – Art. 6713. https://doi.org/10.3390/s24206713.
16. Efficient Skeleton-Based Action Recognition for Real-Time Embedded Systems / N. Noor et al // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW). – 2024. – P. 5889-5897.
17. Varga D. Mitigating Data Leakage in a WiFi CSI Benchmark for Human Action Recognition / D. Varga // Sensors. – 2024. – Vol. 24, № 24. – Art. 8201. https://doi.org/10.3390/s24248201.
18. Liu J. Multi-Modality Co-Learning for Efficient Skeleton-based Action Recognition / J. Liu, C. Chen, M. Liu // Proceedings of the 32nd ACM International Conference on Multimedia. – 2024. – P. 4909-4918. https://doi.org/10.1145/3664647.3681015.
19. BlockGCN: Redefine Topology Awareness for Skeleton-Based Action Recognition / Y. Zhou et al // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – 2024. – P. 2049-2058. https://doi.org/10.1109/CVPR52733.2024.00200.
20. MGSAN: Multimodal Graph Self-Attention Network for Skeleton-Based Action Recognition / J. Wang et al // Multimedia Systems. – 2024. – Vol. 30. – Art. 369. https://doi.org/10.1007/s00530-024-01566-8.
21. FineRehab: A Multi-modality and Multi-task Dataset for Rehabilitation Analysis / J. Li et al // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW). – 2024. – P. 3184-3193. https://doi.org/10.1109/CVPRW63382.2024.00324.
22. Towards Automating Personal Exercise Assessment and Guidance with Affordable Mobile Technology / M. Sideridou et al // Sensors. – 2024. – Vol. 24, № 7. – Art. 2037. https://doi.org/10.3390/s24072037.
23. Kwon H.-J. A novel machine learning-based shoulder exercise assistant program / H.-J. Kwon, S.-H. Choi // Discover Artificial Intelligence. – 2025. – Vol. 5. – Art. 37. https://doi.org/10.1007/s44163-025-00259-z.
24. M3GYM: A Large-Scale Multimodal Multi-view Multi-person Pose Dataset for Fitness Activity Understanding in Real-world Settings / Q. Xu et al // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – 2025. – P. 12289-12300.
25. A Knee Rehabilitation Exercises Dataset for Postural Assessment using Wearable Devices / P. Kasnesis et al // Scientific Data. – 2025. – Vol. 12. – Art. 610. https://doi.org/10.1038/s41597-025-04963-4.

Г.Н. Казбекова*, Е.У. Сердалиев
Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті,
Бекзат Саттарханов даңғылы, 29, Түркістан, Қазақстан
*e-mail: gulnur.kazbekova@ayu.edu.kz

ДЕРЕКТЕРДІҢ АҚПАРАТТЫҚ АҒЫП КЕТУІН БОЛДЫРМАЙТЫН СЕБЕПТІК КОНТЕКСТІК РЕПРЕЗЕНТАЦИЯ НЕГІЗІНДЕ ЖАТТЫҒУ ФАЗАЛАРЫН ТАНУ

Позаға негізделген жаттығуларды тану адам қозғалысын талдаудың есептеу тұрғысынан тиімді тәсілін ұсынады. Алайда тек ағымдағы позаға негізделген жіктеу қысқа мерзімді қозғалыс контекстін толық қамти алмауы мүмкін. Бұл зерттеуде күрделі уақыттық нейрондық архитектураны қолданбай-ақ, ағып кетусіз себептік контекстің жаттығу фазаларын тану сапасын арттыра алатындығы зерттеледі. Бес жаттығу және жаттығу фазаларының он класына жататын 1 372 реттелген позалық бақылаудан тұратын уақыттық қатарлар деректер жиыны дене landmark нүктелері, буын бұрыштары және кеңістіктік қашықтықтар негізінде алынған жеті позалық репрезентацияны пайдалана отырып зерттелді. Көршілес бақылаулардың оқыту және тестілеу бөліктеріне қатар түсуінен туындайтын бағалаудың оптимистік нәтижелер алу қаупін азайту мақсатында блоктардың реттілігін ескеретін валидация хаттамасы қолданылды.

Ағып кетусіз себептік орташа контекстік репрезентация тек ағымдағы және алдыңғы бақылауларды пайдалана отырып құрылды; бұл ретте болашақ үлгілер де, нақты эталондық белгілер де (ground-truth labels) қолданылған жоқ. Тарих ұзындығын абляциялық талдау бес бақылаудан тұратын себептік тарихтың ең жоғары нәтижені көрсеткенін анықтады. Ұсынылған репрезентация ағымдағы поза бойынша жіктеу кезінде алынған орташа Macro-F1 көрсеткішін 0,8358-ден 0,8973-ке дейін арттырды, бұл салыстырмалы түрде 7,36% жақсаруға сәйкес келеді және барлық бес бағалау блогында нәтижелілікті арттырды.

Себептік Temporal Convolutional Network (TCN) моделі 0,8699 Macro-F1 көрсеткішіне қол жеткізді, бұл зерттелген деректер жиыны жағдайында қарапайым себептік агрегацияның тиімдірек болғанын көрсетті. Жұптық талдау орташа Macro-F1 өсімінің 0,0615 болғанын, 95% сенімділік интервалы [0,0308; 0,0921] және байқалған әсер мөлшерінің үлкен болғанын (Cohen's d) көрсетті. Алайда қолда бар бес жұптық блок қана болғандықтан, дәл екіжақты статистикалық сынақтар дәстүрлі статистикалық мәнділік шегіне ($p < 0,05$) жеткен жоқ. Алынған нәтижелер қысқа мерзімді себептік позалық контекст нақты уақыт режимінде өңдеуге сәйкес бола отырып, жаттығу фазаларын тану үшін пайдалы ақпарат бере алатынын көрсетеді.

Түйін сөздер: *адам позасын бағалау, жаттығуларды тану, себептік контекст, позалық репрезентация, уақыттық модельдеу, блоктарды ескеретін валидация, TCN.*

Г.Н. Казбекова*, Е.У. Сердалиев
[1]Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмеда Ясави,
Республика Казахстан, Туркестан, проспект Бекзата Саттарханова, 29
*e-mail: gulnur.kazbekova@ayu.edu.kz

РАСПОЗНАВАНИЕ ФАЗ ОБУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПРИЧИННО-КОНТЕКСТНОЙ РЕПРЕЗЕНТАЦИИ, ПРЕДОТВРАЩАЮЩЕЙ УТЕЧКУ ИНФОРМАЦИИ ИЗ ДАННЫХ

Распознавание упражнений на основе поз представляет собой вычислительно эффективный подход к анализу движений человека. Однако классификация, основанная исключительно на текущей позе, может не учитывать краткосрочный контекст движения. В данном исследовании изучается, может ли свободный от утечки причинный контекст повысить качество распознавания фаз упражнений без необходимости использования сложной временной нейронной архитектуры. Набор временных рядов, содержащий 1 372 упорядоченных наблюдения поз, относящихся к пяти упражнениям и десяти классам фаз упражнений, был проанализирован с использованием семи позовых представлений, сформированных на основе ориентиров тела (landmark), углов суставов и пространственных расстояний. Для снижения риска получения оптимистичных результатов оценки вследствие попадания соседних наблюдений одновременно в обучающую и тестовую выборки был применён протокол валидации с учётом последовательности блоков.

Свободное от утечки причинное представление на основе среднего контекста было сформировано с использованием только текущего и предшествующих наблюдений, без использования будущих образцов или истинных меток классов (ground-truth labels). Абляционный анализ длины истории показал, что причинная история из пяти наблюдений обеспечивает наилучшие результаты. Предложенное представление повысило среднее значение Macro-F1 с 0,8358 для классификации по текущей позе до 0,8973, что соответствует относительному улучшению на 7,36%, а также обеспечило повышение качества во всех пяти оценочных блоках.

Причинная сеть Temporal Convolutional Network (TCN) достигла значения Macro-F1 0,8699, что указывает на более высокую эффективность простой причинной агрегации в условиях исследуемого набора данных. Парный анализ показал среднее улучшение Macro-F1 на 0,0615 с 95%-ным доверительным интервалом [0,0308; 0,0921] и большим наблюдаемым размером эффекта (Cohen's d). Однако точные двусторонние тесты не достигли традиционного порога статистической значимости ($p < 0,05$), поскольку в исследовании было доступно только пять парных блоков. Полученные результаты показывают, что краткосрочный причинный контекст поз может предоставлять полезную информацию для распознавания фаз упражнений, сохраняя при этом совместимость с обработкой данных в режиме реального времени.

Ключевые слова: *оценка позы человека, распознавание упражнений, причинный контекст, позовое представление, временное моделирование, блочно-ориентированная валидация, TCN.*

Information about the authors

Gulnur Nagimetovna Kazbekova* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, International Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University, Turkestan, Kazakhstan; e-mail: gulnur.kazbekova@ayu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2756-7926.

Yerlan Serdaliyev – PhD student in the educational program «Information systems», International Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University, Turkestan, Kazakhstan; e-mail: erlan.serdaliev@ayu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-5403-0423.

Авторлар туралы мәліметтер

Гулнур Нагиметовна Казбекова* – техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Түркістан қ., Қазақстан; e-mail: gulnur.kazbekova@ayu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2756-7926.

Ерлан Утегенулы Сердалиев – «Ақпараттық жүйелер» ББ докторанты, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Түркістан қ., Қазақстан; e-mail: erlan.serdaliev@ayu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-5403-0423.

Сведения об авторах

Гулнур Нагиметовна Казбекова* – кандидат технических наук, ассоциированный профессор, Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмеда Ясави, г. Туркестан, Казахстан; e-mail: gulnur.kazbekova@ayu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2756-7926.

Ерлан Утегенулы Сердалиев – докторант ОП «Информационные системы», Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмеда Ясави, г. Туркестан, Казахстан; e-mail: erlan.serdaliev@ayu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-5403-0423.

Received 18.06.2026
Revised 25.08.2026
Accepted 26.08.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-25

МРНТИ: 20.53.19; 14.85.09

CC BY 4.0
Check for updates

А.К. Шайханова*, Г.А. Шангытбаева[2], Г.Б. Бекешова[1], Лили Нурлияна Абдулла[3]
[1]Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева,
10000, Республика Казахстан, г. Астана, ул. Сатпаева, 2
[2]Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова,
030000, Актюбинская область, г. Актобе, пр. Алии Молдагуловой, ст-е 34
[3]Университет Путра Малайзия, Серданг, Селангор, Малайзия
*e-mail: aigul.shaikhanova@gmail.com

ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ИНСТРУМЕНТОВ В ПРОФЕССИОНАЛЬНУЮ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ ПЕДАГОГОВ

Аннотация**:** *В статье представлена разработанная информационно-аналитическая методика комплексной оценки эффективности внедрения цифровых инструментов в профессиональную деятельность педагогов. Актуальность исследования определяется необходимостью перехода от описательной самооценки цифровых компетенций к*

©А.К. Шайханова, Г.А. Шангытбаева, Г.Б. Бекешова, Лили Нурлияна Абдулла, 2026

формализованному анализу данных, позволяющему измерять степень практического применения рекомендаций и динамику профессиональной деятельности. Методологическую основу составляет разработанная модель DTDC, включающая четыре уровня: осведомлённость, применение, интеграцию и визуализацию, проектирование и инновации. Исходные данные сформированы по результатам первоначального анкетирования 916 педагогов. На их основе разработан комплекс дифференцированных рекомендаций, направленных на развитие навыков выбора, применения, интеграции и создания цифровых образовательных решений. Рекомендации направлены педагогам для практической апробации продолжительностью 12 недель. Для последующей оценки разработана система нормированных показателей, охватывающая ознакомление с рекомендациями, факт их применения, регулярность использования, изменение уровня DTDC и воспринимаемое влияние цифровых инструментов на качество профессиональной деятельности. Предложенный алгоритм предусматривает сбор итоговых анкетных данных, кодирование ответов, нормирование значений, вычисление частных индексов по компонентам DTDC, расчёт интегрального индекса и коэффициентов внедрения, а также статистическую проверку полученных зависимостей. Надёжность шкал будет оцениваться с использованием коэффициента α Кронбаха, взаимосвязи категориальных переменных – критерия Пирсона χ^2. Текущий результат исследования состоит в разработке формализованной методики, инструментария итогового опроса и процедуры информационно-аналитической обработки данных. Окончательные выводы об эффективности рекомендаций будут сформулированы после завершения апробации. Предлагаемый подход обеспечивает воспроизводимость оценивания и создаёт основу для автоматизации мониторинга внедрения цифровых инструментов в образовательный процесс. Практическая значимость методики заключается в возможности её использования образовательными организациями для сопоставления результатов различных групп педагогов, выявления проблемных компонентов цифровой деятельности, обоснования управленческих решений и корректировки программ профессионального развития на основе количественно измеряемых данных, полученных в динамике.

Ключевые слова: *цифровые инструменты, информационно-аналитическая методика, модель DTDC, оценка эффективности, обработка данных, образовательный процесс.*

Введение

Цифровая трансформация образования сопровождается расширением спектра информационных технологий, применяемых при проектировании учебных занятий, создании образовательного контента, организации коммуникации, визуализации информации и оценивании результатов обучения. Облачные платформы, системы управления обучением, средства совместной работы, технологии искусственного интеллекта, виртуальной и дополненной реальности изменяют содержание профессиональной деятельности педагога и предъявляют новые требования к его цифровой компетентности. При этом результативность цифровой трансформации определяется не количеством доступных программных средств, а способностью педагога выбирать их в соответствии с образовательной задачей, интегрировать в структуру занятия, анализировать полученные данные и создавать собственные цифровые ресурсы.

Цифровая компетентность педагога рассматривается в современных исследованиях как многокомпонентное образование, объединяющее технологические, педагогические, когнитивные, этические и профессиональные характеристики. Проведённый Peters et al. обзор систематических обзоров показал, что данное понятие охватывает не только навыки работы с технологиями, но и способность безопасно, продуктивно и педагогически обоснованно действовать в цифровой образовательной среде [1]. Аналогичный вывод представлен в систематическом обзоре Heine et al., где выявлена неоднородность определений цифровых ресурсов и способов их включения в структуру профессиональной цифровой компетентности педагога [2]. Это свидетельствует о необходимости формализации исследуемых компонентов и установления измеримых связей между уровнем цифровой подготовленности и реальной практикой применения технологий.

Наиболее распространённым основанием для оценки цифровой компетентности педагогов остаются компетентностные рамки и инструменты самооценивания. Анализ инструментов на основе DigComp, выполненный Mattar et al., показал значительное разнообразие измерительных шкал, индикаторов и способов интерпретации результатов [3]. Tzafilkou et al. предложили инструмент, объединяющий педагогические и профессиональные аспекты цифровой деятельности учителей начального и среднего образования, и

подтвердили необходимость учитывать не только общетехнические умения, но и характер применения технологий в обучении [4]. Исследование Cattaneo et al. также показало, что цифровизация деятельности педагогов зависит от совокупности индивидуальных и организационных факторов, а уровень владения технологиями неодинаков в разных компонентах профессиональной деятельности [5].

Вместе с тем преобладание самооценочных инструментов создаёт методологическое ограничение. Ответ педагога о знании или использовании технологии не всегда подтверждает её системное внедрение в образовательный процесс. Самооценка может отражать осведомлённость, уверенность или намерение применять цифровое средство, но не фиксировать частоту использования, полноту реализации, наличие созданного продукта и устойчивость сформированной практики. Систематический обзор количественных исследований цифровой компетентности работающих школьных педагогов, проведённый Claro et al., подтвердил неоднородность способов измерения и необходимость совершенствования методологии оценки, включая более чёткое определение компонентов, показателей и контекста применения цифровых технологий [6].

Таким образом, для анализа цифровой трансформации недостаточно определить только общий уровень компетентности. Процесс внедрения может быть представлен как последовательность взаимосвязанных состояний: ознакомление с рекомендацией, её выбор, первоначальная апробация, повторное применение и формирование устойчивой цифровой практики. Такая формализация позволяет преобразовать результаты опроса в структурированные данные и использовать их для расчёта частных и интегральных показателей (рис. 1).



Рисунок 1 – Логика перехода от цифровой осведомлённости к устойчивому внедрению цифровых практик

Особую актуальность данная задача приобретает в связи с распространением искусственного интеллекта. Ng et al. обосновывают необходимость включения компетенций, связанных с искусственным интеллектом, в структуру цифровой подготовки педагогов и связывают их с навыками XXI века [7]. Результаты исследования Velander et al. показывают, что понимание педагогами возможностей и ограничений искусственного интеллекта существенно влияет на характер его интеграции в образовательную практику [8]. В систематическом обзоре Tan et al. установлено, что исследования применения искусственного интеллекта в преподавании развиваются быстрее, чем исследования профессионального развития педагогов, необходимого для ответственного и методически обоснованного использования таких технологий [9]. Следовательно, современные модели оценки должны учитывать не только базовые цифровые операции, но и способность педагога проектировать, проверять и безопасно применять инновационные решения.

Результаты современных исследований также показывают, что наличие цифровых знаний не гарантирует их практической реализации. Peng et al. установили взаимосвязь между отношением педагогов к технологиям, самоэффективностью, цифровой компетентностью и фактической интеграцией информационно-коммуникационных технологий [10]. Это означает, что оценка внедрения должна учитывать не только итоговый уровень, но и условия его формирования: доступность оборудования, качество интернет-соединения, наличие методической поддержки, сложность цифровых средств и готовность педагога продолжать их использование. В этой связи рекомендации по цифровому развитию целесообразно сопровождать информационно-аналитической методикой, позволяющей измерять охват, степень практической реализации, регулярность и устойчивость применения.

Существующие подходы обеспечивают развитую концептуальную основу для измерения цифровой компетентности, однако не в полной мере решают задачу комплексной оценки внедрения конкретных рекомендаций. Как правило, отдельно рассматриваются уровень компетентности, отношение к технологиям, интенсивность использования или результаты программ повышения квалификации. При этом отсутствует единая информационная схема, связывающая рекомендацию, действие педагога, степень реализации, полученный цифровой продукт, профессиональный результат и возникшие ограничения. Данный исследовательский разрыв определяет необходимость разработки методики, в которой процесс внедрения будет представлен как последовательность формализованных и количественно оцениваемых состояний.

В рамках настоящего исследования в качестве концептуальной основы применяется авторская модель DTDC (Digital Technology Development and Competence), представляющая собой многоуровневую модель оценки развития компетентности педагогов в области цифровых технологий. Данная модель DTDC включает четыре уровня цифрового развития профессиональной деятельности: Awareness – осведомлённость; Application - применение; Integration & Visualization - интеграция и визуализация; Design & Innovation - проектирование и инновации (рис. 2). В отличие от подходов, ограничивающихся общей оценкой владения технологиями, модель отражает последовательное усложнение цифровой деятельности: от понимания возможностей инструментов до их системной интеграции и создания собственных инновационных решений [11].



Рисунок 2 – Последовательность уровней цифрового развития профессиональной деятельности педагогов в модели DTDC

Первоначальная диагностика была проведена на основе опроса 916 педагогов. Полученные данные позволили определить основные характеристики использования цифровых инструментов, выявить профессиональные затруднения и сформировать рекомендации, дифференцированные по уровням DTDC. Рекомендации включают целевой выбор цифровых средств, цифровое оценивание, организацию совместной деятельности, визуализацию, анализ образовательных данных, создание цифрового контента, применение искусственного интеллекта, AR/VR, соблюдение требований безопасности и обмен профессиональным опытом. Подготовленные материалы были направлены педагогам для практической апробации.

Для последующей оценки разработана информационно-аналитическая методика, включающая структуру входных данных, систему показателей, алгоритмы определения уровней DTDC, коэффициенты ознакомления, апробации, внедрения и устойчивости, а также инструментарий итогового электронного опроса. Методика предусматривает преобразование ответов в нормализованные показатели, расчёт частных индексов и формирование интегральной оценки. Такой подход создаёт основу для автоматизации обработки данных и построения системы мониторинга цифрового развития педагогов.

На момент подготовки статьи практическая апробация рекомендаций продолжается. Поэтому исследование не ставит задачей представить окончательные показатели их эффективности. Основным результатом работы является разработка информационно-аналитической методики и подготовка технологической схемы последующего сбора, обработки и интерпретации данных.

Цель исследования состоит в разработке информационно-аналитической методики оценки эффективности внедрения рекомендаций по использованию цифровых инструментов в профессиональную деятельность педагогов.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

1. формализовать уровни цифровой профессиональной деятельности в модели DTDC;
2. разработать рекомендации, соответствующие выделенным уровням;
3. определить измеримые показатели ознакомления, апробации, внедрения и устойчивости применения рекомендаций;
4. сформировать структуру входных и выходных данных;
5. разработать алгоритмы расчёта частных и интегральных показателей;
6. подготовить инструментарий итогового опроса и процедуру практической апробации.

Научная новизна исследования заключается в формализации полного цикла внедрения рекомендаций – от ознакомления педагога с предложенным цифровым решением до его регулярного применения и отражения в показателях DTDC. Практическая значимость состоит в возможности использования разработанной методики для организации мониторинга, автоматизированной обработки результатов и определения направлений методической и технической поддержки педагогов.

Обзор существующих подходов

Современные подходы к исследованию цифровой профессиональной деятельности педагогов можно объединить в четыре группы: компетентностные модели, инструменты самооценивания, контекстно-практические методы и модели оценки новых цифровых компетенций, связанных с искусственным интеллектом.

Первая группа основывается на компетентностных рамках, среди которых наиболее широко применяется DigCompEdu. Такие модели структурируют цифровую деятельность по направлениям профессионального взаимодействия, работы с цифровыми ресурсами, организации обучения, оценивания и развития цифровых компетенций обучающихся. Обзор Peters et al. показал, что цифровая компетентность педагога представляет собой совокупность знаний, навыков и установок, необходимых для продуктивной, безопасной и этичной работы в цифровой образовательной среде [1]. Вместе с тем Heine et al. установили существенные различия в трактовке цифровых ресурсов и их роли в структуре профессиональной компетентности, что затрудняет сопоставление результатов разных исследований [2].

Вторую группу составляют самооценочные и психометрические инструменты. Mattar et al. проанализировали инструменты, построенные на основе DigComp, и выявили различия в составе индикаторов, шкалах и правилах интерпретации [3]. Tzafilkou et al. разработали инструмент, объединяющий педагогические и профессиональные компоненты цифровой деятельности учителей начального и среднего образования [4]. Аналогично Nguyen и Habók показали, что существующие средства диагностики чаще оценивают общие цифровые умения, тогда как применение технологий для оценивания и расширения возможностей обучающихся представлено значительно слабее [12]. Преимуществами самооценочных методов являются доступность, масштабируемость и возможность автоматизированного сбора данных. Их основное ограничение заключается в том, что субъективно заявленная компетентность не всегда соответствует фактической частоте и качеству применения цифровых технологий.

Третья группа подходов ориентирована на анализ практического и организационного контекста. Авторы установили, что уровень цифровизации профессиональной деятельности зависит не только от технических навыков педагога, но и от его опыта, условий работы и характеристик образовательной среды [5]. Исследователи показали, что практическая интеграция информационно-коммуникационных технологий связана с отношением педагога к технологиям, цифровой самоэффективностью и уровнем компетентности [10]. Систематический обзор Claro et al. подтвердил, что количественные исследования цифровой компетентности работающих педагогов характеризуются неоднородностью определений, измерительных инструментов и объясняющих факторов [6]. Следовательно, оценка должна включать не только итоговый балл, но также условия внедрения, частоту применения, методическую поддержку и технические барьеры.

Четвёртая группа связана с расширением традиционных моделей за счёт компетенций в области искусственного интеллекта. Ng et al. предложили рассматривать AI-компетентность

педагогов в связи с профессиональными цифровыми навыками и навыками XXI века [7]. Tan et al. в систематическом обзоре исследований применения искусственного интеллекта в преподавании и профессиональном развитии педагогов выявили необходимость усиления подготовки учителей к ответственному и методически обоснованному применению AI-инструментов [9]. Современные модели, таким образом, должны учитывать не только использование готовых цифровых сервисов, но и способность педагога критически проверять результаты работы алгоритмов, защищать данные и оценивать педагогическую целесообразность автоматизированных решений.

Обобщение существующих подходов показывает, что большинство исследований сосредоточено на измерении сформированного уровня цифровой компетентности. Значительно реже формализуется сам процесс внедрения рекомендаций: от ознакомления педагога с предложенным решением до его апробации, повторного и регулярного применения. Недостаточно представлены информационно-аналитические модели, объединяющие уровень цифровой деятельности, интенсивность внедрения, устойчивость практики и возникающие ограничения.

Для устранения данного методического разрыва в настоящем исследовании предлагается авторская модель DTDC, включающая уровни Awareness – осведомлённость; Application - применение; Integration & Visualization – интеграция и визуализация; Design & Innovation - проектирование и инновации. В отличие от подходов, ограничивающихся самооценкой цифровых навыков, разрабатываемая методика предусматривает формализованную оценку ознакомления, апробации, регулярности и устойчивости применения рекомендаций. Это позволит преобразовывать результаты электронного опроса в структурированный массив данных, рассчитывать частные и интегральные показатели и создавать основу для последующей автоматизации мониторинга цифрового развития педагогов.

Материалы и методы

Последовательность разработки и апробации информационно-аналитической методики представлена на рисунке 3.



Рисунок 3 – Последовательность разработки и апробации информационно-аналитической методики

Для последующей оценки разработан итоговый электронный опрос, включающий показатели ознакомления, продолжительности и регулярности применения рекомендаций, количества проведённых занятий и созданных цифровых материалов, а также индикаторы четырёх уровней DTDC. Поскольку обеспечить повторное участие всех первоначально опрошенных педагогов невозможно, результаты первоначального и итогового этапов будут рассматриваться как данные независимых выборок из одной целевой профессиональной совокупности.

Степень применения каждой рекомендации будет оцениваться по шкале от 0 до 4, где 0 означает отсутствие ознакомления, 1 – ознакомление без применения, 2 – однократное применение, 3 – повторное применение, 4 – регулярное использование. Индивидуальный коэффициент внедрения будет рассчитываться по формуле:

$$K_{\text{ВН},i} = \frac{\sum_{j=1}^{m_i} r_{ij}}{4m_i},$$

где r_{ij} – оценка применения j -й рекомендации i -м педагогом, m_i – количество рекомендаций, доступных для оценивания, а число 4 соответствует максимальному значению шкалы. Значение коэффициента будет находиться в диапазоне от 0 до 1.

Для каждого компонента DTDC будет рассчитан нормализованный частный индекс, а общий показатель будет определяться как среднее значение четырёх компонентов:

$$I_{\mathrm{DTDC},i} = \frac{I_{iA} + I_{iP} + I_{iIV} + I_{iDI}}{4},$$

где I_{iA} – индекс осведомлённости, I_{iP} – индекс применения, I_{iIV} – индекс интеграции и визуализации, I_{iDI}– индекс проектирования и инноваций.

Информационная обработка будет включать проверку полноты данных, удаление дубликатов, кодирование категориальных признаков, нормализацию шкал и формирование аналитического массива. Надёжность шкал будет проверяться с помощью коэффициента α Кронбаха. Для сравнения независимых выборок будут применяться t-критерий Стьюдента или критерий Манна -Уитни, а для анализа распределения по уровням DTDC - критерий χ^2. Связь степени внедрения с показателями профессиональной деятельности будет оцениваться с использованием корреляционного и регрессионного анализа при уровне статистической значимости $p < 0{,}05$.

Результаты разработки информационно-аналитической методики

Основным результатом исследования стала информационно-аналитическая методика оценки внедрения рекомендаций по использованию цифровых инструментов в профессиональной деятельности педагогов.

В основу методики была положена модель DTDC, отражающая последовательное усложнение цифровой профессиональной деятельности. Уровень Awareness характеризует осведомлённость педагога о возможностях цифровых технологий и требованиях безопасности. Application отражает самостоятельное использование готовых цифровых инструментов. Integration & Visualization соответствует системной интеграции технологий в образовательный процесс и применению визуализации. Design & Innovation характеризует проектирование собственных цифровых ресурсов и использование инновационных технологий.

Для каждого уровня были определены измеримые индикаторы (табл. 1).

Таблица 1 – Измеримые индикаторы модели

Уровень DTDC	Основное содержание	Измеримые индикаторы
Awareness	Понимание возможностей и ограничений технологий	Знание инструментов, обоснованность выбора, цифровая безопасность
Application	Практическое применение готовых решений	Частота использования, цифровое оценивание, создание и адаптация материалов
Integration & Visualization	Системное включение технологий в обучение	Интеграция в этапы занятия, визуализация, использование данных оценивания
Design & Innovation	Создание новых цифровых решений	Авторские ресурсы, искусственный интеллект, AR/VR, распространение опыта

На основе модели был подготовлен комплекс из 14 рекомендаций. Они охватили целевой выбор цифровых инструментов, освоение новых сервисов, цифровую безопасность, электронное оценивание, совместную работу, формирование цифровой библиотеки, интеграцию технологий в структуру занятия, визуализацию, анализ результатов оценивания, создание авторских ресурсов, применение искусственного интеллекта, AR/VR, цифровую рефлексию и обмен профессиональным опытом. Каждая рекомендация была представлена в формате «проблема – действие – ожидаемый эффект – измеримый показатель», что обеспечило возможность её последующей количественной оценки.

Подготовленный пакет рекомендаций был направлен педагогам образовательных организаций для практической апробации. Участникам было предложено выбрать не менее трёх рекомендаций, соответствующих их профессиональным задачам и техническим возможностям, и применить их в своей деятельности. Такой подход позволил сохранить

вариативность цифровых средств и одновременно установить единые критерии оценки процесса внедрения.

В разработанной методике процесс внедрения был представлен в виде последовательности пяти состояний:

$$S_0 \rightarrow S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow S_3 \rightarrow S_4,$$

где (S_0) означает отсутствие ознакомления с рекомендацией, (S_1) – ознакомление без применения, (S_2) – однократное применение, (S_3) – повторное применение, (S_4) – регулярное использование. Данная шкала позволяет отделить формальное получение материалов от их фактического внедрения.

Для количественного анализа был разработан индивидуальный коэффициент внедрения:

$$K_{\text{вн},i} = \frac{\sum_{j=1}^{m_i} r_{ij}}{4m_i},$$

где r_{ij} – оценка применения j -й рекомендации i -м педагогом, m_i – количество рекомендаций, доступных для оценивания, а число 4 соответствует максимальному значению шкалы. Значение коэффициента находится в диапазоне от 0 до 1. Предусмотрено выделение низкой, частичной, достаточной и высокой степени внедрения.

Дополнительно были сформированы групповые показатели:

$$K_{\text{оз}} = \frac{N_{\text{ознакомившихся}}}{N_{\text{итог}}} \times 100\%,$$

$$K_{\text{апр}} = \frac{N_{\text{применивших}}}{N_{\text{ознакомившихся}}} \times 100\%,$$

$$K_{\text{уст}} = \frac{N_{\text{регулярно применяющих}}}{N_{\text{применивших}}} \times 100\%.$$

Коэффициент ознакомления $K_{\text{оз}}$ характеризует охват педагогов рекомендациями, коэффициент апробации $K_{\text{апр}}$ – переход от изучения материалов к практическому применению, коэффициент устойчивости $K_{\text{уст}}$ – долю педагогов, перешедших к регулярному использованию.

Для оценки профессиональной деятельности была сформирована система из четырёх частных индексов. Значения ответов по пятибалльной шкале будут нормализованы:

$$z_{ijk} = \frac{x_{ijk} - 1}{4},$$

Общий индекс DTDC будет рассчитываться по формуле:

$$I_{\text{DTDC},i} = \frac{I_{iA} + I_{iP} + I_{iIV} + I_{iDI}}{4}$$

где I_{iA} – индекс осведомлённости Awareness, I_{iP} – индекс применения Application, I_{iIV} – индекс интеграции и визуализации Integration & Visualization, I_{iDI} – индекс проектирования и инноваций Design & Innovation.

В рамках методики была определена структура аналитического набора данных. Она включает обезличенный идентификатор участника, тип образовательной организации, педагогический стаж, предметную область, продолжительность апробации, код рекомендации, степень её применения, показатели компонентов DTDC, сведения о созданных цифровых материалах, выявленных барьерах и намерении продолжать использование рекомендаций.

Обработка данных организована по схеме «входные данные – предварительная обработка – расчёт показателей – классификация – аналитическое представление». На вход будут поступать ответы итоговой электронной анкеты. На этапе предварительной обработки предусматриваются проверка полноты, удаление дубликатов, кодирование категориальных признаков и нормализация шкал. Далее будут рассчитываться коэффициенты внедрения и индексы DTDC. Выходными данными станут распределение педагогов по уровням, степень

внедрения отдельных рекомендаций, перечень основных барьеров и статистические связи между интенсивностью внедрения и профессиональными показателями.

Для сбора данных был разработан итоговый электронный опрос, включающий 16 основных вопросов. Анкета содержит блоки общей информации, ознакомления с рекомендациями, степени их практического применения, показателей DTDC, профессиональных изменений и барьеров. Сокращённая структура формы снижает нагрузку на респондентов и одновременно сохраняет показатели, необходимые для информационно-аналитической обработки.

Разработанная методика позволяет получить несколько уровней результатов: оценить общий охват рекомендациями, определить наиболее и наименее востребованные направления, рассчитать индивидуальную интенсивность внедрения, установить уровни DTDC и выявить организационные и технические ограничения. При этом она не зависит от конкретных программных продуктов: педагог может использовать разные цифровые сервисы, если они обеспечивают выполнение соответствующей профессиональной функции.

Таким образом, в рамках исследования были подготовлены все основные компоненты информационно-аналитической методики: модель уровней, система индикаторов, пакет рекомендаций, шкала состояний внедрения, расчётные коэффициенты, структура данных и итоговый опрос. Практическая апробация рекомендаций продолжается, поэтому окончательные значения показателей эффективности в настоящей статье не приводятся. Разработанная методика представляет самостоятельный результат и создаёт технологическую основу для последующего сбора, автоматизированной обработки и интерпретации данных.

Обсуждение

Разработанная информационно-аналитическая методика расширяет традиционные подходы к оценке цифровой компетентности педагогов. В отличие от инструментов, основанных преимущественно на самооценке знаний и умений, предложенный подход учитывает последовательные стадии внедрения рекомендаций: ознакомление, однократную апробацию, повторное и регулярное применение. Это позволяет отделить формальную готовность использовать технологии от их фактического включения в профессиональную деятельность.

Модель DTDC обеспечивает структурирование цифрового развития по четырём уровням – от осведомлённости до проектирования инновационных решений. Преимуществом методики является связь каждого уровня с наблюдаемыми показателями: частотой использования инструментов, интеграцией в структуру занятия, созданием цифровых материалов, применением искусственного интеллекта и AR/VR, а также распространением профессионального опыта. Формализация показателей создаёт основу для автоматизации обработки анкетных данных и последующего мониторинга цифровой трансформации.

Практическая ценность методики состоит в её независимости от конкретных программных продуктов. Она оценивает не владение отдельным сервисом, а характер и устойчивость цифровой деятельности. Получаемые результаты могут использоваться для определения востребованных рекомендаций, выявления технических и методических барьеров и формирования адресной поддержки педагогов.

Вместе с тем исследование имеет ряд ограничений. Первоначальная и итоговая выборки будут независимыми, что позволит оценить различия на групповом уровне, но не индивидуальную динамику каждого педагога. Кроме того, часть показателей основывается на самоотчётах участников. В дальнейшем целесообразно дополнить их анализом цифровых продуктов, журналов активности и экспертными оценками.

Таким образом, разработанная методика представляет собой основу для воспроизводимой оценки внедрения цифровых рекомендаций. Следующий этап исследования будет включать завершение апробации, статистическую проверку показателей и уточнение пороговых значений модели DTDC.

Заключение

На основе результатов опроса 916 педагогов разработана информационно-аналитическая методика оценки внедрения цифровых инструментов. Она включает модель DTDC, практические рекомендации, систему измеримых показателей, структуру данных, алгоритмы расчёта и инструментарий итогового опроса.

Предложенная методика позволяет оценивать не только цифровую компетентность, но и последовательные стадии внедрения рекомендаций – от ознакомления до регулярного применения. Формализация показателей создаёт основу для автоматизированного мониторинга цифрового развития педагогов. После завершения апробации будут рассчитаны фактические показатели внедрения, проверена их связь с уровнями DTDC и уточнены параметры методики.

Список литературы

1. Teacher digital competence development in higher education: Overview of systematic reviews / M. Peters et al // Australasian Journal of Educational Technology. – 2022. – Vol. 38, № 3. – P. 122-139. https://doi.org/10.14742/ajet.7543.
2. Heine S. Digital resources as an aspect of teacher professional digital competence: One term, different definitions – a systematic review / S. Heine, M. Krepf, J. König // Education and Information Technologies. – 2023. – Vol. 28. – P. 3711-3738. https://doi.org/10.1007/s10639-022-11321-z.
3. Mattar J. DigComp-based digital competence assessment tools: Literature review and instrument analysis / J. Mattar, D.K. Ramos, M.R. Lucas // Education and Information Technologies. – 2022. – Vol. 27. – P. 10843-10867. https://doi.org/10.1007/s10639-022-11034-3.
4. Tzafilkou K. Assessing teachers' digital competence in primary and secondary education: Applying a new instrument to integrate pedagogical and professional elements for digital education / K. Tzafilkou, M. Perifanou, A.A. Economides // Education and Information Technologies. – 2023. – Vol. 28. – P. 16017-16040. https://doi.org/10.1007/s10639-023-11848-9.
5. Cattaneo A.A.P. How digitalised are vocational teachers? Assessing digital competence in vocational education and looking at its underlying factors / A.A.P. Cattaneo, C. Antonietti, M. Rauseo // Computers & Education. – 2022. – Vol. 176. – Article 104358. https://doi.org/10.1016/j.compedu.2021.104358.
6. Systematic review of quantitative research on digital competences of in-service school teachers / M. Claro et al // Computers & Education. – 2024. – Vol. 215. – Article 105030. https://doi.org/10.1016/j.compedu.2024.105030.
7. Teachers' AI digital competencies and twenty-first century skills in the post-pandemic world / D.T.K. Ng et al // Educational Technology Research and Development. – 2023. – Vol. 71. – P. 137-161. https://doi.org/10.1007/s11423-023-10203-6.
8. Artificial intelligence in K–12 education: Eliciting and reflecting on Swedish teachers' understanding of AI and its implications for teaching and learning / J. Velander et al // Education and Information Technologies. – 2024. – Vol. 29. – P. 4085-4105. https://doi.org/10.1007/s10639-023-11990-4.
9. Tan X. Artificial intelligence in teaching and teacher professional development: A systematic review / X. Tan, G. Cheng, M.H. Ling // Computers and Education: Artificial Intelligence. – 2025. – Vol. 8. – Article 100355. https://doi.org/10.1016/j.caeai.2024.100355.
10. Peng R. Exploring the role of attitudes, self-efficacy, and digital competence in influencing teachers' integration of ICT: A partial least squares structural equation modeling study / R. Peng, R.A. Razak, S.H. Halili // Heliyon. – 2024. – Vol. 10. – Article e34234. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34234.
11. Fostering Teachers' Digital Competence in AI-Supported Learning Environments: Implications for Interactive Teaching and Student Achievement / G. Aimicheva et al // Appl. Sci. – 2025. – № 15. – 12597. https://doi.org/10.3390/app152312597.
12. Nguyen L.A.T. Tools for assessing teacher digital literacy: A review / L.A.T. Nguyen, A. Habók // Journal of Computers in Education. – 2024. – Vol. 11. – P. 305-346. https://doi.org/10.1007/s40692-022-00257-5.

Информация о финансировании

Данное исследование финансировалось/финансируется Комитетом по науке Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP 23489228).

А.К. Шайханова[*], Г.А. Шаңғытбаева[2], Г.Б. Бекешова[1], Лили Нурлияна Абдулла[3]
[1]Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
10000 Қазақстан Республикасы, Астана қ., Сәтбаев к-сі, 2
[2]Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті,
030000, Ақтөбе облысы, Ақтөбе қаласы, Әлия Молдағұлова даңғылы, 34-көше
[3]Путра Малайзия университеті, Серданг, Селангор, Малайзия
[*]e-mail: aigul.shaikhanova@gmail.com

ПЕДАГОГТЕРДІҢ КӘСІБИ ҚЫЗМЕТІНЕ ЦИФРЛЫҚ ҚҰРАЛДАРДЫ ЕНГІЗУ ТИІМДІЛІГІН БАҒАЛАУДЫҢ АҚПАРАТТЫҚ-ТАЛДАМАЛЫҚ ӘДІСТЕМЕСІ

Аңдатпа: *Мақалада педагогтердің кәсіби қызметіне цифрлық құралдарды енгізу тиімділігін кешенді бағалауға арналған әзірленген ақпараттық-талдамалық әдістеме ұсынылған. Зерттеудің өзектілігі цифрлық құзыреттерді сипаттамалық өзін-өзі бағалаудан ұсынымдарды практикада қолдану дәрежесін және кәсіби қызметтің өзгеру динамикасын өлшеуге мүмкіндік беретін деректерді формалданған талдауға көшу қажеттілігімен айқындалады. Әдіснамалық негізді төрт деңгейді: хабардарлықты, қолдануды, интеграциялау мен визуализациялауды, жобалау мен инновацияны қамтитын DTDC моделі құрайды. Бастапқы деректер 916 педагог арасында жүргізілген алғашқы сауалнама нәтижелері негізінде қалыптастырылды. Алынған нәтижелер бойынша цифрлық білім беру шешімдерін таңдау, қолдану, интеграциялау және әзірлеу дағдыларын дамытуға бағытталған сараланған ұсынымдар кешені дайындалды. Ұсынымдар педагогтерге 12 апта бойы практикалық апробациядан өткізу үшін жіберілді. Кейінгі бағалау үшін ұсынымдармен танысу, оларды қолдану фактісі, пайдалану жүйелілігі, DTDC деңгейінің өзгеруі және цифрлық құралдардың кәсіби қызмет сапасына ықпалы туралы субъективті бағалауды қамтитын нормаланған көрсеткіштер жүйесі әзірленді. Ұсынылған алгоритм қорытынды сауалнама деректерін жинауды, жауаптарды кодтауды, мәндерді нормалауды, DTDC компоненттері бойынша жеке индекстерді есептеуді, интегралдық индекс пен енгізу коэффициенттерін анықтауды, сондай-ақ алынған өзара байланыстарды статистикалық тексеруді көздейді. Шкалалардың сенімділігі Кронбахтың αкоэффициенті арқылы, ал санаттық айнымалылар арасындағы өзара байланыстар Пирсонның хи-квадрат критерийі χ^2 арқылы бағаланатын болады. Зерттеудің қазіргі нәтижесі формалданған әдістемені, қорытынды сауалнама құралдарын және деректерді ақпараттық-талдамалық өңдеу рәсімін әзірлеуден тұрады. Ұсынымдардың тиімділігі туралы түпкілікті қорытындылар апробация аяқталғаннан кейін тұжырымдалатын болады. Ұсынылған тәсіл бағалаудың қайталанымдылығын қамтамасыз етеді және білім беру үдерісіне цифрлық құралдарды енгізу мониторингін автоматтандыруға негіз қалыптастырады. Әдістеменің практикалық маңыздылығы оны білім беру ұйымдарында педагогтердің әртүрлі топтарының нәтижелерін салыстыру, цифрлық қызметтің проблемалық компоненттерін анықтау, басқарушылық шешімдерді негіздеу және динамикада алынған сандық деректер негізінде кәсіби даму бағдарламаларын түзету үшін пайдалану мүмкіндігімен айқындалады.*

Түйін сөздер: *цифрлық құралдар; ақпараттық-талдамалық әдістеме; DTDC моделі; тиімділікті бағалау; деректерді өңдеу; білім беру үдерісі.*

A.K. Shaikhanova[*], G.A. Shangytbayeva[2], G.B. Bekeshova[1], Lili Nurliyana Abdullah[3]
[1]L.N. Gumilyov Eurasian National University, 10000 Kazakhstan, Astana city, 2 Satbaev st.
[2]K. Zhubanov Aktobe Regional University,
030000, Aktobe Region, the city of Aktobe, Astana district, Aliya Moldagulova Avenue, building 34
[3]Universiti Putra Malaysia, Serdang, Selangor, Malaysia
[*]e-mail: aigul.shaikhanova@gmail.com

AN INFORMATION-ANALYTICAL METHODOLOGY FOR EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF DIGITAL TOOL INTEGRATION INTO TEACHERS' PROFESSIONAL PRACTICE

The article presents a developed information-analytical methodology for the comprehensive evaluation of the effectiveness of integrating digital tools into teachers' professional practice. The relevance of the study is determined by the need to move from descriptive self-assessment of digital competencies to formalized data analysis that enables the measurement of the practical application of recommendations and changes in professional practice over time. The methodological framework is based on the developed DTDC model, which comprises four levels: Awareness, Application, Integration and Visualization, and Design and Innovation. The initial dataset was generated from the results of a baseline survey involving 916 teachers. Based on these results, a set of differentiated recommendations was developed to enhance teachers' skills in selecting, applying, integrating, and creating digital educational solutions. The recommendations were distributed to teachers for a 12-week practical pilot implementation. For subsequent evaluation, a system of normalized

indicators was developed, covering familiarity with the recommendations, their practical application, regularity of use, changes in the DTDC level, and the perceived impact of digital tools on the quality of professional practice. The proposed algorithm involves collecting final survey data, coding responses, normalizing values, calculating component-specific DTDC indices, determining an integral index and implementation coefficients, and statistically testing the identified relationships. Scale reliability will be assessed using Cronbach's α, while associations between categorical variables will be evaluated using Pearson's chi-square test χ^2. The current outcome of the study is the development of a formalized methodology, a final survey instrument, and a procedure for information-analytical data processing. Final conclusions regarding the effectiveness of the recommendations will be formulated after the pilot implementation has been completed. The proposed approach ensures the reproducibility of the evaluation and provides a basis for automating the monitoring of digital tool integration into the educational process. The practical significance of the methodology lies in its potential use by educational organizations to compare the results of different groups of teachers, identify problematic components of digital practice, support managerial decision-making, and adjust professional development programmes based on quantitatively measurable longitudinal data.

Key words: *digital tools; information-analytical methodology; DTDC model; effectiveness evaluation; data processing; educational process.*

Сведения об авторах

Айгуль Кайрулаевна Шайханова* – PhD, ассоциированный профессор, профессор кафедры информационной безопасности, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан; e-mail: shaikhanova_ak@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6006-4813.

Гульмира Асаугаликызы Шангытбаева – PhD, ассоциированный профессор, доцент кафедры информатики и информационных технологий, Актюбинский региональный университет имени К.Жубанова, Актобе, Казахстан; e-mail: gulmjanet@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4615-5756.

Гульвира Бауржановна Бекешова – магистр технических наук, ст. преподаватель кафедры информационной безопасности, Евразийский национальный университет имени Л.Н.Гумилева, Астана; e-mail: bekeshova_gb@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1635-4693.

Лили Нурлияна Абдулла – PhD, ассоциированный профессор кафедры мультимедиа, факультет компьютерных наук и информационных технологий, Университет Путра Малайзия, Серданг, Селангор, Малайзия; e-mail: liyana@upm.edu.my. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8704-2390.

Авторлар туралы мәліметтер:

Айгүл Қайрулақызы Шайханова* – PhD, қауымдастырылған профессор, Ақпараттық қауіпсіздік кафедрасының профессоры, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті; Астана, Қазақстан Республикасы; e-mail: aigul.shaikhanova@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6006-4813.

Гульмира Асаугаликызы Шангытбаева – PhD, қауымдастырылған профессор, Информатика және ақпараттық технологиялар кафедрасының доценті, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе қ., Қазақстан; e-mail: gulmjanet@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4615-5756

Гульвира Бауржанқызы Бекешова – техника ғылымдарының магистрі, Ақпараттық қауіпсіздік кафедрасының оқытушысы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан Республикасы; e-mail: bekeshova_gb@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1635-4693.

Лили Нурлияна Абдулла – PhD, қауымдастырылған профессор, Мультимедиа кафедрасы, Компьютер ғылымдары және ақпараттық технологиялар факультеті, Путра Малайзия университеті; Серданг, Селангор, Малайзия; e-mail: liyana@upm.edu.my. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8704-2390.

Information about the authors

Aigul Shaikhanova* – PhD, Professor of the Department of Information Security, Gumilyov Eurasian National University, Astana, Republic of Kazakhstan; e-mail: shaikhanova_ak@enu.kz, ORCID: https://orcid.org/0000–0001–6006–4813

Gulmira Shangytbayeva – PhD, Associate Professor of the Department of Informatics and Information Technologies, Zhubanov University, Aktobe, Republic of Kazakhstan; e-mail: gulmjanet@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000–0003–4615–5756.

Gulvira Bekeshova – Master of Technical Sciences, Senior Lecturer at the Department of Information Security, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; e-mail: bekeshova_gb@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1635-4693.

Lily Nurliana Abdullah – PhD, Associate Professor, Department of Multimedia, Faculty of Computer Science and Information Technology, Universiti Putra Malaysia, Serdang, Selangor, Malaysia; e-mail: liyana@upm.edu.my. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8704-2390.

Поступила в редакцию 01.06.2026
Поступила после доработки 31.08.2026
Принята к публикации 02.09.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-26

МРНТИ: 76.01.85

А.К. Үкібай[1], Е.А. Дайнеко[2], А.Б. Ақбаян[3], Д.С. Баймагамбетова[2], Г.Б. Бекешова[4*]
[1]Филиал Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» в городе Алматы, проспект аль-Фараби, 71, корпус 12, Алматы, 050040,
[2]Satbayev University, ул. Сатпаева, 22а, Алматы, 050013, Казахстан,
[3]Narxoz University, ул. Жандосова, 55, Алматы, 050035, Казахстан,
[4]Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева,
010000 Республика Казахстан, г. Астана, ул. Сатпаева, 2
*e-mail: gulvirabauyrzhanovna@gmail.com.

РАЗРАБОТКА ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОЦЕНКИ РИСКА САХАРНОГО ДИАБЕТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Аннотация: *Сахарный диабет является одним из наиболее распространенных хронических неинфекционных заболеваний и требует раннего выявления лиц с повышенным риском. В данной статье представлена разработка веб-приложения для предварительной оценки риска сахарного диабета на основе симптоматических и демографических данных пользователя. Система реализована на языке Python с использованием фреймворка FastAPI и модуля машинного обучения, обученного на открытом наборе данных UCI Early Stage Diabetes Risk Prediction Dataset (520 наблюдений, 16 признаков). Сравнение классификаторов Logistic Regression, Support Vector Machine и Random Forest выполнено с использованием повторной стратифицированной 10-кратной кросс-валидации (5 повторов, 50 оценок для каждой модели). Наилучшие и наиболее устойчивые показатели получены для модели Random Forest: accuracy 98.27 ± 1.60%, F1-мера 98.59 ± 1.31%, ROC-AUC 99.93 ± 0.15%. Преимущество Random Forest над Support Vector Machine и Logistic Regression подтверждено статистически (скорректированный парный t-критерий, 5×2cv t-критерий и критерий знаковых рангов Уилкоксона, p < 0.05). Выполнен анализ вклада признаков тремя независимыми методами (значимость по критерию Джини, перестановочная значимость и значения SHAP), согласованно выделившими полиурию, полидипсию, пол и возраст как наиболее информативные признаки. На основе полученного ранжирования построен сокращенный опросник из 9 признаков, для которого статистически значимого снижения качества классификации по сравнению с полным набором из 16 признаков не выявлено (accuracy 97.62 ± 1.87%, p = 0.246), что позволяет сократить объем пользовательского ввода на 43.8%. Итоговая модель интегрирована в веб-приложение, отображающее уровень риска, визуальный индикатор и блок профилактических рекомендаций. Разработанное приложение следует рассматривать как программный прототип для предварительной самооценки и повышения осведомленности пользователя; оно не предназначено для постановки диагноза и требует дальнейшей внешней клинической валидации на независимых данных.*

Ключевые слова: *сахарный диабет; машинное обучение; веб-приложение; FastAPI; оценка риска; кросс-валидация; статистическая проверка гипотез; значимость признаков; SHAP; отбор признаков; scikit-learn; ранняя диагностика.*

Введение

Сахарный диабет (СД) относится к числу наиболее распространенных хронических неинфекционных заболеваний и представляет собой одну из ключевых глобальных медико-

©А.К. Үкібай, Е.А. Дайнеко, А.Б. Ақбаян, Д.С. Баймагамбетова, Г.Б. Бекешова, 2026

социальных проблем. По данным Международной диабетической федерации (IDF), в 2025 году количество взрослых пациентов с диабетом во всем мире составило около 589 миллионов человек, а к 2050 году ожидается рост данного показателя до более чем 853 миллионов [1]. Наиболее распространенной формой заболевания является сахарный диабет 2 типа (СД2), на долю которого приходится около 90-95% случаев. СД2 характеризуется постепенным развитием и длительным бессимптомным течением, что нередко приводит к позднему выявлению заболевания и развитию осложнений.

Раннее выявление лиц с повышенным риском развития диабета является важной задачей современной системы здравоохранения. Существенная часть факторов риска СД2 связана с образом жизни и включает низкую физическую активность, нарушение питания, ожирение, хронический стресс и нарушения сна [2]. Использование доступных неинвазивных инструментов предварительного скрининга может способствовать более раннему изменению поведенческих факторов и снижению вероятности развития осложнений [3].

В последние годы методы машинного обучения (ML) и цифровые медицинские платформы активно применяются для решения задач прогнозирования и поддержки принятия решений в здравоохранении [4, 5]. В области диабета значительное число исследований посвящено построению классификационных моделей на основе медицинских наборов данных [6]. Однако многие существующие работы ограничиваются сравнением алгоритмов машинного обучения без последующей интеграции моделей в полнофункциональные пользовательские системы. Кроме того, значительная часть существующих цифровых решений ориентирована преимущественно на пациентов с уже установленным диагнозом, а не на предварительную оценку риска [7, 8].

Применение методов машинного обучения для прогнозирования и предварительной оценки риска сахарного диабета активно исследуется в последние годы. Наиболее распространенные подходы основаны на использовании классификационных алгоритмов, обучаемых на медицинских наборах данных, содержащих симптоматические, демографические и клинические признаки пациентов. Среди наиболее часто используемых алгоритмов выделяются Logistic Regression, Support Vector Machine, Decision Tree и Random Forest.

A. Mujumdar и V. Vaidehi выполнили сравнительный анализ нескольких алгоритмов машинного обучения на наборе данных PIMA Indians Diabetes Database и показали, что Random Forest обеспечивает наиболее высокую точность классификации благодаря ансамблевому механизму принятия решений и снижению чувствительности к шуму данных [9]. R. Krishnamoorthi et al. предложили гибридный подход к отбору признаков, сочетающий методы фильтрации и обертки, что позволило повысить качество классификации и сократить размерность входных данных [10]. В ряде последующих исследований также отмечается высокая эффективность методов машинного обучения при анализе симптоматических и клинических признаков диабета [11, 12].

Одновременно с развитием алгоритмов машинного обучения активно развиваются цифровые медицинские платформы, ориентированные на автоматизацию мониторинга и предварительной оценки состояния пациентов. A. Rghioui et al. предложили систему мониторинга диабета на основе интернета вещей (IoT), объединяющую датчики и облачные ML-сервисы для анализа состояния пользователя в реальном времени [13]. Однако подобные решения требуют специализированного оборудования и устойчивой аппаратной инфраструктуры. Это ограничивает их применение в условиях ограниченных ресурсов и массового пользовательского доступа.

В исследованиях I. Dankwa-Mullan et al. и G. Fagherazzi et al. подчеркивается, что эффективность систем искусственного интеллекта в здравоохранении определяется не только качеством алгоритмов, но и доступностью интерфейсов, удобством взаимодействия и возможностью интеграции в повседневные пользовательские сценарии [14, 15]. Современные подходы к цифровому здравоохранению рассматривают ML-модели как часть более широких интеллектуальных систем поддержки принятия решений, включающих обработку пользовательских данных, визуализацию результатов и механизмы взаимодействия с пользователем [5, 16, 17]. Дополнительное внимание в современных исследованиях

уделяется вопросам интерпретируемости, надежности и практической интеграции AI-систем в клинические и пользовательские сценарии [18, 19].

Несмотря на значительное количество исследований в области прогнозирования диабета, многие существующие работы сосредоточены преимущественно на сравнении алгоритмов и анализе точности классификации на открытых наборах данных. При этом существенно меньше внимания уделяется вопросам практической интеграции моделей машинного обучения в легковесные пользовательские веб-системы, пригодные для быстрого предварительного скрининга без использования специализированного оборудования. Кроме того, современные исследования подчеркивают важность прозрачности и интерпретируемости медицинских AI-систем, особенно в задачах поддержки принятия решений и взаимодействия с пользователем [20].

В данной работе представлено веб-приложение для предварительной оценки риска сахарного диабета на основе симптоматических и демографических данных пользователя. Разработанная система объединяет серверную архитектуру на базе Python/FastAPI, модуль машинного обучения и браузерный пользовательский интерфейс для выполнения быстрой предварительной оценки риска без необходимости лабораторных исследований или специализированного оборудования. Такой подход позволяет рассматривать систему как легковесный программный прототип, ориентированный на применение в условиях ограниченной инфраструктуры и сценариях удаленного предварительного скрининга.

Цель работы – разработка и экспериментальное обоснование воспроизводимой программной системы предварительной оценки риска сахарного диабета по симптоматическим и демографическим признакам, включая определение минимального набора признаков, достаточного для сохранения качества классификации. Для достижения указанной цели решались следующие задачи: построение воспроизводимого конвейера предварительной обработки данных и обучения моделей машинного обучения на открытом наборе данных UCI Early Stage Diabetes Risk Prediction Dataset; сравнительная оценка классификаторов Logistic Regression, Support Vector Machine и Random Forest с использованием повторной стратифицированной 10-кратной кросс-валидации; статистическая проверка значимости различий между классификаторами; анализ вклада отдельных признаков в прогноз методами Gini importance, перестановочной значимости и SHAP; построение сокращенного симптоматического опросника и проверка сохранения качества классификации при его использовании; интеграция итоговой модели в веб-приложение и определение границ применимости полученного решения.

Основные особенности разработанной системы включают:

– воспроизводимый конвейер предварительной обработки данных, обучения и выбора модели машинного обучения;

– протокол оценки качества, основанный на повторной стратифицированной 10-кратной кросс-валидации и статистической проверке значимости различий между моделями;

– анализ вклада признаков тремя независимыми методами (значимость по критерию Джини, перестановочная значимость, значения SHAP) и построенный на его основе сокращенный симптоматический опросник из 9 признаков вместо 16;

– сравнительную оценку классификаторов Logistic Regression, Support Vector Machine и Random Forest на наборе данных UCI Early Stage Diabetes Risk Prediction Dataset (520 наблюдений);

– интеграцию итоговой модели в развертываемое веб-приложение на основе Python/FastAPI с визуальным представлением результата оценки риска и генерацией профилактических рекомендаций для пользователя.

Научная новизна работы состоит не в самом факте объединения модели машинного обучения и веб-сервиса: интеграция ML-моделей в веб-приложения на основе REST API является известным инженерным подходом и неоднократно описывалась в литературе, поэтому в настоящей работе она рассматривается как инженерная основа реализации, а не как научный результат. Новизна предлагаемого решения заключается в следующем.

Во-первых, предложена схема отбора симптоматических признаков, в которой ранжирование выполняется одновременно по трем независимым критериям – значимости по критерию Джини, перестановочной значимости и значениям SHAP, – а решение о сокращении набора принимается не по эвристически заданному порогу, а по результату статистической

проверки различия качества сокращенной и полной моделей. Применение предложенной схемы позволило уменьшить число признаков с 16 до 9 (на 43.8%) без статистически значимого снижения качества классификации ($p = 0.246$).

Во-вторых, полученный сокращенный набор признаков непосредственно определяет структуру пользовательской формы веб-приложения: сокращение опросника уменьшает время его заполнения и вероятность ошибок самооценки, что является практически значимым результатом именно для систем предварительного самоскрининга, работающих без участия медицинского персонала.

В-третьих, сравнение классификаторов выполнено не по единственному разбиению выборки, а с использованием повторной стратифицированной кросс-валидации и трех статистических критериев проверки значимости различий, что повышает достоверность вывода о преимуществе ансамблевой модели по сравнению с работами, ограничивающимися однократным разбиением данных.

Научно-практическая значимость работы заключается в создании воспроизводимого программного прототипа системы предварительного скрининга риска диабета, объединяющего сокращенный симптоматический опросник, статистически обоснованный выбор модели, механизм анализа вклада признаков и веб-интерфейс в рамках единой программной архитектуры. Разработанный подход может рассматриваться как основа для дальнейшего расширения системы, адаптации на локальных клинических данных и последующей внешней валидации.

Условия и методы исследования

Условия проведения исследования определяются характером используемых данных и постановкой задачи. Во-первых, используются исключительно симптоматические и демографические признаки, регистрируемые со слов пациента; лабораторные показатели (уровень глюкозы крови, HbA1c, результаты перорального глюкозотолерантного теста) в исследовании не применяются. Во-вторых, все данные получены в одном лечебном учреждении, что ограничивает демографическую и географическую репрезентативность выборки. В-третьих, независимая внешняя выборка и проспективное клиническое наблюдение отсутствуют, поэтому все приводимые оценки качества являются внутренними оценками модели на открытом наборе данных. В-четвертых, вычислительные эксперименты выполнялись в среде Python 3.11 с использованием библиотек scikit-learn, pandas, numpy, SciPy, SHAP и joblib при фиксированном значении генератора псевдослучайных чисел (random_state = 42), что обеспечивает воспроизводимость приведенных результатов.

Для обучения и оценки модели использовался открытый набор данных UCI Early Stage Diabetes Risk Prediction Dataset, содержащий 520 записей, сформированных на основе анкетирования пациентов Sylhet Diabetes Hospital (Bangladesh) [21]. Набор данных включает возраст, пол и 14 симптоматических признаков, связанных с ранними проявлениями сахарного диабета, включая полиурию, полидипсию, резкую потерю веса, слабость, полифагию, нарушение зрения, зуд кожи, раздражительность, замедленное заживление ран, частичный парез, мышечную скованность, алопецию и ожирение. Целевая переменная представлена бинарным классом, отражающим наличие или отсутствие риска диабета.

Распределение классов является умеренно несбалансированным: 320 наблюдений относятся к положительному классу и 200 – к отрицательному, что соответствует соотношению приблизительно 1.6:1. Предварительная обработка данных включала преобразование категориальных признаков в числовой формат с использованием методов кодирования категориальных переменных библиотеки scikit-learn. После обработки формировались матрица признаков X и целевой вектор y.

Кодирование признаков выполнялось по фиксированной схеме: бинарные симптоматические признаки, принимающие значения «да»/«нет», преобразовывались в значения 1 и 0; признак «пол» кодировался бинарно; числовой признак «возраст» подвергался стандартизации. Порядок признаков фиксировался и сохранялся вместе с моделью, что обеспечивает идентичность преобразования входных данных на этапе обучения и на этапе эксплуатации веб-приложения и исключает рассогласование структуры вектора признаков при обработке пользовательского запроса.

Для обеспечения корректности оценки качества модели набор данных был разделен на обучающую и тестовую выборки в соотношении 80/20 с использованием стратифицированного разбиения train_test_split, что позволило сохранить исходное распределение классов в обеих выборках.

Оценка качества моделей выполнялась в два этапа. На первом, основном этапе использовалась повторная стратифицированная k-кратная кросс-валидация при k = 10 и пяти независимых повторах, что дает 50 оценок качества для каждой модели. Стратификация обеспечивает сохранение исходного соотношения классов 1.6:1 в каждом фолде, а повторение процедуры с различными разбиениями снижает зависимость результата от конкретного разбиения выборки. Данный протокол выбран как существенно более надежный по сравнению с однократным разделением данных, которое при объеме выборки 520 наблюдений дает оценки качества с высокой дисперсией. На втором этапе выполнялась контрольная оценка на отложенной тестовой выборке, не участвовавшей в обучении.

Для проверки статистической значимости различий между классификаторами использовались три критерия. Скорректированный парный t-критерий применялся к 50 значениям метрик, полученным при повторной кросс-валидации; данный критерий учитывает зависимость между перекрывающимися обучающими подвыборками и корректирует оценку дисперсии, что снижает вероятность ошибки первого рода по сравнению с обычным парным t-критерием [26]. Дополнительно применялся парный 5×2cv t-критерий [25], рекомендованный для сравнения алгоритмов классификации на выборках ограниченного объема, и непараметрический критерий знаковых рангов Уилкоксона, не требующий предположения о нормальности распределения разностей [27]. Уровень значимости во всех проверках принимался равным 0.05.

Анализ вклада признаков выполнялся тремя независимыми методами. Первый метод – значимость признаков по критерию Джини, вычисляемая непосредственно в модели Random Forest как суммарное уменьшение неоднородности узлов при разбиении по данному признаку [29]. Второй метод – перестановочная значимость, определяемая как снижение F1-меры модели при случайной перестановке значений одного признака (50 перестановок для каждого признака); данный метод не зависит от внутренней структуры модели и позволяет проверить устойчивость полученного ранжирования. Третий метод – значения SHAP, вычисляемые алгоритмом TreeExplainer и позволяющие оценить как величину, так и направление вклада каждого признака в итоговый прогноз [28].

На основе согласованного ранжирования признаков строился сокращенный набор. Признаки последовательно включались в модель в порядке убывания значимости; для каждого набора из k признаков (k = 1, …, 16) выполнялась повторная стратифицированная 10-кратная кросс-валидация, после чего полученный результат сравнивался с результатом полной модели по скорректированному парному t-критерию. Минимально достаточным считался наименьший набор признаков, для которого различие с полной моделью не является статистически значимым (p > 0.05) [30].

Гиперпараметры моделей задавались следующим образом: для логистической регрессии – решатель lbfgs, максимальное число итераций 1000, параметр регуляризации C = 1.0; для метода опорных векторов – радиально-базисное ядро (RBF) с параметрами C = 1.0 и gamma = «scale»; для случайного леса – 300 деревьев решений без ограничения глубины с критерием Джини. Специальные методы искусственной балансировки классов не применялись, поскольку исходная степень несбалансированности выборки (примерно 1.6:1) является умеренной и учитывается стратификацией разбиений.

Следует учитывать, что используемый набор данных имеет ряд ограничений. Во-первых, данные были собраны в рамках одной клинической базы, что ограничивает демографическую и географическую репрезентативность выборки. Во-вторых, большинство признаков представлены в бинарной форме и основаны на субъективной оценке симптомов пользователями, что может приводить к различиям в интерпретации симптомов и ошибкам самооценки. Кроме того, объем выборки в 520 наблюдений достаточен для разработки исследовательского программного прототипа, однако недостаточен для подтверждения клинической универсальности модели. В связи с этим результаты настоящей работы следует рассматривать как внутреннюю техническую оценку модели на открытом наборе данных, а не как клинически подтвержденную систему диагностики диабета.

Обучение моделей выполнялось в рамках воспроизводимого конвейера машинного обучения. После разделения данных категориальные признаки преобразовывались в числовой формат, а этапы предварительной обработки и обучения модели выполнялись последовательно внутри единого ML-конвейера. Для предотвращения утечки данных масштабирование признаков выполнялось исключительно на обучающей выборке с последующим применением параметров преобразования к тестовым данным.

Для сравнительного анализа были выбраны три классификатора: Logistic Regression, Support Vector Machine (SVM) и Random Forest Classifier. Логистическая регрессия использовалась как базовая интерпретируемая модель, SVM – как нелинейный классификатор для разделения сложных границ между классами, а Random Forest – как ансамблевый алгоритм, устойчивый к шуму данных и нелинейным зависимостям между признаками.

Все модели были реализованы средствами библиотеки scikit-learn с использованием конвейера Pipeline, объединяющего этап предварительной обработки признаков и последующее обучение классификатора; такая организация исключает утечку информации из проверочных данных при выполнении кросс-валидации.

Качество моделей оценивалось с использованием метрик accuracy, precision, recall и F1-score. Для задач предварительного медицинского скрининга особое значение имеет показатель recall (sensitivity), поскольку модель должна минимизировать вероятность пропуска пользователей с потенциально высоким риском диабета.

После завершения сравнительной оценки модель с наилучшими показателями качества сохранялась для последующей интеграции в веб-приложение. Такой подход обеспечивает связь между этапом машинного обучения и практическим использованием модели внутри пользовательской системы предварительной оценки риска.

В таблице 1 представлены входные признаки, используемые моделью машинного обучения для прогнозирования риска сахарного диабета. Все признаки соответствуют параметрам, вводимым пользователем через веб-интерфейс системы.

Таблица 1 – Исходные признаки, используемые в модели прогнозирования риска диабета

№	Наименование признака	Тип	Описание
1	Возраст	Числовой	Возраст пациента в годах (1-120)
2	Пол	категориальный признак	Биологический пол (мужской / женский)
3	Полиурия	Бинарный	Частое мочеиспускание
4	Полидипсия	Бинарный	Повышенная жажда
5	Резкая потеря веса	Бинарный	Необъяснимая быстрая потеря массы тела
6	Слабость	Бинарный	Общая слабость
7	Полифагия	Бинарный	Повышенный аппетит
8	Генитальный кандидоз	Бинарный	Грибковая инфекция половых органов
9	Нарушение зрения	Бинарный	Размытое или ухудшенное зрение
10	Зуд кожи	Бинарный	Кожный зуд
11	Раздражительность	Бинарный	Повышенная раздражительность
12	Замедленное заживление	Бинарный	Медленное заживление ран
13	Частичный парез	Бинарный	Частичная мышечная слабость
14	Мышечная скованность	Бинарный	Скованность мышц
15	Алопеция	Бинарный	Выпадение волос
16	Ожирение	Бинарный	Индекс массы тела > 30 кг/м²

Разработанная система представляет собой легковесное веб-приложение для предварительной оценки риска сахарного диабета, реализованное на языке Python с использованием фреймворка FastAPI. Архитектура приложения построена по модульному принципу и объединяет веб-интерфейс, серверную логику обработки запросов, модуль предварительной обработки данных и модель машинного обучения в рамках единой программной системы. Использование FastAPI обеспечивает обработку HTTP-запросов и упрощает развертывание приложения на минимальной серверной инфраструктуре.

Общая архитектура системы и взаимодействие основных компонентов представлены на рисунке 1.

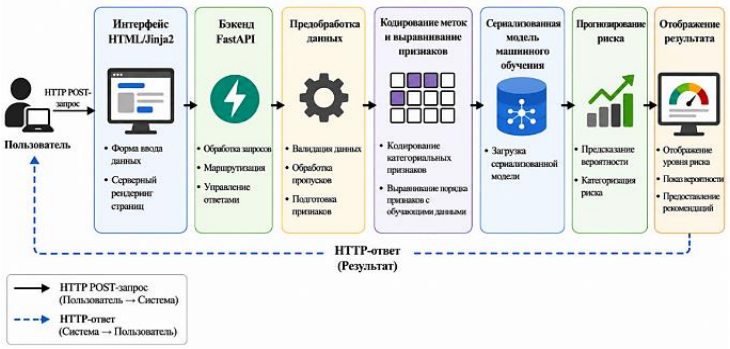


Рисунок 1 – Архитектура веб-приложения для предварительной оценки риска диабета

Представленная архитектура отражает последовательность обработки пользовательских данных внутри системы, начиная от ввода симптоматической информации через веб-интерфейс и заканчивая формированием итоговой оценки риска на основе ML-модели. Подобное разделение компонентов упрощает поддержку системы, обеспечивает воспроизводимость обработки данных и позволяет независимо модифицировать отдельные модули приложения без изменения общей логики работы системы.

Архитектура приложения включает несколько основных компонентов: модуль обработки пользовательских запросов, модуль предварительной обработки данных, ML-модель прогнозирования риска диабета и систему визуализации результатов. После отправки формы данные пользователя передаются на сервер через HTTP POST-запрос, где выполняется преобразование категориальных признаков, выравнивание структуры входных данных и подготовка вектора признаков для последующего прогнозирования. Для обеспечения воспроизводимости обработки используются сохраненные параметры кодирования признаков и фиксированный порядок входных переменных.

Модель машинного обучения загружается в память приложения в виде предварительно сериализованного объекта, что позволяет сократить время отклика системы и снизить вычислительные затраты при выполнении прогнозирования. После обработки входных данных модель вычисляет вероятность риска диабета, которая далее преобразуется в категорию риска и передается в пользовательский интерфейс вместе с текстовой интерпретацией результата и профилактическими рекомендациями.

Следует отметить, что используемые категории низкого, умеренного и высокого риска являются эвристическими границами визуальной интерпретации результата внутри программного прототипа. Они не представляют собой клинически валидированные диагностические пороги и не должны использоваться для постановки медицинского диагноза. Их основная задача заключается в упрощении восприятия результата пользователем и формировании рекомендации о необходимости дальнейшего медицинского обследования.

Общая схема процесса машинного обучения, включающая подготовку данных, обучение и оценку моделей, а также интеграцию итоговой модели в веб-приложение, представлена на рисунке 2.

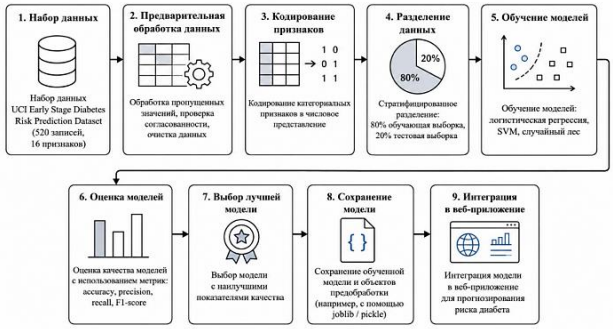


Рисунок 2 – Конвейер машинного обучения для обучения, оценки и интеграции модели в веб-приложение

Результаты исследований

Все эксперименты проводились с использованием Python 3.11 и библиотек scikit-learn, pandas, numpy, SciPy, SHAP и joblib. Оценка качества выполнялась по описанному выше двухэтапному протоколу: повторная стратифицированная 10-кратная кросс-валидация на всем наборе данных (50 оценок для каждой модели) и контрольная оценка на отложенной тестовой выборке, полученной стратифицированным разбиением в соотношении 80/20, что соответствует 416 обучающим и 104 тестовым наблюдениям. Дополнительное увеличение выборки и методы искусственной балансировки классов не применялись.

Результаты контрольной оценки обученных классификаторов на отложенной тестовой выборке представлены в таблице 2. Наилучшие показатели качества были достигнуты моделью Random Forest, обеспечившей accuracy 97.15% и F1-меру 97.42%; окончательный выбор модели для интеграции в веб-приложение выполнен по результатам кросс-валидации и статистической проверки значимости различий, приведенным ниже.

Таблица 2 – Сравнительная эффективность классификаторов на тестовом наборе

Classifier	Accuracy (%)	Precision (%)	Recall (%)	F1-Score (%)
Logistic Regression	88.55	87.92	91.20	89.52
SVM	92.37	91.81	93.73	92.72
Random Forest	97.15	96.83	97.94	97.42

Графическая сравнительная оценка качества рассмотренных классификаторов, включающая ROC-кривые и матрицы ошибок, представлена на рисунке 3.

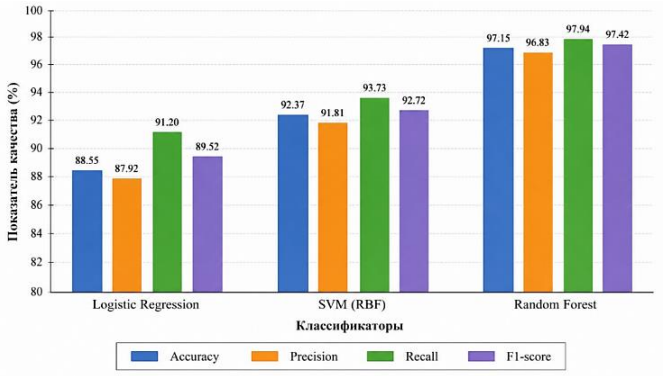


Рисунок 3 – Сравнительная оценка качества классификаторов машинного обучения

Оценка качества по единственному разбиению выборки обладает высокой дисперсией и не позволяет судить об устойчивости различий между моделями. Поэтому основная оценка выполнялась методом повторной стратифицированной 10-кратной кросс-валидации при пяти независимых повторах. Усредненные значения метрик и их стандартные отклонения приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты повторной стратифицированной 10-кратной кросс-валидации (среднее ± стандартное отклонение, %)

Классификатор	**Accuracy**	**Precision**	**Recall**	**F1-мера**	**ROC-AUC**
Logistic Regression	92.50 ± 3.67	94.49 ± 3.99	93.44 ± 4.39	93.87 ± 3.03	97.29 ± 1.82
SVM (RBF)	96.31 ± 2.46	97.60 ± 2.35	96.44 ± 3.42	96.97 ± 2.04	99.67 ± 0.37
Random Forest	98.27 ± 1.60	98.68 ± 1.90	98.56 ± 2.36	98.59 ± 1.31	99.93 ± 0.15

Модель Random Forest показала наиболее высокие значения всех рассмотренных метрик при наименьшем стандартном отклонении, что свидетельствует не только о более высоком среднем качестве, но и о большей устойчивости модели к изменению разбиения выборки. Особое значение для задач предварительного скрининга имеет показатель recall: его значение для Random Forest (98.56 ± 2.36%) превышает значения для SVM (96.44 ± 3.42%) и логистической регрессии (93.44 ± 4.39%), что соответствует меньшей доле пропущенных пользователей с повышенным риском.

Для проверки того, являются ли наблюдаемые различия статистически значимыми, а не следствием случайного разбиения данных, выполнялось попарное сравнение моделей по трем критериям. Результаты статистической проверки приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Статистическая проверка значимости различий между классификаторами

Сравниваемые модели	Разность accuracy, п.п.	Скорректированный парный t-критерий	5×2cv t-критерий	Критерий Уилкоксона (F1-мера)
Random Forest – SVM	+1.96	t = 2.48; p = 0.016	t = 3.61; p = 0.015	W = 56.5; p < 0.001
Random Forest – Logistic Regression	+5.77	t = 4.21; p < 0.001	t = 5.01; p = 0.004	W = 1.0; p < 0.001
SVM – Logistic Regression	+3.81	t = 2.83; p = 0.007	–	W = 61.5; p < 0.001

Преимущество модели Random Forest над методом опорных векторов является статистически значимым на уровне 0.05 по всем трем примененным критериям (p = 0.016 по скорректированному парному t-критерию, p = 0.015 по 5×2cv t-критерию и p < 0.001 по критерию знаковых рангов Уилкоксона), а преимущество над логистической регрессией – значимым на уровне 0.01. Таким образом, выбор Random Forest в качестве основной модели системы имеет статистическое обоснование и не является следствием результата единственного разбиения выборки. Распределения значений F1-меры по 50 разбиениям для трех рассмотренных классификаторов представлены на рисунке 4.

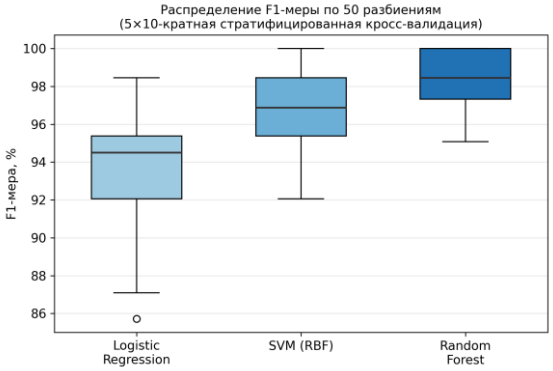


Рисунок 4 – Распределение F1-меры трех классификаторов по 50 разбиениям повторной стратифицированной 10-кратной кросс-валидации

Высокая эффективность алгоритма Random Forest связана с использованием ансамблевого подхода, основанного на объединении нескольких деревьев решений. Подобная архитектура позволяет снизить чувствительность модели к шуму данных и обеспечивает устойчивую обработку бинарных симптоматических признаков. В условиях рассматриваемого набора данных ансамблевый подход оказался более эффективным по сравнению с линейной моделью Logistic Regression и нелинейным классификатором SVM.

Логистическая регрессия продемонстрировала наиболее интерпретируемое, но менее гибкое поведение вследствие ограничения линейной зависимостью между признаками и целевой переменной. Модель SVM с RBF-ядром обеспечила более высокое качество классификации за счет способности учитывать нелинейные границы между классами, однако итоговые показатели оказались ниже результатов Random Forest.

Для определения того, какие именно признаки определяют решение модели, выполнялся анализ их вклада тремя независимыми методами. Результаты ранжирования признаков по критерию Джини и по перестановочной значимости приведены на рисунке 5, распределение значений SHAP – на рисунке 6.

Все три метода дают согласованное ранжирование признаков. Наибольший вклад в прогноз вносят полиурия и полидипсия: случайная перестановка значений этих признаков приводит к снижению F1-меры на 12.3 и 10.2 процентных пункта соответственно, тогда как для остальных признаков это снижение не превышает 4.3 процентных пункта. Далее по значимости следуют пол, возраст, резкая потеря веса и частичный парез.

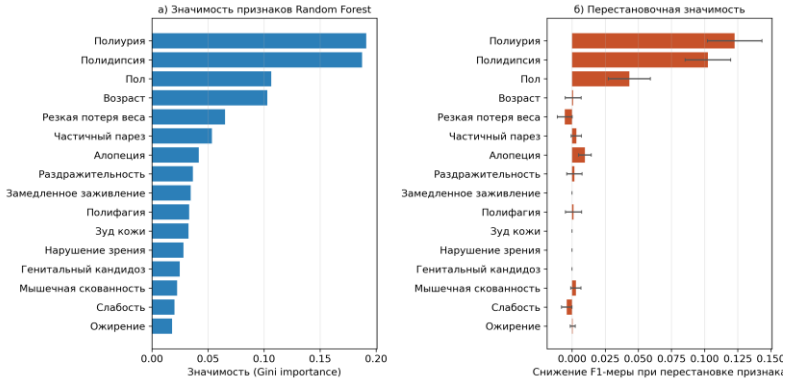


Рисунок 5 – Ранжирование признаков по значимости:
а) значимость по критерию Джини; б) перестановочная значимость (снижение F1-меры при перестановке признака)

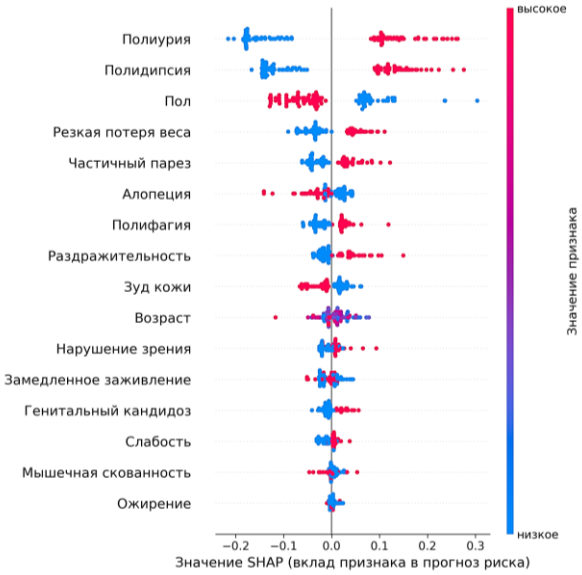


Рисунок 6 – Распределение значений SHAP для модели Random Forest: величина и направление вклада признаков в прогноз риска диабета

Полученный результат согласуется с клиническими представлениями о ранних проявлениях сахарного диабета, для которых полиурия и полидипсия являются классическими симптомами, что дополнительно подтверждает содержательную корректность построенной модели. Диаграмма значений SHAP показывает также направление вклада признаков: наличие полиурии и полидипсии увеличивает прогнозируемую вероятность риска, тогда как мужской пол и наличие алопеции в рассматриваемой выборке связаны с ее снижением. Последнее наблюдение следует интерпретировать с осторожностью, поскольку оно отражает статистические особенности состава конкретной выборки, а не универсальную биологическую закономерность.

Полученное ранжирование использовалось для построения сокращенного симптоматического опросника. Признаки последовательно включались в модель в порядке убывания значимости, и для каждого набора выполнялась повторная стратифицированная 10-кратная кросс-валидация с последующим сравнением с полной моделью из 16 признаков по скорректированному парному t-критерию. Результаты приведены в таблице 5 и на рисунке 7.

Как следует из таблицы 5, при числе признаков от одного до восьми качество сокращенной модели статистически значимо ниже качества полной модели ($p < 0.05$). Начиная с девяти признаков различие перестает быть статистически значимым ($p = 0.246$): сокращенная модель обеспечивает accuracy 97.62 ± 1.87% и F1-меру 98.07 ± 1.51% против 98.27 ± 1.60% и 98.59 ± 1.31% для полного набора.

Таблица 5 – Качество модели Random Forest при последовательном сокращении набора признаков

k	Последний добавленный признак	Accuracy, %	F1-мера, %	ROC-AUC, %	p (сравнение с полным набором)
1	Полиурия	82.31 ± 4.50	83.98 ± 4.45	84.22	< 0.001
2	Полидипсия	86.92 ± 3.96	88.95 ± 3.50	90.56	< 0.001
3	Пол	89.42 ± 2.75	91.79 ± 2.10	94.62	< 0.001
4	Возраст	91.35 ± 2.86	92.77 ± 2.51	96.95	< 0.001
5	Резкая потеря веса	93.81 ± 3.08	94.84 ± 2.63	97.97	< 0.001
6	Частичный парез	93.92 ± 2.67	94.97 ± 2.27	98.35	< 0.001
7	Алопеция	95.08 ± 2.58	95.98 ± 2.11	98.98	0.001
8	Раздражительность	96.85 ± 2.06	97.45 ± 1.65	99.33	0.014
9	Замедленное заживление	97.62 ± 1.87	98.07 ± 1.51	99.48	0.246
10	Полифагия	97.85 ± 1.66	98.24 ± 1.37	99.60	0.371
11	Зуд кожи	98.00 ± 1.72	98.37 ± 1.42	99.70	0.389
12	Нарушение зрения	97.92 ± 1.67	98.31 ± 1.37	99.90	0.390
13	Генитальный кандидоз	98.08 ± 1.80	98.43 ± 1.48	99.91	0.565
14	Мышечная скованность	98.19 ± 1.69	98.53 ± 1.39	99.92	0.820
15	Слабость	98.31 ± 1.62	98.62 ± 1.32	99.94	0.878
16	Ожирение (полный набор)	98.27 ± 1.60	98.59 ± 1.31	99.93	–

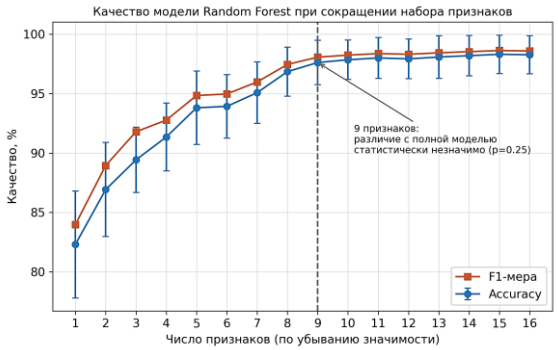


Рисунок 7 – Качество модели Random Forest при последовательном сокращении набора признаков (повторная стратифицированная 10-кратная кросс-валидация)

Таким образом, минимально достаточным является набор из девяти признаков – возраст, пол, полиурия, полидипсия, резкая потеря веса, частичный парез, алопеция, раздражительность и замедленное заживление ран, – что соответствует сокращению объема пользовательского ввода на 43.8% без статистически значимой потери качества классификации. Полученный результат имеет непосредственное практическое значение для систем самоскрининга, поскольку сокращение опросника уменьшает время его заполнения и снижает вероятность ошибок самооценки пользователя.

Следует отметить, что высокие значения accuracy и F1-score могут быть связаны не только с качеством алгоритма, но и с особенностями используемого набора данных. Большинство признаков представляют собой симптоматические показатели, непосредственно связанные с ранними проявлениями диабета, что формирует относительно высокую разделимость классов внутри рассматриваемой выборки. Аналогичные тенденции высокой эффективности моделей машинного обучения на symptom-based diabetes datasets ранее отмечались в работах A. Mujumdar и V. Vaidehi, а также R. Krishnamoorthi et al. [9,10].

Полученные результаты показывают, что использование методов машинного обучения позволяет эффективно выполнять предварительную оценку риска диабета на основе ограниченного набора симптоматических признаков. При этом разработанная система ориентирована не на клиническую постановку диагноза, а на реализацию легковесного программного инструмента предварительного скрининга и пользовательской оценки риска.

Главный интерфейс веб-приложения реализован в виде формы пользовательского ввода, предназначенной для предварительной оценки риска сахарного диабета. Взаимодействие пользователя с моделью машинного обучения выполняется через веб-браузер без установки дополнительного программного обеспечения. Форма содержит демографические и симптоматические признаки, описанные в таблице 1.

Возраст вводится пользователем через числовое поле, пол – посредством выпадающего списка, а остальные признаки представлены бинарными элементами выбора. Верхняя часть формы пользовательского ввода представлена на рисунке 8.

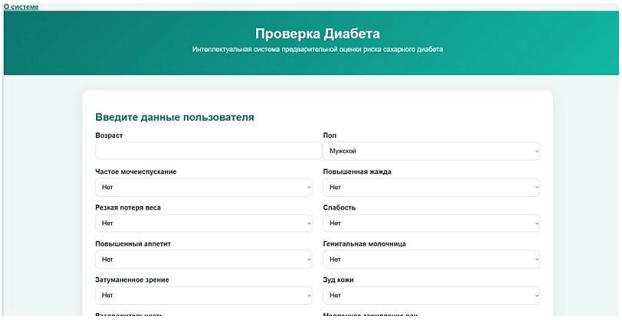


Рисунок 8 – Верхняя часть формы ввода пользовательских данных

Нижняя часть интерфейса содержит оставшиеся симптоматические признаки и кнопку запуска процедуры оценки риска (рис. 9).

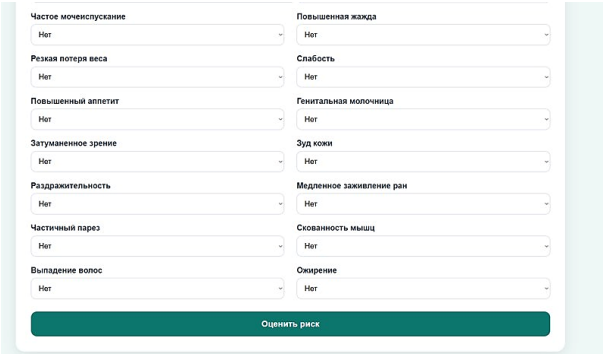


Рисунок 9 – Нижняя часть формы ввода данных и кнопка запуска оценки риска

Передача пользовательских данных выполняется посредством HTTP POST-запроса; на стороне клиента контролируются допустимый диапазон значений возраста и заполнение обязательных полей.

После отправки формы приложение формирует страницу результатов оценки риска, содержащую вероятность риска, категорию риска и визуальный индикатор уровня риска. Для повышения удобства восприятия используется цветовая индикация: зеленый цвет соответствует низкому риску, желтый – умеренному, красный – высокому. Пример страницы результатов представлен на рисунке 10.

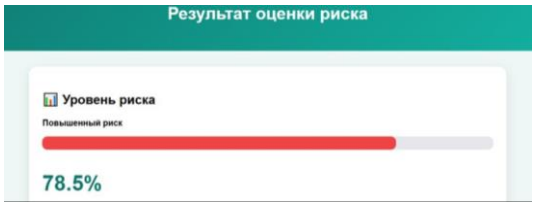


Рисунок 10 – Страница отображения результатов предварительной оценки риска диабета

В зависимости от рассчитанного уровня риска приложение формирует текстовые рекомендации, ориентированные на необходимость контроля состояния здоровья, коррекции образа жизни и обращения за медицинской консультацией. Рекомендации носят исключительно информационный характер и не предназначены для самостоятельной постановки диагноза или назначения лечения (рисунок 11).

Дополнительно приложение поддерживает механизм сохранения результатов внутри пользовательской сессии браузера, что позволяет просматривать ранее выполненные оценки риска без повторного ввода данных. Доступ к истории результатов осуществляется через маршрут /history.

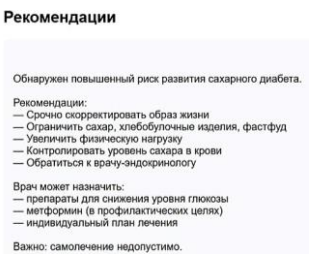


Рисунок 11 – Блок пользовательских рекомендаций для результата с повышенным риском диабета

При описании разработанной системы учитывались общие принципы прозрачной отчетности для медицинских моделей прогнозирования. В работе раскрыты источник данных, набор входных признаков, схема разбиения выборки, используемые классификаторы, метрики оценки и ограничения применимости модели. Вместе с тем представленная система не претендует на полное соответствие требованиям клинической валидации, поскольку не включает независимую внешнюю выборку, проспективное исследование и анализ влияния приложения на реальные решения пациента или врача. Эти элементы должны рассматриваться как обязательные этапы последующего развития системы [22].

Обсуждение научных результатов

Полученные результаты показывают, что методы машинного обучения способны эффективно выполнять предварительную оценку риска сахарного диабета на основе ограниченного набора симптоматических признаков. Наилучшие показатели качества были достигнуты классификатором Random Forest, обеспечившим accuracy 97.1% на тестовой выборке. Полученное значение находится в верхней части диапазона результатов, ранее опубликованных для рассматриваемого набора данных и сопоставимых symptom-based diabetes datasets [9, 10].

Оценка, полученная методом повторной стратифицированной 10-кратной кросс-валидации, подтверждает результат контрольной проверки на отложенной выборке: accuracy модели Random Forest составила 98.27 ± 1.60%, F1-мера – 98.59 ± 1.31%, ROC-AUC – 99.93 ± 0.15%. Различия с методом опорных векторов и логистической регрессией являются статистически значимыми, что позволяет обоснованно говорить о преимуществе ансамблевой модели на рассматриваемом наборе данных, а не о случайном превосходстве на отдельном разбиении.

Высокие показатели классификации во многом связаны с особенностями используемого набора данных. Большинство признаков представляют собой симптомы, непосредственно ассоциированные с ранними проявлениями диабета, что формирует относительно высокую разделимость классов. Дополнительным фактором является использование ансамблевого подхода Random Forest, обеспечивающего устойчивость модели к шуму данных и нелинейным взаимодействиям между признаками. По сравнению с Logistic Regression и SVM, ансамблевый классификатор продемонстрировал более стабильные результаты при работе с бинарными симптоматическими признаками.

Анализ вклада признаков показал, что решение модели определяется преимущественно небольшим числом симптоматических признаков. Доминирующая роль полиурии и полидипсии согласуется с клиническими представлениями о ранних проявлениях сахарного диабета и подтверждает содержательную интерпретируемость построенной модели. Практическим следствием этого наблюдения является возможность сокращения симптоматического опросника с 16 до 9 признаков без статистически значимой потери качества классификации, что снижает нагрузку на пользователя при самостоятельном заполнении формы и сокращает время получения предварительной оценки риска.

Вместе с тем полученный сокращенный набор признаков определен на одном открытом наборе данных и отражает статистические особенности конкретной выборки. Значимость отдельных признаков, в частности пола и алопеции, может быть обусловлена составом выборки Sylhet Diabetes Hospital и не должна интерпретироваться как установленная биологическая закономерность. Проверка устойчивости полученного ранжирования признаков и состава сокращенного опросника на независимых данных является необходимым этапом дальнейшего исследования.

Несмотря на высокие значения accuracy и F1-score, представленная система не предназначена для клинической диагностики диабета. Приложение ориентировано исключительно на предварительный пользовательский скрининг и должно рассматриваться как вспомогательный инструмент оценки риска. Результаты модели не заменяют лабораторные исследования, включая измерение уровня глюкозы крови, HbA1c и проведение перорального глюкозотолерантного теста. При получении высокого уровня риска пользователь должен рассматривать результат как основание для обращения к врачу и прохождения дополнительного обследования, а не как самостоятельное медицинское заключение [23].

Использование симптоматических данных, вводимых пользователем самостоятельно, приводит к ряду ограничений, связанных с субъективностью самооценки симптомов. Пользователи могут недооценивать отдельные признаки, ошибочно интерпретировать симптомы или вводить социально предпочтительные ответы. Подобные ограничения характерны для большинства неинвазивных опросниковых систем предварительной оценки риска и должны учитываться при интерпретации результатов.

С точки зрения пользовательского сценария разработанная система близка к неинвазивным инструментам оценки риска, основанным на анкетировании, включая шкалу FINDRISC. Однако между ними существует принципиальное различие. FINDRISC представляет собой клинически валидированную шкалу с фиксированной системой балльной оценки, тогда как представленное приложение использует модель машинного обучения, обученную на открытом наборе симптоматических данных. Поэтому разработанную систему следует рассматривать не как замену клинически валидированных шкал, а как программный прототип, демонстрирующий возможность интеграции симптоматического опросника, ML-модели и веб-интерфейса в единую систему предварительной оценки риска [24].

При разработке приложения учитывались рекомендации по ответственному использованию систем искусственного интеллекта в здравоохранении, согласно которым ML-инструменты должны дополнять клинические решения, а не заменять их [25,26]. В работе раскрыты источник данных, ограничения набора данных, схема оценки моделей и границы применимости разработанной системы. Вместе с тем приложение не прошло независимую внешнюю клиническую валидацию и не оценивалось в условиях реального медицинского использования. Эти направления следует рассматривать как ключевые этапы дальнейшего развития системы, включая расширение набора данных, тестирование на независимых выборках и последующую оценку клинической применимости модели [22].

Заключение

В данной работе разработано веб-приложение для предварительной оценки риска сахарного диабета на основе симптоматических и демографических данных пользователя. Система объединяет модель машинного обучения, серверную архитектуру на базе Python/FastAPI и пользовательский веб-интерфейс в рамках единого программного решения. Сравнение классификаторов Logistic Regression, Support Vector Machine и Random Forest выполнено на открытом наборе данных UCI Early Stage Diabetes Risk Prediction Dataset с использованием повторной стратифицированной 10-кратной кросс-валидации и статистической проверки значимости различий. Наилучшие и наиболее устойчивые результаты показала модель Random Forest (accuracy 98.27 ± 1.60%, F1-мера 98.59 ± 1.31%, ROC-AUC 99.93 ± 0.15%), преимущество которой над остальными рассмотренными классификаторами подтверждено статистически ($p < 0.05$).

Полученные результаты подтверждают техническую возможность интеграции методов машинного обучения в легковесные веб-системы предварительной оценки риска. При этом разработанное приложение следует рассматривать как исследовательский программный прототип, а не как клиническую диагностическую систему. Используемый набор данных обладает рядом ограничений, включая ограниченную выборку, отсутствие внешней клинической валидации и использование симптоматических признаков, основанных на самооценке пользователей. В связи с этим результаты модели не могут заменять лабораторную диагностику и профессиональное медицинское заключение.

Практическая значимость работы заключается в создании воспроизводимой программной системы, объединяющей сокращенный симптоматический опросник,

статистически обоснованный выбор модели, анализ вклада признаков и веб-интерфейс в рамках единого инструмента предварительной оценки риска диабета. Показано, что число вводимых пользователем признаков может быть сокращено с 16 до 9 без статистически значимой потери качества классификации, что имеет непосредственное значение для практического применения систем предварительного самоскрининга. Разработанный подход может служить основой для дальнейшего развития пользовательских медицинских AI-систем и адаптации модели к локальным клиническим данным.

Дальнейшее развитие системы должно включать внешнюю валидацию на независимых выборках, адаптацию модели к особенностям локальной популяции, расширение набора входных признаков, повышение интерпретируемости модели, сравнение с клинически валидированными шкалами риска, включая FINDRISC, а также разработку механизмов безопасной обработки пользовательских медицинских данных.

Список литературы

1. Duncan B.B. IDF Diabetes Atlas 11th Edition 2025: Global Prevalence and Projections for 2050 / B.B. Duncan, D.J. Magliano, E.J. Boyko // Nephrology Dialysis Transplantation. – 2025. – Vol. 41. – P. 7-9. https://doi.org/10.1093/ndt/gfaf177.
2. Ismail L. Association of Risk Factors with Type 2 Diabetes: A Systematic Review / L. Ismail, H. Materwala, J. Al Kaabi // Computational and Structural Biotechnology Journal. – 2021. – Vol. 19. – P. 1759-1785. https://doi.org/10.1016/j.csbj.2021.03.003.
3. Transforming Diabetes Care Through Artificial Intelligence: The Future Is Here / I. Dankwa-Mullan et al // Population Health Management. – 2019. – Vol. 22, № 3. – P. 229-242. https://doi.org/10.1089/pop.2018.0129.
4. Machine Learning and Artificial Intelligence Based Diabetes Mellitus Detection and Self-Management: A Systematic Review / J. Chaki et al // Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences. – 2022. – Vol. 34. – P. 3204-3225. https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2020.06.013.
5. Rajkomar A. Machine Learning in Medicine / A. Rajkomar, J. Dean, I. Kohane // New England Journal of Medicine. – 2019. – Vol. 380. – P. 1347-1358. https://doi.org/10.1056/NEJMra1814259.
6. Comparative Approaches for Classification of Diabetes Mellitus Data: Machine Learning Paradigm / Maniruzzaman Md. Et al // Computer Methods and Programs in Biomedicine. – 2017. – Vol. 152. – P. 23-34. https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2017.09.004.
7. Shan R. Digital Health Technology and Mobile Devices for the Management of Diabetes Mellitus: State of the Art / R. Shan, S. Sarkar, S.S. Martin // Diabetologia. – 2019. – Vol. 62. – P. 877-887. https://doi.org/10.1007/s00125-019-4864-7.
8. Diabetes Digital App Technology: Benefits, Challenges, and Recommendations. A Consensus Report by the European Association for the Study of Diabetes (EASD) and the American Diabetes Association (ADA) Diabetes Technology Working Group / G.A. Fleming et al // Diabetes Care. – 2020. – Vol. 43. – P. 250-260. https://doi.org/10.2337/dci19-0062.
9. Mujumdar A. Diabetes Prediction Using Machine Learning Algorithms / A. Mujumdar, V. Vaidehi // Procedia Computer Science. – 2019. – Vol. 165. – P. 292-299. https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.01.047.
10. A Novel Diabetes Healthcare Disease Prediction Framework Using Machine Learning Techniques / R. Krishnamoorthi et al // Journal of Healthcare Engineering. – 2022. – Vol. 2022. – Art. 1684017. – P. 1-10. https://doi.org/10.1155/2022/1684017.
11. Abushawish A.Y.I. Prediction of Early-Stage Diabetes Using Machine Learning / A.Y.I. Abushawish, A.B. Nassif // Proceedings of the 2023 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET). – IEEE, 2023. – P. 1-4.
12. An Ensemble Approach to Predict Early-Stage Diabetes Risk Using Machine Learning: An Empirical Study / U.E. Laila et al // Sensors. – 2022. – Vol. 22. – Art. 5247. https://doi.org/10.3390/s22145247.
13. An IoT Based Diabetic Patient Monitoring System Using Machine Learning and Node MCU / A. Rghioui et al // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1743. – Art. 012035. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1743/1/012035.

14. Fagherazzi G. Digital Diabetes: Perspectives for Diabetes Prevention, Management and Research / G. Fagherazzi, P. Ravaud // Diabetes & Metabolism. – 2019. – Vol. 45. – P. 322-329. https://doi.org/10.1016/j.diabet.2018.08.012.
15. Beam A.L. Big Data and Machine Learning in Health Care / A.L. Beam, I.S. Kohane // JAMA. – 2018. – Vol. 319. – P. 1317. https://doi.org/10.1001/jama.2017.18391.
16. Obermeyer Z. Predicting the Future — Big Data, Machine Learning, and Clinical Medicine / Z. Obermeyer, E.J. Emanuel // New England Journal of Medicine. – 2016. – Vol. 375. – P. 1216-1219. https://doi.org/10.1056/NEJMp1606181.
17. Topol E.J. High-Performance Medicine: The Convergence of Human and Artificial Intelligence / E.J. Topol // Nature Medicine. – 2019. – Vol. 25. – P. 44-56. https://doi.org/10.1038/s41591-018-0300-7.
18. A Guide to Deep Learning in Healthcare / A. Esteva et al // Nature Medicine. – 2019. – Vol. 25. – P. 24-29. https://doi.org/10.1038/s41591-018-0316-z.
19. Ivanovs M. Perturbation-Based Methods for Explaining Deep Neural Networks: A Survey / M. Ivanovs, R. Kadikis, K. Ozols // Pattern Recognition Letters. – 2021. – Vol. 150. – P. 228-234. https://doi.org/10.1016/j.patrec.2021.06.030.
20. Likelihood Prediction of Diabetes at Early Stage Using Data Mining Techniques / M.M.F. Islam et al // Data Analytics and Management. – 2020. – P. 113-125.
21. TRIPOD+AI Statement: Updated Guidance for Reporting Clinical Prediction Models That Use Regression or Machine Learning Methods / G.S. Collins et al // BMJ. – 2024. – Vol. 385. – Art. e078378. https://doi.org/10.1136/bmj-2023-078378.
22. Diagnosis and Classification of Diabetes: Standards of Care in Diabetes—2025 / N.A. ElSayed et al // Diabetes Care. – 2025. – Vol. 48 (Suppl. 1). – P. S27-S49. https://doi.org/10.2337/dc25-S002.
23. Lindström J. The Diabetes Risk Score / J. Lindström, J. Tuomilehto // Diabetes Care. – 2003. – Vol. 26, № 3. – P. 725-731. https://doi.org/10.2337/diacare.26.3.725.
24. Contreras I. Artificial Intelligence for Diabetes Management and Decision Support: Literature Review / I. Contreras, J. Vehí // Journal of Medical Internet Research. – 2018. – Vol. 20. – Art. e10775. https://doi.org/10.2196/10775.
25. Dietterich T.G. Approximate Statistical Tests for Comparing Supervised Classification Learning Algorithms / T.G. Dietterich // Neural Computation. – 1998. – Vol. 10, № 7. – P. 1895-1923. https://doi.org/10.1162/089976698300017197.
26. Nadeau C. Inference for the Generalization Error / C. Nadeau, Y. Bengio // Machine Learning. – 2003. – Vol. 52, № 3. – P. 239-281. https://doi.org/10.1023/A:1024068626366.
27. Demšar J. Statistical Comparisons of Classifiers over Multiple Data Sets / J. Demšar // Journal of Machine Learning Research. – 2006. – Vol. 7. – P. 1-30.
28. Lundberg S.M. A Unified Approach to Interpreting Model Predictions / S.M. Lundberg, S.-I. Lee // Advances in Neural Information Processing Systems. – 2017. – Vol. 30. – P. 4765-4774.
29. Breiman L. Random Forests / L. Breiman // Machine Learning. – 2001. – Vol. 45, № 1. – P. 5-32. https://doi.org/10.1023/A:1010933404324.
30. Saeys Y. A Review of Feature Selection Techniques in Bioinformatics / Y. Saeys, I. Inza, P. Larrañaga // Bioinformatics. – 2007. – Vol. 23, № 19. – P. 2507-2517. https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btm344.

А.К. Үкібай[1], Е.А. Дайнеко[2], А.Б. Ақбаян[3], Д.С. Баймагамбетова[2], Г.Б. Бекешова[4]*
[1]«МИФИ» Ұлттық ядролық зерттеу университеті» федералды мемлекеттік автономды жоғары білім беру мекемесінің Алматы қаласындағы филиалы,
әл-Фараби даңғылы, 71, 12-корпус, Алматы, 050040, Қазақстан,
[2]Satbayev University, Сәтбаев көшесі, 22а, Алматы, 050013, Қазақстан,
[3]Narxoz University, Жандосов көшесі, 55, Алматы, 050035, Қазақстан,
[4]Л.Н. Гумилев атындаағы Еуразия ұлттық университеті,
Астана, Қазақстан, 0100000, Қазақстан Республикасы, Астана қ., Сатпаев к-сі, 2

МАШИНАЛЫҚ ОҚЫТУ ӘДІСТЕРІН ҚОЛДАНА ОТЫРЫП ҚАНТ ДИАБЕТІ ҚАУПІН АЛДЫН АЛА БАҒАЛАУҒА АРНАЛҒАН ВЕБ-ҚОСЫМШАНЫ ӘЗІРЛЕУ

Қант диабеті ең кең таралған созылмалы жұқпалы емес аурулардың бірі болып табылады және жоғары қауіп тобындағы адамдарды ерте анықтауды талап етеді. Бұл мақалада пайдаланушының симптоматикалық және демографиялық деректеріне негізделген қант диабеті қаупін алдын ала бағалауға арналған веб-қосымшаны әзірлеу сипатталған. Жүйе Python/FastAPI, HTML/CSS/JavaScript технологиялары және UCI Early Stage Diabetes Risk Prediction Dataset ашық деректер жиынтығында оқытылған машиналық оқыту модулі негізінде жүзеге асырылды. Жұмыс барысында үш классификатор салыстырылды: Logistic Regression, Support Vector Machine және Random Forest Classifier. Кейінге қалдырылған тестілік іріктемеде ең жақсы нәтижені Random Forest моделі көрсетті және ол қауіп ықтималдығын есептеу үшін веб-қосымшаға енгізілді. Пайдаланушы жасын, жынысын және симптоматикалық белгілер жиынтығын енгізгеннен кейін жүйе қауіп деңгейін, визуалды индикаторды және профилактикалық ұсыныстар блогын көрсетеді. Әзірленген қосымшаны алдын ала өзін-өзі бағалауға және пайдаланушының хабардарлығын арттыруға арналған бағдарламалық прототип ретінде қарастыру қажет. Ол диагноз қоюға арналмаған және тәуелсіз деректер негізінде одан әрі сыртқы клиникалық валидацияны талап етеді. Модельдерді салыстыру қайталанатын стратификацияланған 10 еселік кросс-валидация арқылы орындалды (5 қайталау, әр модель үшін 50 бағалау). Ең жоғары әрі тұрақты нәтижені Random Forest моделі көрсетті (accuracy 98.27 ± 1.60%, F1-өлшемі 98.59 ± 1.31%, ROC-AUC 99.93 ± 0.15%), оның SVM және Logistic Regression модельдерінен артықшылығы статистикалық тұрғыдан расталды ($p < 0.05$). Белгілердің үлесі үш тәуелсіз әдіспен (Джини критерийі бойынша маңыздылық, пермутациялық маңыздылық және SHAP мәндері) талданып, полиурия, полидипсия, жыныс және жас ең ақпаратты белгілер ретінде анықталды. Алынған дәрежелеу негізінде 16 белгінің орнына 9 белгіден тұратын қысқартылған сауалнама құрылды: классификация сапасының статистикалық маңызды төмендеуі байқалмады (accuracy 97.62 ± 1.87%, $p = 0.246$), бұл пайдаланушы енгізетін деректер көлемін 43.8%-ға қысқартуға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: *қант диабеті; машиналық оқыту; веб-қосымша; FastAPI; симптомдарды тану; қауіп-қатерді бағалау; денсаулықты мониторингтеу; scikit-learn; ерте диагностика. кросс-валидация; статистикалық тексеру; белгілердің маңыздылығы; SHAP.*

A.K. Ukibay[1], E.A. Dayneko[2], A.B. Akbayan[3], D.S. Baymagambetova[2], G.B. Bekeshova[4]*

[1]Almaty Branch of the National Research Nuclear University MEPhI,
71 al-Farabi Ave., building 12, Almaty, 050040, Kazakhstan,
[2]Satbayev University, 22a Satpayev str., Almaty, 050013, Kazakhstan,
[3]Narxoz University, 55 Zhandossov str., Almaty, 050035, Kazakhstan
[4]L.N. Gumilyov Eurasian National University,
Astana, Kazakhstan 0100000, Republic of Kazakhstan, Astana, Satpayev street, building 2

DEVELOPMENT OF A WEB APPLICATION FOR PRELIMINARY DIABETES RISK ASSESSMENT USING MACHINE LEARNING METHODS

Diabetes mellitus is one of the most common chronic non-communicable diseases and requires early identification of individuals at increased risk. This article presents the development of a web application for preliminary diabetes risk assessment based on users' symptomatic and demographic data. The system was implemented using Python/FastAPI, HTML/CSS/JavaScript, and a machine learning module trained on the open UCI Early Stage Diabetes Risk Prediction Dataset. Three classifiers were compared in this study: Logistic Regression, Support Vector Machine, and Random Forest Classifier. The best performance on the held-out test set was achieved by the Random Forest model, which was integrated into the web application to calculate risk probability. The user enters age, gender, and a set of symptomatic features, after which the system displays the risk level, a visual indicator, and a block of preventive recommendations. The developed application should be considered a software prototype for preliminary self-assessment and increasing user awareness. It is not intended for diagnosis and requires further external clinical validation on independent data. Model comparison was performed using repeated stratified 10-fold cross-validation (five repetitions, 50 estimates per model). The Random Forest model achieved the best and most stable performance (accuracy 98.27 ± 1.60%, F1-score 98.59 ± 1.31%, ROC-AUC 99.93 ± 0.15%), and its superiority over SVM and Logistic Regression was confirmed statistically (corrected paired t-test, 5×2cv t-test and Wilcoxon signed-rank test, $p < 0.05$). Feature contributions were analysed by three independent methods (Gini importance, permutation importance and SHAP values), which consistently identified polyuria, polydipsia, gender and age as the most informative features. Based on this ranking, a reduced questionnaire of nine features was constructed, for which no statistically significant loss of classification quality was observed compared with the full set of sixteen features (accuracy 97.62 ± 1.87%, $p = 0.246$), reducing the amount of user input by 43.8%.

Key words: *diabetes mellitus; machine learning; web application; FastAPI; symptom recognition; risk assessment; health monitoring; scikit-learn; early diagnosis. cross-validation; statistical significance testing; feature importance; SHAP; feature selection.*

Сведения об авторах

Айдана Қуанышбекқызы Үкібай – Филиал Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» в городе Алматы», Казахстан; e-mail: aidanakuanishbekkyzy@gmail.com.

Евгения Александровна Дайнеко – PhD, ассоциированный профессор, НАО «Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева» (Satbayev University), Алматы, Казахстан; e-mail: y.daineko@satbayev.university.

Ақбаян Бекарыстанқызы – PhD, Narxoz University, Алматы, 050035, Казахстан; e-mail: akbayan.b@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3984-2718.

Динара Жалеловна Баймагамбетова – преподаватель, Satbayev University, Алматы, Казахстан; e-mail: d.baimagambetova@satbayev.university.

Гульвира Бауыржановна Бекешова* – магистр технических наук, старший преподаватель, Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан; e-mail: gulvirabauyrzhanovna@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1635-4693.

Авторлар туралы мәліметтер

Айдана Қуанышбекқызы Үкібай – Алматы қаласындағы «Ұлттық зерттеу ядролық университеті «МИФИ» федералдық мемлекеттік автономды жоғары білім беру мекемесінің филиалы, Алматы қ., Қазақстан; e-mail: aidanakuanishbekkyzy@gmail.com.

Евгения Александровна Дайнеко – PhD, қауымдастырылған профессор, «Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті» КеАҚ (Satbayev University), Алматы қ., Қазақстан; e-mail: y.daineko@satbayev.university.

Ақбаян Бекарыстанқызы – PhD, Narxoz University, Алматы қ., Қазақстан; e-mail: akbayan.b@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3984-2718.

Динара Жалеловна Баймагамбетова – оқытушы, Satbayev University, Алматы қ., Қазақстан; e-mail: d.baimagambetova@satbayev.university.

Гульвира Бауыржановна Бекешова* – техника ғылымдарының магистрі, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, аға оқытушы, Астана қ., Қазақстан; e-mail: gulvirabauyrzhanovna@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1635-4693.

Information about the authors

Aidana Ukibay – Branch of the National Research Nuclear University MEPhI in Almaty, Kazakhstan; e-mail: aidanakuanishbekkyzy@gmail.com.

Evgeniya Aleksandrovna Dayneko – PhD, Associate Professor, Satbayev University (Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev), Almaty, Kazakhstan; e-mail: y.daineko@satbayev.university.

Akbayan Bekarystankyzy – PhD, Narxoz University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: akbayan.b@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3984-2718.

Dinara Baymagambetova – Lecturer, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: d.baimagambetova@satbayev.university.

Gulvira Bekeshova* – Senior Lecturer at the Department of Information Security, IT Faculty at the L.N. Gumilyov ENU, Astana, Kazakhstan; e-mail: gulvirabauyrzhanovna@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1635-4693.

Поступила в редакцию 27.06.2026
Поступила после доработки 03.09.2026
Принята к публикации 04.09.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-27

BY 4.0
Check for updates

ҒТАХР: 81.93.29

Н.А. Бажаев*, А.К. Токкулиева
Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
010000, Қазақстан Республикасы, Астана қ., Қ. Сәтпаев көшесі, 2
*e-mail: shaikhanova_ak@enu.kz

ЖЕЛІЛІК ТРАФИКТІҢ УАҚЫТТЫҚ ҚАТАРЛАРЫН СЕГМЕНТАЦИЯЛАУ НЕГІЗІНДЕ IOT-ҚҰРЫЛҒЫЛАРДЫҢ АҚПАРАТТЫҚ ҚАУІПСІЗДІГІН МОНИТОРИНГТЕУ ҮШІН БЕЛГІЛЕР КЕҢІСТІГІН ҚАЛЫПТАСТЫРУ ЖӘНЕ КЕҢЕЙТУ ӘДІСІ

Аңдатпа: *Зерттеу пәні. Заттар интернеті (IoT) құрылғыларының ақылды үй жүйелерінде, өнеркәсіптік автоматтандыруда, көлікте, денсаулық сақтауда және қалалық инфрақұрылымда кеңінен таралуы рұқсат етілмеген қолжетімділіктің ықтимал нүктелерінің санының өсуімен қатар жүреді. Дәстүрлі есептеу жүйелерінен айырмашылығы, IoT-құрылғылар шектеулі аппараттық ресурстармен – жад көлемімен, процессор өнімділігімен, байланыс арналарының өткізу қабілетімен және энергия тұтынуымен сипатталады, бұл ақпараттық қауіпсіздікті (АҚ) мониторингтеудің күрделі есептеу және криптографиялық әдістерін ресурстары шектеулі жағдайларға алдын ала бейімдеусіз тікелей қолдануға мүмкіндік бермейді. Әдіс. IoT-құрылғылардың АҚ күйінің ақпараттық белгілер сипаттамасын қалыптастыру үшін желілік трафик параметрлерінің уақыттық қатарларын статистикалық, жиіліктік және шектік критерийлер негізінде сегментациялауды, сондай-ақ бақыланатын белгілердің мәндеріне әсер ететін сыртқы және ішкі факторларды ескере отырып, белгілер кеңістігін кеңейтуді қолдану ұсынылады. Күйлерді жіктеу әртүрлі күрделіліктегі алты машиналық оқыту алгоритмін – логистикалық регрессияны, наивті Байес классификаторын, тірек векторлар әдісін, кездейсоқ орманды, көпқабатты персептронды және конволюциялық нейрондық желіні қолдану арқылы орындалады. Негізгі нәтижелер. Эксперименттік бағалау IoT-түйіндерден (IEEE 802.15.4, TelosB, ESP32) тұратын зертханалық стендте және UNSW-NB15 деректер жиынтығында жүргізілді. Трафиктің уақыттық қатарларын сегментациялау және контекстік факторларды ескеру неғұрлым ықшам және ажыратылатын белгілер кеңістігін қалыптастыруға мүмкіндік беретіні, сонымен қатар классификаторларды оқытуға жұмсалатын есептеу шығындарын төмендететіні көрсетілді. Практикалық маңыздылығы. Әзірленген тәсіл ресурстары шектеулі IoT-инфрақұрылымдарға арналған АҚ оқиғаларын мониторингтеудің жеңілдетілген жүйелерін құру кезінде қолданылуы мүмкін: қарапайым модельдер шеткі түйіндерде, ал дәлірек модельдер шлюздерде және бұлттық платформаларда орындалуы мүмкін, бұл жалған іске қосылулар санын азайтып, шабуылдарды анықтаудың жеделдігін арттырады.*

Түйін сөздер: *ақпараттық қауіпсіздік, заттар интернеті, IoT, уақыттық қатарларды сегментациялау, белгілер кеңістігі, машиналық оқыту, шабуылдарды анықтау, желілік трафик, мониторинг.*

1 Кіріспе

«Индустрия 4.0» технологияларының дамуы және заттар интернеті (IoT) құрылғыларының кеңінен енгізілуі аса маңызды инфрақұрылымдарға ықтимал ақпараттық шабуылдардың бетін айтарлықтай кеңейтті [1, 2]. IoT-құрылғылар ақылды үй жүйелерінде, өнеркәсіптік автоматтандыруда, көлікте, денсаулық сақтауда және қалалық инфрақұрылымда барған сайын кеңінен қолданылады [3], бұл ретте олардың өндірістік-технологиялық және ақпараттық жүйелермен тығыз интеграциясы ақпараттық қауіпсіздікті (АҚ) мониторингтеу міндетін классикалық есептеу жүйелеріне қарағанда күрделірек етеді.

Осы саладағы зерттеулердің елеулі бөлігі машиналық оқыту алгоритмдерін қолдана отырып, IoT-құрылғылардың желілік трафигін талдау негізінде шабуылдар мен аномалияларды анықтау әдістеріне арналған [4-6]. Желілік трафик белгілерінің мәндерін бөлу уақыт бойынша тұрақты болып қалмайды: ол классификатор, әдетте, тікелей бақылай алмайтын факторлардың әсерінен өзгереді (желінің құрамының өзгеруі, жүктеменің тәуліктік және маусымдық циклділігі және т. б.), бұл штаттық оқиғаларды аномалиялық оқиғаларға қате жатқызуға әкеледі.

©Н.А. Бажаев, А.К. Шайханова, А.К. Токкулиева, 2026

Осыған байланысты IoT-желілеріндегі желілік трафиктің стационарлы еместігіне тұрақты және бақыланатын күйлердің контекстін ескеретін ықшам әрі ақпараттық белгілер кеңістігін қалыптастыру міндеті өзекті болып табылады. Осы жұмыстың мақсаты ресурстары шектеулі IoT-инфрақұрылымдарға тән есептеу шығындарын төмендету кезінде шабуылдарды анықтау дәлдігін арттыруды қамтамасыз ететін желілік трафиктің уақыттық қатарларын сегментациялау негізінде IoT-құрылғылардың АҚ мониторингі үшін белгілер кеңістігін қалыптастыру және кеңейту әдісін әзірлеу болып табылады.

2 Міндет қою

IoT-құрылғылардың есептеу ресурстары шектеулі жағдайларда ең аз есептеу шығындары кезінде желілік трафикті талдаудың жоғары дәлдігін қамтамасыз ететін ақпараттық қауіпсіздік күйін бағалау әдістерін әзірлеу қажеттілігі туындайды. IoT-инфрақұрылымдардың ерекшелігі желілік өзара әрекеттесуді көпөлшемді уақыттық қатарлар түрінде ұсыну болып табылады, олардың сипаттамалары құрылғылардың жұмыс режиміне және сыртқы әсерлерге байланысты уақыт өте өзгереді [7].

Желілік трафик параметрлерінің уақыттық қатарларының жиынтығы бойынша IoT-құрылғының ақпараттық қауіпсіздігінің ағымдағы күйін анықтауға мүмкіндік беретін белгілер кеңістігін қалыптастыру және кеңейту әдісін әзірлеу талап етіледі [8]. Ақпараттық қауіпсіздік күйі бақыланатын желілік трафиктің келесі сыныптардың біріне тиесілілігі ретінде түсіндіріледі: қалыпты жұмыс істеу, істен шығу, аномальды мінез-құлық немесе желілік шабуылдардың бір түрі.

3. Ұсынылатын әдіс

Ұсынылып отырған зерттеуде IoT-құрылғылардың күйін бағалау үшін бастапқы деректер ретінде құрылғылардың әртүрлі жұмыс режимдеріндегі мінез-құлқын сипаттайтын уақыттық қатарлар түрінде ұсынылған желілік параметрлердің реттіліктері қарастырылады.

Ғылыми жаңалық уақыт қатарларын сегментациялауды және атрибут кеңістігін контексттік кеңейтуді бірлесіп қолдану болып табылады: әр сегмент желілік трафикке әсер ететін белсенді фактор туралы ақпаратты салыстырады, бұл атрибуттардың ішкі кеңістігін қалыптастыруға және IOT құрылғыларының АҚ күйін жіктеудің тұрақтылығын арттыруға мүмкіндік береді.

Барлық бақыланатын күйлер екі ішкі жиынға бөлінеді: қауіпсіз және қауіпті. Күйлер жиынын формалды түрде келесідей анықтауға болады:

C={C1, C2}, C1⊂C – қауіпті күйлер (шабуылдар, ақаулар, ауытқулар), C2⊂C – қауіпсіз күйлер (қалыпты жұмыс).

Құрылғылардың бақыланатын күйлерін сипаттайтын көптеген уақыт тізбектері келесідей берілген:

$$X = \{X_{1,\dots}X_{c,\dots}X_C\} \in X$$

мұндағы әрбір Xc тізбегі желілік трафик параметрлерінің немесе құрылғының c күйіндегі өзара әрекеттесулерінің уақыт қатары болып табылады.

Өңдеудің есептеу ресурстарын азайту, алгоритмдердің оқу жылдамдығын арттыру мақсатында осы уақыт қатарларынан ақпараттық сипаттамаларды алу үшін сегменттік бөлу функцияларын пайдалану ұсынылады:

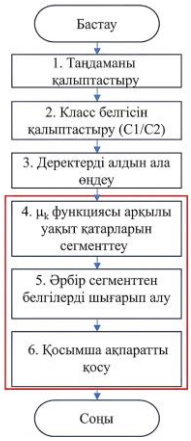
$$\mu = \{\mu_{1,\dots}\mu_{k,\dots}\mu_K\},\ \mu_k : X_c \to \{X^{ck}{}_1, \dots X^{ck}_m\}$$

мұндағы әрбір μk функциясы сыртқы факторлардың әсерінен болатын трафиктің жергілікті мінез-құлық ерекшеліктерін сипаттайтын Xckm тізбегін бөледі. Оларға оқыту үлгісінде алдын ала белгілі шабуыл, жұмыс режимдері, трафиктің уақыт қатарына әсер ететін сыртқы жағдайлардың өзгеруі кіруі мүмкін.

Жоғарыда аталған факторларды дәл анықтау мүмкін болмаған немесе олар болмаған жағдайда, сегментация әдістері статистикалық сипаттамаларға (орташа мән, дисперсия, эксцесс, асимметрия), бақылаулар арасындағы метрикалық қашықтықтарды талдауға (мысалы, Евклид қашықтығы, DTW), жиіліктік декомпозицияға, сондай-ақ сигналдың шектік сипаттамалары бойынша сүзуге негізделуі мүмкін [9].

μk функциясы арқылы қалыптастырылатын сегменттер құрылымдалған белгілер кеңістігін одан әрі құру үшін негізді анықтайды. Алынған сегменттерден белгілерді бөліп алу трафиктің өзгеруіне тұрақты деректерді қалыптастыруға бағытталған.

Оқыту таңдауын қалыптастыру қадамдарының жалпы реттілігі ұсынылған әдістің сызбасы 1-суретте көрсетілген, онда сегментация, белгілерді бөліп алу, таңдауларды қалыптастыру және классификаторды оқыту кезеңдерінің өзара байланысы көрсетілген.



Сурет 1 – Оқыту үлгісін қалыптастыру қадамдарының реттілігі

Белгілер кеңістігін кеңейту және IoT құрылғыларының ақпараттық қауіпсіздік күйлерін жіктеу міндеті үшін келесі деректерді қарастырайық. X – объектілер сипаттамаларының жиыны, $x \in X$ – алдын ала берілген векторлық кеңістіктегі белгілердің d-өлшемді кортежі $X = R^d$. x сипаттамаларына сәйкес қойылған, $\{c_1, c_2, \dots c_l\} \in C$ белгілерімен белгіленген кластар жиыны күйлердің бинарлық жиынына бөлінеді, яғни біріктірілген кластар $\{C_1, C_2\} \in C$. Белгілердің мәндеріне әсер ететін факторлардың V жиыны бар. X жиыны $f: X \to D_f$ белгілер мәндерінің жиынымен сипатталады.

Қазіргі уақыттағы әсер етуші $v \in V$ факторын ескере отырып, берілген $f_1, \dots, f_n$ кезінде бақылау объектісінің $X_i \in X$ белгілер бойынша сипаттамасы $X_i = \left(f_1(v,x), \dots, f_n(v,x)\right)$ түрінде анықталады.

Оқыту жиыны таңбаланған таңдау түріне ие болады $\left\{v_j, \{(x_i, c_i)\}_{i=1}^{N}\right\}_{j=1}^{M}$, мұндағы i – қарастырылып отырған j-фактор v_j әсер еткен сәттегі кортеждер саны.

v факторының әсерін ескеретін жіктеу алгоритмін құру қажет, $\alpha: X \to C$. Алгоритм кіріс белгілер сипаттамасы бойынша сәйкес класты анықтайды. Мұндай модельді оқыту белгілер кеңістігінің үлкен өлшемділігімен ғана емес, сонымен қатар айнымалылардың бір бөлігінің объект күйінің өзгеруіне байланысты емес, классификатор тікелей бақылай алмайтын сыртқы және ішкі факторлардың әсерінен өзгеруімен де күрделенеді.

Бұл IoT желілеріне қатысты машиналық оқыту әдістерінің принциптік шектеуінен тұрады: жүйе динамикада жұмыс істейді, қоршаған орта факторларының әсерінен бір режимнен екіншісіне үнемі ауысып отырады, ал олардың әсерін есепке алмай оқытылған алгоритм мұндай ауысуларды нақты шабуылдардан немесе іркілістерден, сондай-ақ желілік трафиктің өзгерістерін ақпараттық қауіпсіздіктің бұзылу белгілері ретінде тұрақты түрде ажырата алмайды.

Мысалы, желі сегментіне жаңа құрылғының қосылуы қызметтік хабарламалар санының, конфигурациялық командалардың және кідірістің ұлғаюына заңды түрде әкеледі – бұл әдетте аномальды белсенділікті анықтау үшін қолданылатын белгілердің дәл өзі. Өзгерістің себебін ескермей, модель штаттық оқиғаны ықтимал қауіп ретінде қабылдайды.

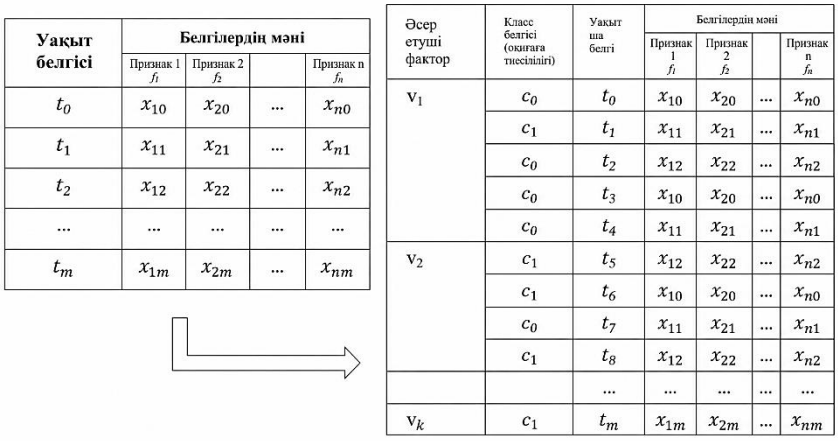
Жүйенің жұмыс істеуі туралы жинақталған статистика матрица түрінде ұсынылады, онда әрбір уақыт белгісіне тіркеуші құрылғылар арқылы тіркелген белгілердің мәндері сәйкес келеді. Осы мәндерге әсер ететін факторлардың бір бөлігі алдын ала белгілі – мысалы, жүктеменің тәуліктік немесе маусымдық циклділігі. Бұл олардың әсерімен шу ретінде күреспей, олар туралы ақпаратты оқыту ішкі жиынының таңбалануына тікелей енгізуге, әрбір жазбаға сәйкес өрісті қосуға мүмкіндік береді.

Оқыту үлгілерін қалыптастыру 1-кестеде келтірілген белгілерге негізделеді, онда штаттық және қауіпті күй үшін трафиктің негізгі параметрлері салыстырылған [10].

Кесте 1 – Объектілердің штаттық және қауіпті күйдегі белгілер бойынша сипаттамасы

Қауіпсіз (қалыпты жұмыс)		Қауіпті жағдай (шабуыл, сәтсіздік, аномалия)	
Белгі	Сипаттама	Белгі	Сипаттама
proto	TCP немесе UDP, тұрақты қосылым түрі қолданылады	proto	Ерекше хаттамалар (ICMP flood, стандартты емес UDP)
service	Қызметтердің тұрақты жиынтығы (HTTP, MQTT, CoAP)	service	Типтік емес қызметтерге қол жеткізу (telnet, ftp, rlogin)
sbytes, dbytes	Түйіндер арасындағы берілген байттар саны	state, swin, dwin, tcprtt, synack, ackdat	TCP аномальды комбинациялары бар жалаулар
state	Қосылу күйі	sbytes, dbytes, Spkts, Dpkts	Деректер теңгерімсіздігі
Spkts, Dpkts	Түйіндер арасындағы пакеттер саны	is_ftp_login, ct_ftp_cmd	Сәтсіз кірістер сериясы
Sload, Dload	Деректерді беру жылдамдығы	label	Желі күйінің мақсатты екілік белгісі
ct_srv_src, ct_srv_dst, ct_src_ltm, ct_dst_ltm, ct_src_dport_ltm, ct_dst_sport_ltm, ct_dst_src_ltm	Уақыт терезесі ішінде сол IP-мекенжаймен немесе портпен қосылымдар саны	attack_cat	Шабуыл санаты: Fuzzers, Analysis, Backdoor, DoS, Exploits, Generic, Reconnaissance, Shellcode, Worms. Қауіпті жағдайдың түрін анықтауға мүмкіндік береді.
Spkts, dsport	Бір порттан пакеттердің қайталануы	Sload	Дереккөзден тағайындалған жерге дейінгі деректерді беру жылдамдығы. Жоғары немесе күрт өзгеретін мәндер желінің шамадан тыс жүктелуін, flood-шабуылдарды және басқа да аномалияларды анықтау үшін пайдаланылуы мүмкін.
Sintpkt, Dintpkt	Телеметрия хабарламалары арасындағы орташа аралық	ct_dst_ltm, ct_srv_dst, ct_dst_src_ltm	Сол хостпен қосылымдар саны күрт өсті
tcprtt, synack, ackdat	TCP өзара әрекеттесуі және қосылымды орнату кідірісі	dst_host_srv_diff_host_rate	Тағайындалған хосттардың әртүрлілігі

2-суретте деректер жиынтығының бастапқы жазбалары әсер етуші фактор туралы ақпаратпен толықтырылған жазбаларға қалай түрлендірілетіні көрсетілген: осындай таңбалаудан кейін әрбір жазба нақты факторға байланыстырылған болады, бұл өз кезегінде белгілер кеңістігін осы фактордың мәніне сәйкес ішкі кеңістіктерге одан әрі бөлуге мүмкіндік береді.



Сурет 2 – IoT құрылғыларының нысан белгілері кортежінің ресми көрінісі

Мұндай таңбалау белгілер кеңістігін әсер етуші фактордың мәніне сәйкес ішкі кеңістіктерге бөлуге және классификаторды бүкіл таңдау жиынтығында емес, олардың әрқайсысында жеке-жеке оқытуға мүмкіндік береді. Объектіні белгілі бір күйге жатқызу міндеті осылайша контекстен бөлек емес, сол сәтте тіркелген нақты ақпараттық әсерді ескере отырып шешіледі.

Мұндай тәсіл сыртқы факторлардан туындаған деректердің өзгергіштігін объект күйінің өз өзгеруін көрсететін өзгергіштіктен ажыратуға және бөлу нәтижесінде алынған таңдау жиынтықтарының қасиеттерін әрбір сегмент үшін жеке бағалауға мүмкіндік береді. Бұл, өз кезегінде, деректердің нақты сегменті үшін өңдеудің ең тиімді алгоритмін таңдауға негіз қалыптастырады.

4. Эксперимент жүргізу

Эксперименттік бағалау әзірленген әдісті кешенді тәсілмен жүргізілді: физикалық стендтегі зертханалық сынақтар симуляциялық орталарда масштабталатын модельдеумен толықтырылды. Бұл ресурстық шектеулерге байланысты нақты жабдықта іске асыру мүмкін емес үлестірілген желілер сценарийлерін қайта жаңғыртуға мүмкіндік берді.

Зертханалық қондырғы IEEE 802.15.4 қолдау көрсететін микроконтроллерлер негізіндегі IoT түйіндерінен (TelosB, ESP32), трафикті талдау модулі бар шлюзден және жүктемені басқару контроллерінен тұрды. Желі аралас құрылымға ие болды: статистиканы жинауға арналған сымды сегменттер және коллизияларға, шуылдарға әрі кеңтаралымды трафиктің шамадан тыс жүктелуіне бейім сымсыз арналар қолданылды. Бұл өнеркәсіптік IoT ортасына тән жағдайларды, атап айтқанда өткізу қабілетінің шектеулілігі мен қосылымдардың тұрақсыздығын қайта жаңғыртуға мүмкіндік берді.

Эксперименттік тексеру үшін 2,5 миллионнан астам желілік оқиғаны қамтитын UNSW-NB15 деректер жиынтығы пайдаланылды. Оның құрамында қалыпты трафикпен қатар желілік шабуылдардың заманауи түрлері: Fuzzers, Analysis, Backdoor, DoS, Exploits, Generic, Reconnaissance, Shellcode және Worms қамтылған. Осы деректер жиынтығын пайдалану ұсынылған әдістің желілік трафиктің өзгеруінің әртүрлі сценарийлеріндегі тиімділігін бағалауға мүмкіндік берді.

Бастапқы деректер алдын ала тазартылып, нормализацияланды, содан кейін уақыттық қатарларды сегментациялау және белгілер кеңістігін қалыптастыру орындалды. Ұсынылып отырған тәсілдің ерекшелігі – әрбір объектіге IoT құрылғысының жұмыс істеу жағдайларын сипаттайтын әсер етуші фактор v туралы ақпараттың қосылуы. Нәтижесінде оқыту үлгісінде желілік трафик белгілерінің мәндерімен қатар олардың қалыптасу контексті де қамтылады. Бұл сыртқы әсерлерден туындайтын өзгерістерді ақпараттық қауіпсіздіктің бұзылуынан туындайтын өзгерістерден ажыратуға мүмкіндік береді.

Эксперименттік бағалау үшін машиналық оқытудың алты алгоритмі пайдаланылды. Логистикалық регрессия (Logistic Regression) және Наивті Байес классификаторы (Naive Bayes) – перифериялық, ресурстары шектеулі IoT түйіндерінде қолданылатын жылдам, ресурсты аз қажет ететін базалық модельдер ретінде қарастырылды. Тірек векторлар әдісі (SVM) және кездейсоқ орман әдісі (Random Forest) – күрделілігі орташа классикалық алгоритмдер ретінде қолданылды. Көпқабатты персептрон (MLP) және конволюциялық нейрондық желі (CNN) – терең оқыту модельдері ретінде пайдаланылды. Алгоритмдердің мұндай жиынтығы әртүрлі күрделілік деңгейі мен есептеу шығындарына ие модельдерді бірізді түрде салыстыруға мүмкіндік береді.

Базалық модельдердің тиімділігін сандық бағалау үшін Accuracy, Precision, Recall, F1-score және ROC-AUC көрсеткіштері бойынша салыстыру жүргізілді. Алынған нәтижелер 2-кестеде ұсынылған.

Кесте 2 – Трафикті талдау кезіндегі машиналық оқыту алгоритмдерін салыстырмалы бағалау

Алгоритм	Accuracy	Precision	Recall	F1-score	ROC-AUC
Тірек векторлар әдісі (SVM)	92%	94%	91%	90%	93%
Кездейсоқ орман әдісі (Random Forest)	93%	94%	92%	92%	95%
Логистикалық регрессия (Logistic Regression)	88%	89%	87%	88%	89%
Наивті Байес классификаторы (Naive Bayes)	82%	83%	80%	81%	83%
Көп қабатты перцептрон (MLP)	95%	95%	94%	95%	96%
Конволюциялық нейрондық желі (CNN)	96%	96%	95%	96%	97%

Алынған нәтижелер қарастырылған базалық модельдердің ішінде ең жақсы көрсеткіштерді конволюциялық нейрондық желі (CNN) көрсететінін дәлелдейді: Accuracy – 95,8 %, Precision – 96 %, Recall – 0,95, F1-score – 0,96 және ROC-AUC – 0,97. Random Forest моделі де жоғары тиімділікті көрсетеді (Accuracy – 93,1 %, F1-score – 0,92, ROC-AUC – 0,95), ал Logistic Regression және Naive Bayes модельдерінің көрсеткіштері төменірек. Бұл олардың желілік трафиктің күрделі сызықтық емес тәуелділіктерін модельдеу мүмкіндігінің шектеулілігімен байланысты. Одан әрі CNN ұсынылған әдіспен салыстыру үшін негізгі базалық модель ретінде пайдаланылады.

Гиперпараметрлерді баптау алдын ала жүргізілген есептеу эксперименттері және IoT желілік трафигін талдау бойынша заманауи әдебиеттердегі ұсынымдар негізінде эксперименттік түрде орындалды. Модельдердің негізгі параметрлері 3-кестеде келтірілген.

Кесте 3 – Модельдердің гиперпараметрлері

Модель	Негізгі параметрлер
Логистикалық регрессия	C=1.0; class_weight=balanced
Наивті Байес классификаторы	GaussianNB (без настройки)
Кездейсоқ орман әдісі	n_estimators=300; max_depth=25; min_samples_leaf=2
Тірек векторлар әдісі	kernel=RBF; C=1.5; γ=0.01
Көп қабатты перцептрон	hidden=(256,128,64); dropout=0.3; Adam lr=0.001
Конволюциялық нейрондық желі	Conv1D(64-128-256); kernel=3; Dropout=0.5

Тиімділікті бағалау жалпыға қабылданған Accuracy, Precision, Recall, F1-score және ROC-AUC [11] метрикалары бойынша жүргізілді. Нәтижелердің тұрақтылығын растау мақсатында деректер оқыту және тестілеу үлгілеріне 80/20 арақатынасында бөлінді, сондай-ақ машиналық оқыту модельдерін оқыту кезінде 5 еселік кросс-валидация қолданылды. Мұндай тәсіл қайта оқытылу ықтималдығын азайтып, алынған нәтижелердің қайталанымдылығын қамтамасыз етуге мүмкіндік берді.

Эксперимент екі кезеңде жүргізілді. Бірінші кезеңде әсер етуші факторлар туралы қосымша ақпарат ескерілмей, жіктеу жүзеге асырылды. Екінші кезеңде ұсынылған кеңейтілген белгілер кеңістігі қолданылып, оған әсер етуші фактор v туралы ақпарат қосылды. Мұндай салыстыру ұсынылған әдістің жіктеу сапасына қосатын үлесін сандық тұрғыдан бағалауға мүмкіндік берді.

Ұсынылған әдістің әсерін егжей-тегжейлі бағалау үшін Random Forest алгоритмы мысалында қосымша салыстыру жүргізілді. Базалық нұсқа ретінде UNSW-NB15 бастапқы белгілер кеңістігі бойынша жіктеу қолданылды, ал ұсынылған нұсқада уақыттық қатарларды сегменттеу және әрекет етуші фактор туралы ақпаратпен белгілер кеңістігін кеңейту жүзеге асырылды. Салыстырмалы эксперименттің нәтижелері 4-кестеде ұсынылған.

Кесте 4 – Random Forest негізіндегі базалық және ұсынылған тәсілдерді салыстыру

Тәсіл	Accuracy	Precision	Recall	F1-score	ROC-AUC
Бастапқы белгілер кеңістігі бар Random Forest	93%	94%	92%	92%	95%
Уақыттық қатарларды сегменттеуі бар Random Forest	94%	95%	93%	94%	96%
Әрекет етуші факторды ескере отырып сегменттелген уақыттық қатарлары бар Random Forest	96%	96%	95%	95%	97%

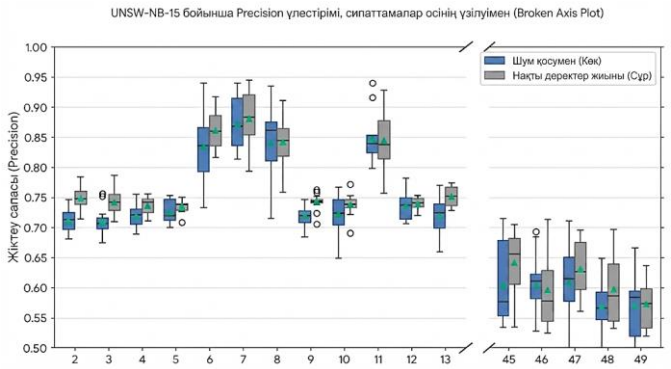
Нәтижелер уақыттық қатарларды сегменттеуді және әрекет етуші факторды есепке алуды дәйекті түрде қолдану бастапқы белгілер кеңістігін пайдаланумен салыстырғанда жіктеу сапасын арттыратынын көрсетеді. Random Forest үшін Accuracy мәні 0,93-тен 0,96-ға дейін, Precision – 0,94-тен 0,96-ға дейін, Recall – 0,92-ден 0,95-ке дейін, F1-score – 0,92-ден 0,95-ке дейін, ал ROC-AUC – 0,95-тен 0,97-ге дейін артты. Осылайша, IoT-құрылғысының жұмыс істеу контекстін ескере отырып белгілер кеңістігін кеңейту желілік трафик сипаттамалары өзгерген кезде жіктеудің тұрақтылығын арттыруды қамтамасыз етеді.

Сонымен қатар, сегменттеу параметрлерінің жіктеу сапасына әсерін бағалау үшін сегменттердің әртүрлі саны бойынша зерттеу жүргізілді. Эксперимент барысында сегменттер саны 2-ден 20-ға дейінгі аралықта өзгертіліп, содан кейін қолданылған классификаторлардың сапа көрсеткіштері салыстырылды. Алынған нәтижелер 5-8 сегмент аралығында жіктеу сапасы мен есептеу жүктемесі арасындағы ең қолайлы арақатынасқа қол жеткізілетінін көрсетті: Precision 93-94 %, Recall – 0,91–0,93, ал F1-score – шамамен 0,92 құрайды. Сегменттер санын одан әрі арттырған кезде өңдеу уақытының бір мезгілде өсуімен қатар сапа көрсеткіштерінің тұрақтануы байқалады.

Белгілер кеңістігін қалыптастыру үшін уақыттық қатарлар сегменттерінің статистикалық, уақыттық және жиіліктік сипаттамалары талданды. Сегменттердің статистикалық сипаттамалары ретінде орташа мән, дисперсия, стандартты ауытқу және медиана қарастырылды. Бұл сипаттамаларды талдау желілік трафиктің статистикалық қасиеттерінің жекелеген уақыттық сегменттерде өзгеруін ескеруге мүмкіндік береді. 3-суретте dload белгісін шуылдандырудың Precision метрикасының мәніне әсері көрсетілген. Экспериментте предикторлардың біріне дәйекті түрде гаусстық шуыл қосылып, содан кейін қауіпті күйді анықтау кезінде Precision көрсеткішінің өзгеруі бағаланды. UNSW-NB15 деректер жиыны үшін 49 предиктор қарастырылды. Осылайша, графиктегі әрбір нүкте зерттелетін белгілердің бірінің күйі өзгерген кездегі жіктеу нәтижесіне сәйкес келеді. Мұндай тәсіл жекелеген белгілердің жергілікті ауытқуларға сезімталдығын бағалауға және сегменттелген ұсынудың желілік трафиктегі кездейсоқ өзгерістердің әсерін қаншалықты төмендететінін анықтауға мүмкіндік берді.

Негізгі салыстырмалы эксперимент үшін ауытқудың орташа деңгейі ретінде $\sigma = 0.04$, мәні қолданылды. Бұл мән желілік трафиктің нормаланған сипаттамаларындағы шағын ауытқуларды олардың бастапқы үлестірімін елеулі түрде бұзбай модельдеуге мүмкіндік береді. Аталған деңгейді таңдау алдыңғы зерттеулердің нәтижелерімен қосымша негізделді, оларда UNSW-NB15 деректер жиыны үшін гаусстық шуылдың 0.02–0.08 деңгейлері қолданылып, шабуылдарды анықтау модельдерінің шуыл деңгейінің артуына төзімділігі бағаланған [12].

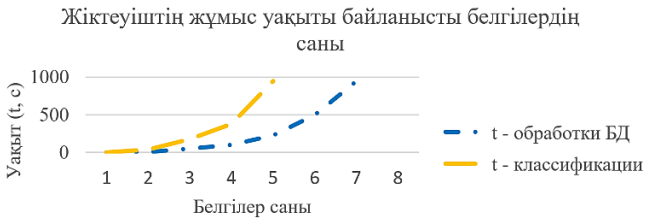
Белгілер кеңістігін қалыптастыру үшін уақыттық қатарлар сегменттерінің статистикалық, уақыттық және жиіліктік сипаттамалары талданды. 3-суретте dload белгісіне шу қосылуының Precision метрикасының мәніне әсері көрсетілген. Алынған нәтижелер сегменттелген ұсынуды қолдану жергілікті шу әсерлерінің қауіпті күйлерді анықтау сапасына ықпалын төмендетуге мүмкіндік беретінін растайды.



Сурет 3 – Шусыз және шу қолданылған кездегі precision дәлдігі бойынша жіктеу сапасы

Белгілерді іріктеу әдістерін қолдану ақпараттық маңызы төмен белгілерді алып тастау және деректердің өлшемділігін азайту есебінен есептеу шығындарын төмендетуге мүмкіндік береді. Классификатордың жұмыс уақытының пайдаланылатын белгілер санына тәуелділігі 4-суретте көрсетілген.

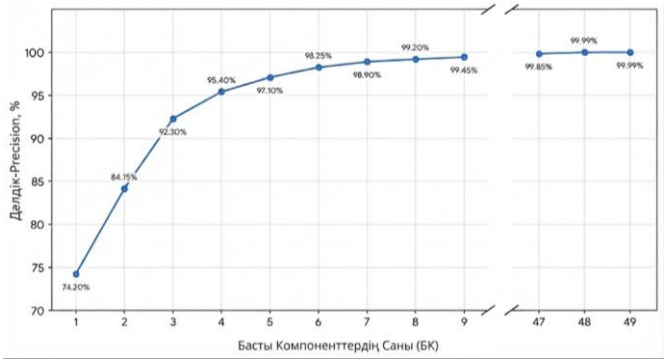
Есептеу шығындарын сандық бағалау үшін эксперимент барысында пайдаланылатын белгілер саны әртүрлі болған кезде деректерді өңдеу уақыты және классификатордың жұмыс істеу уақыты өлшенді. Осылайша, есептеу тиімділігі тікелей өлшенетін сипаттама – деректерді өңдеу және жіктеуді орындау уақыты бойынша бағаланды. Бұл белгілер кеңістігінің өлшемділігі азайған кезде есептеу жүктемесінің өзгеруін бағалауға мүмкіндік береді.



Сурет 4 – Белгілердің санына байланысты жіктеуіштің жұмыс уақыты

Белгілер кеңістігінің өлшемділігінің әсерін бағалау үшін негізгі компоненттер әдісі (PCA, Principal Component Analysis) қолданылды. Бастапқы белгілер негізгі компоненттер кеңістігіне түрлендірілді, содан кейін сақталатын компоненттер саны әртүрлі болған жағдайда жіктеу жүргізілді. Компоненттер санының әрбір мәні үшін жіктеу сапасына жеке эксперименттік бағалау орындалды, ал алынған Precision мәндері 5-суретте көрсетілген тәуелділікті құру үшін пайдаланылды. Осылайша, графиктегі әрбір нүкте сақталатын PCA-компоненттердің берілген саны кезіндегі эксперименттік жолмен алынған Precision мәніне сәйкес келеді.

5-суретте пайдаланылатын негізгі компоненттердің санына байланысты дәлдік сапасының қол жеткізілген көрсеткішінің мәндері келтірілген. Өсу белгілі бір нүктеге дейін жалғасады, содан кейін мәндер үстіртке шығады және компонентті одан әрі қосу айтарлықтай әсер етпейді.



Сурет 5 – Дәлдік мәнінің PCA әдісімен алынған негізгі компоненттер санына тәуелділігі

Алынған сегменттер әртүрлі статистикалық қасиеттермен және белгілердің әртүрлі таралуымен сипатталады. Бұл қолданыстағы факторлар туралы қосымша ақпаратты есепке алу біртекті оқыту үлгілерін қалыптастыруға және желілік трафиктің тұрақсыздығының әсерін азайтуға мүмкіндік беретіндігін көрсетеді. Сонымен қатар, әртүрлі классификаторларды қолдану қолтаңба кеңістігін қалыптастырудың ұсынылған әдісінің әмбебаптығын растайды.

Есептеу тиімділігін талдау нәтижелері сегменттеуді зерттеу нәтижелерімен сәйкес келеді: жіктеу сапасы тұрақтану аймағына жеткеннен кейін сегменттер санын одан әрі арттыру негізінен өңделетін деректер көлемі мен есептеу уақытының ұлғаюына әкеледі, алайда сапаның соған сәйкес елеулі өсуін қамтамасыз етпейді. Сондықтан сегменттеу параметрлерін таңдау кезінде жіктеу сапасы мен есептеу шығындарын бір мезгілде ескеру қажет.

Алынған нәтижелер белгі кеңістігін қалыптастыру кезінде қолданыстағы факторлар туралы қосымша ақпаратты пайдалану IoT-құрылғылардың ақпараттық қауіпсіздігінің жай-күйін айқындау сапасын арттыратынын және желілік трафиктің өзгермелі сипаттамалары жағдайында неғұрлым тұрақты жіктеуді қамтамасыз ететінін растайды.

5 Қорытынды

Ұсынылған IoT құрылғыларының ақпараттық қауіпсіздігін мониторингілеу үшін желілік трафиктің уақыттық қатарларын сегментациялауға негізделген белгілер кеңістігін қалыптастыру және кеңейту әдісі деректерді өңдеудің қолайлы есептеу күрделілігін сақтай отырып, желі күйлерінің белгілер арқылы сипатталуының ақпараттылығын арттыруға мүмкіндік береді. Сегменттік талдауды қолдану желілік трафиктің мінез-құлқындағы жергілікті ерекшеліктерді анықтауға, бақыланатын процестердің стационарлық емес әсерін азайтуға және қауіпсіз күйлерді, ақауларды және желілік шабуылдардың әртүрлі түрлерін дәлірек ажыратуға мүмкіндік береді.

Ұсынылған тәсілдің айрықша ерекшелігі-оқыту үлгілерін қалыптастыру кезінде желілік трафиктің сипаттамаларына әсер ететін факторлар туралы қосымша ақпаратты пайдалану. Мұндай ақпаратты есепке алу атрибуттық кеңістікті кеңейтуге, бақылау объектілерінің атрибуттық сипаттамасының ақпараттылығын арттыруға және IoT құрылғыларының жұмыс істеу режимдеріне байланысты өзгерістердің әсерін азайтуға мүмкіндік береді, бұл машиналық оқыту модельдерінің желілік трафик сипаттамаларының өзгеруіне тұрақтылығын арттыруға ықпал етеді.

Жүргізілген эксперименттік бағалау әртүрлі есептеу күрделілігіндегі машиналық оқыту алгоритмдерін пайдалану кезінде ұсынылған әдістің тиімділігін растайды. Нәтижелер кеңейтілген қолтаңба кеңістігін қолдану пайдаланылған деректерді өңдеу үлгісіне қарамастан ақпараттық қауіпсіздік күйлерін жіктеу сапасын арттыруға ықпал ететінін көрсетеді. Әзірленген тәсілді ресурспен шектелген IoT-инфрақұрылымдардың ақпараттық қауіпсіздігін мониторингтеудің бейімделген зияткерлік жүйелерін құру үшін әдістемелік негіз ретінде пайдалануға болады.

Әдебиеттер тізімі

1. Lee J. A Cyber-Physical Systems Architecture for Industry 4.0 / J. Lee, B. Bagheri, H.A. Kao // Manufacturing Letters. – 2015. – Vol. 3. – P. 18-23.
2. Atzori L. The Internet of Things: A Survey / L. Atzori, A. Iera, G. Morabito // Computer Networks. – 2010. – Vol. 54, № 15. – P. 2787-2805.
3. Threat analysis of IoT networks using artificial neural network intrusion detection system / E. Hodo et al // 2016 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC), Yasmine Hammamet, Tunisia, 2016. – P. 1-6, https://doi.org/10.1109/ISNCC.2016.7746067.
4. Deep Learning for Cyber Security Intrusion Detection: Approaches, Datasets and Comparative Study / M.A. Ferrag et al // Journal of Information Security and Applications. – 2020. – Vol. 50.
5. Survey of intrusion detection systems: techniques, datasets and challenges / A. Khraisat et al // Cybersecur 2, 20 (2019). https://doi.org/10.1186/s42400-019-0038-7.
6. Alrawashdeh K. Toward an Online Anomaly Intrusion Detection System Based on Deep Learning / K. Alrawashdeh, C. Purdy // 2016 15th IEEE International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA), Anaheim, CA, USA, 2016. – P. 195-200. https://doi.org/10.1109/ICMLA.2016.0040.
7. Sukhoparov M.E. Improving the Quality of the Identification of the Information Security State Based on Sample Segmentation / M.E. Sukhoparov, I.S. Lebedev // Aut. Control Comp. Sci. – 2023. – № 57. – P. 1071-1075. https://doi.org/10.3103/S0146411623080321.
8. Semenov V.V. Identification of Abnormal Functioning of Devices of Cyber-Physical Systems / M.E. Sukhoparov, I.S. Lebedev // Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. NEW2AN ruSMART 2020. Lecture Notes in Computer Science. – 2020. – vol 12525. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-65726-0_1.
9. Segmenting Time Series: A Survey and Novel Approach / E. Keogh et al // Data Mining in Time Series Databases. – World Scientific, 2004.
10. Moustafa N. UNSW-NB15: a comprehensive data set for network intrusion detection systems (UNSW-NB15 network data set) / N. Moustafa, J. Slay // 2015 Military Communications and Information Systems Conference (MilCIS), Canberra, ACT, Australia. – 2015. – P. 1-6. https://doi.org/10.1109/MilCIS.2015.7348942.
11. Fawcett T. An Introduction to ROC Analysis / T. Fawcett // Pattern Recognition Letters. – 2006. – Vol. 27, № 8. – P. 861-874.

Алғыс білдіру

Бұл зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитетінің қаржылық қолдауымен орындалды (грант № AP25794699).

Н.А. Бажаев*, А.К. Токкулиева

Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева,
010000, Республика Казахстан, г. Астана, улица К. Сатпаева, 2,
*e-mail: shaikhanova_ak@enu.kz

МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ И РАСШИРЕНИЯ ПРИЗНАКОВОГО ПРОСТРАНСТВА ДЛЯ МОНИТОРИНГА ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ IOT-УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ СЕГМЕНТАЦИИ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ СЕТЕВОГО ТРАФИКА

Предмет исследования. Широкое распространение устройств Интернета вещей (IoT) в системах умного дома, промышленной автоматизации, на транспорте, в здравоохранении и городской инфраструктуре сопровождается ростом числа возможных точек несанкционированного доступа. В отличие от традиционных вычислительных систем IoT-устройства характеризуются ограниченными аппаратными ресурсами – объёмом памяти, производительностью процессора, пропускной способностью каналов связи и энергопотреблением, что делает невозможным прямое применение сложных вычислительных и криптографических методов мониторинга информационной безопасности (ИБ) без их предварительной адаптации к ресурсоограниченным условиям. Метод. Для формирования информативного признакового описания состояния ИБ IoT-устройств предложено использовать сегментацию временных рядов параметров сетевого трафика на основе статистических, частотных и пороговых критериев, а также расширение признакового пространства с учётом внешних и внутренних факторов, влияющих на наблюдаемые значения признаков. Классификация состояний выполняется с применением шести алгоритмов машинного обучения различной сложности – логистической регрессии, наивного байесовского классификатора, метода опорных векторов, случайного леса, многослойного персептрона и свёрточной нейронной сети. Основные результаты. Экспериментальная оценка выполнена на лабораторном стенде из IoT-узлов (IEEE 802.15.4, TelosB, ESP32) и на наборе данных UNSW-NB15. Показано, что сегментация временных рядов трафика и учёт контекстных факторов позволяют формировать более компактное и различимое признаковое пространство, снижая при этом вычислительные затраты на обучение классификаторов. Практическая значимость. Разработанный подход применим при построении облегчённых систем мониторинга событий ИБ для ресурсоограниченных IoT-инфраструктур: простые модели могут выполняться на периферийных узлах, а более точные – на шлюзах и облачных платформах, что снижает число ложных срабатываний и повышает оперативность обнаружения атак.

Ключевые слова: *информационная безопасность, интернет вещей, IoT, сегментация временных рядов, признаковое пространство, машинное обучение, обнаружение атак, сетевой трафик, мониторинг.*

N. Bazhayev*, A. Tokkuliyeva
L.N. Gumilyov Eurasian National University,
2 Satbayev Street, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan
*e-mail: shaikhanova_ak@enu.kz

A METHOD FOR FEATURE SPACE CONSTRUCTION AND EXPANSION FOR INFORMATION SECURITY MONITORING OF IoT DEVICES BASED ON NETWORK TRAFFIC TIME SERIES SEGMENTATION

Subject of the study. The widespread adoption of the Internet of Things (IoT) in smart homes, industrial automation, transportation, healthcare, and smart city infrastructures has led to a significant increase in the number of potential attack surfaces and unauthorized access points. Unlike conventional computing systems, IoT devices are characterized by limited hardware resources, including restricted memory capacity, low computational performance, limited communication bandwidth, and low power consumption. These constraints hinder the direct application of computationally intensive and cryptographic information security monitoring techniques without adaptation to resource-constrained environments. Method. To construct an informative feature representation of IoT device security states, a method based on network traffic time series segmentation using statistical, frequency-domain, and threshold-based criteria is proposed. The feature space is further expanded by incorporating external and internal factors affecting the observed feature values. Security state classification is performed using six machine learning algorithms of varying computational complexity: Logistic Regression, Naive Bayes, Support Vector Machine (SVM), Random Forest, Multilayer Perceptron (MLP), and Convolutional Neural Network (CNN). Main results. The proposed method was experimentally evaluated using both a laboratory testbed based on IoT nodes (IEEE 802.15.4, TelosB, ESP32) and the UNSW-NB15 dataset. The results demonstrate that network traffic time series segmentation combined with contextual information enables the construction of a more compact and discriminative feature space while reducing the computational cost of classifier training. Practical significance. The proposed approach can be applied to the development of lightweight information security monitoring systems for resource-constrained IoT infrastructures. Lightweight machine learning models can be deployed on edge devices, whereas more computationally intensive models can operate on gateways or cloud platforms, thereby reducing false alarm rates and improving the timeliness of cyberattack detection.

Key words: *information security, Internet of Things, IoT, time series segmentation, feature space, machine learning, attack detection, network traffic, monitoring.*

Сведения об авторах

Нуржан Аманкулулы Бажаев* – постдокторант, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, г. Астана, Республика Казахстан; e-mail: nurzhan_nfs@hotmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-4820-6132.

Айжан Конурбаевна Токкулиева – докторант, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, г. Астана, Республика Казахстан; e-mail: tokkuliyeva_ak@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5019-2413.

Авторлар туралы мәліметтер

Нуржан Аманкулулы Бажаев* – постдокторант, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, «Мемлекеттік техникалық қызмет» АҚ, Астана қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: nurzhan_nfs@hotmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-4820-6132.

Айжан Конурбаевна Токкулиева – докторант, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: tokkuliyeva_ak@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5019-2413.

Information about the authors

Nurzhan Bazhayev* – postdoctoral fellow; L.N. Gumilyov Eurasian National University, State Technical Service, Astana, Republic of Kazakhstan; e-mail: nurzhan_nfs@hotmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-4820-6132.

Aizhan Tokkuliyeva – doctoral student; L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Republic of Kazakhstan; e-mail: tokkuliyeva_ak@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5019-2413.

Редакцияға енуі 20.06.2026
Өңдеуден кейін түсуі 04.08.2026
Жариялауға қабылданды 04.09.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-28

МРНТИ: 68.85.85

CC BY 4.0
Check for updates

Ш.Ж. Сеилов[1], Б.Ш. Журсинбек[1], М.У. Байдельдинов[1], А.К. Майданов[*], А.А. Сейлов[1,2]
[1]Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева,
010008, Республика Казахстан, г. Астана, ул. Сатпаева, 2
[2]ТОО «Ауыл телеком» (дочерняя компания АО «Казахтелеком»)
*e-mail: makeadil@mail.ru

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СЕЛЬСКАЯ ТЕРРИТОРИЯ КАК МОДЕЛЬ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗВИТИЯ КАЗАХСТАНА В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

Аннотация: *Устойчивое развитие сельских территорий остаётся одним из ключевых условий продовольственной безопасности и роста экономики Казахстана. Несмотря на значительные государственные инвестиции в цифровую инфраструктуру и сельское хозяйство, сохраняются неравномерность территориального развития, низкая производительность труда, ограниченная диверсификация сельской экономики и миграционный отток населения.*

В работе предложена концепция «Интеллектуальная сельская территория» (Intelligent Rural Territory, IRT), рассматривающая сельскую территорию как интегрированную социально-экономическую систему, в которой цифровые технологии служат инструментом повышения эффективности агропромышленного комплекса, роста экспортного потенциала и качества жизни населения. В отличие от концепций Smart Village и Digital Village, ориентированных на телекоммуникационную инфраструктуру и отдельные сервисы, предложенная модель рассматривает цифровую трансформацию как основу новой экономики сельских территорий. Предложена шестиуровневая архитектура, связывающая цифровую инфраструктуру, данные, интеллектуальную аналитику, платформы, новые виды экономической деятельности и результаты устойчивого развития восходящим потоком данных и нисходящим контуром управления.

©Ш.Ж. Сеилов, Б.Ш. Журсинбек, М.У. Байдельдинов, А.К. Майданов, А.А. Сейлов, 2026

Введён индекс Intelligent Rural Territory Index (IRTI) для комплексной оценки цифровой зрелости, экономической результативности, социальной устойчивости и экспортной готовности сельских территорий. В отличие от индексов семейства IDI с компенсаторным аддитивным агрегированием, IRTI использует некомпенсаторную геометрическую свёртку, при которой провал по любому из шести блоков не возмещается остальными. Методика реализована как модульная информационная система с фиксированными границами нормализации, протоколированием винзоризации, явной политикой пропусков и манифестом воспроизводимости прогона; ранжирование выполняется по распределению Дирихле в 100 000 реализаций весов с публикацией медианного ранга и интервала рангов 5-95%.

Работа является методологической: числовые результаты получены на синтетической панели из 17 единиц наблюдения и проверяют корректность программной реализации протокола, а не оценивают реальные области. Проверка показала, что индекс публикуется для 14 единиц, ранги шести из них неустойчивы к выбору весов, а некомпенсаторная свёртка штрафует несбалансированные профили, не переупорядочивая сбалансированную часть совокупности. Расчёт на официальной статистике предполагается в следующей публикации.

Результаты применимы при разработке государственной политики цифровой трансформации сельских территорий Республики Казахстан и при формировании национальной программы «Интеллектуальная сельская территория Казахстана – 2035».

Ключевые слова: *интеллектуальная сельская территория, Smart Village, цифровая трансформация, агропромышленный комплекс, композитный индекс, некомпенсаторное агрегирование, анализ чувствительности, метод Монте-Карло, спутниковый мониторинг, устойчивое развитие, Казахстан.*

Введение

Современный этап развития мировой экономики характеризуется переходом к цифровым платформам, широким внедрением искусственного интеллекта, Интернета вещей, технологий больших данных и цифровых двойников. Эти изменения оказывают существенное влияние на пространственное развитие государств, формируя новые подходы к организации экономики, государственного управления и территориального развития. Международное измерение этого процесса опирается на индекс развития ИКТ (ICT Development Index, IDI), ежегодно публикуемый Международным союзом электросвязи [1-3]; методология индекса версии 3.1 объединяет десять показателей в два столпа – универсальную и содержательную связность [4, 5].

Для Казахстана вопросы развития сельских территорий имеют стратегическое значение. По балансу земель на 1 ноября 2024 года земельный фонд, используемый Республикой Казахстан, составляет 262,9 млн га, из которых сельскохозяйственные угодья занимают 213,6 млн га – порядка 81% используемого фонда; пашня составляет 26,9 млн га, то есть около 10% территории страны [6, 7]. Агропромышленный комплекс обладает значительным потенциалом увеличения вклада в валовой внутренний продукт, расширения экспортных поставок продовольствия и повышения национальной продовольственной безопасности. Вместе с тем многие сельские территории сталкиваются с рядом системных проблем: сокращением численности населения, оттоком молодежи, ограниченным доступом к качественным образовательным и медицинским услугам, низкой производительностью труда, слабой диверсификацией экономики и недостаточной интеграцией в цифровую экономику.

На протяжении последних лет основное внимание государственной политики уделялось развитию телекоммуникационной инфраструктуры и обеспечению доступа к широкополосному Интернету, что закреплено в государственной программе «Цифровой Казахстан» и сменившей её Концепции цифровой трансформации, развития отрасли информационно-коммуникационных технологий и кибербезопасности на 2023-2029 годы [8, 9]. Безусловно, наличие современной связи является необходимым условием цифровой трансформации. Однако международный опыт показывает, что сам по себе доступ к Интернету не приводит автоматически к росту производительности, повышению доходов населения или снижению миграции из сельской местности [16, 18, 19].

Следовательно, объектом цифровой трансформации должна стать не только инфраструктура связи, но и сама система функционирования сельской территории. Цифровые технологии должны быть интегрированы во все ключевые процессы – управление

земельными ресурсами, производство сельскохозяйственной продукции, логистику, переработку, экспорт, образование, здравоохранение и государственное управление.

Исходя из этого, в настоящей статье предлагается концепция «Интеллектуальная сельская территория» (Intelligent Rural Territory). Под интеллектуальной сельской территорией понимается комплексная социально-экономическая система, основанная на данных, цифровых платформах и технологиях искусственного интеллекта, обеспечивающая устойчивое развитие сельской экономики, рост производительности агропромышленного комплекса, повышение качества жизни населения и увеличение экспортного потенциала страны.

Главная гипотеза исследования заключается в том, что переход от модели «цифрового села» к модели «интеллектуальной сельской территории» способен обеспечить качественно новый уровень развития агропромышленного комплекса Казахстана, превратив его в один из ключевых драйверов долгосрочного экономического роста.

Научная новизна исследования состоит в следующем. Во-первых, предложена концепция интеллектуальной сельской территории, объединяющая цифровую инфраструктуру, интеллектуальное управление агропроизводством, социальную устойчивость и экспортно-ориентированную экономику в единой измеримой модели. Во-вторых, разработана шестиуровневая архитектура цифровой экосистемы сельской территории, связывающая уровни восходящим потоком данных и нисходящим контуром управления. В-третьих, предложен индекс Intelligent Rural Territory Index (IRTI) с некомпенсаторной геометрической свёрткой, явной политикой пропусков и воспроизводимым вычислительным протоколом, доведённым до модульной информационной системы. В-четвёртых, обоснован переход от оценки цифровизации по обеспеченности связью к оценке по приросту производительности, доходов, экспортной выручки и занятости. В-пятых, сформирована концептуальная основа национальной программы «Интеллектуальная сельская территория Казахстана – 2035», учитывающая экономические, социальные, технологические и экологические особенности Республики Казахстан.

Эволюция концепции цифрового развития сельских территорий

Обзор мировой литературы и теоретические основы исследования

Вопросы развития сельских территорий на протяжении последних десятилетий занимают одно из центральных мест в исследованиях региональной экономики, аграрной политики и цифровой трансформации. Первоначально исследования были сосредоточены преимущественно на проблемах модернизации сельского хозяйства, развития инженерной инфраструктуры и повышения эффективности государственного управления. Однако стремительное развитие цифровых технологий существенно изменило содержание научной дискуссии.

С начала 2010-х годов в мировой литературе активно развивается концепция Smart Village [10, 11], рассматривающая цифровые технологии как инструмент повышения качества жизни сельского населения. Основной акцент делается на развитии широкополосного Интернета, цифровых государственных услуг, электронного здравоохранения, дистанционного образования, интеллектуальных энергетических систем и цифрового управления местными сообществами [12, 13]. На уровне политики Европейского союза концепция закреплена инициативой EU Action for Smart Villages и последующими мерами поддержки [20]. Современные обзоры отмечают междисциплинарный характер этой концепции и её связь с устойчивым развитием [16, 18, 19], а также указывают на проблемы масштабирования, финансирования и учета местной специфики [14, 17]. Наукометрический анализ показывает быстрый рост числа публикаций при сохраняющейся терминологической неопределённости самого понятия «умное село» [18, 19].

Параллельно развивается направление Digital Village [21, 22], в котором цифровизация рассматривается как инструмент комплексной модернизации сельских территорий. Особое развитие данная концепция получила в Китае, где цифровая трансформация стала частью государственной стратегии сельского возрождения (Rural Revitalization). Исследования показывают, что цифровые платформы, электронная коммерция, интеллектуальное сельское хозяйство и цифровое управление положительно влияют на доходы населения и эффективность местного развития, а также сокращают разрыв в доходах между городом и

селом [23]. При этом большое внимание уделяется созданию интегральных индексов оценки цифрового развития сельских территорий [21].

Значительное влияние на формирование современных подходов оказала и концепция Smart City, основанная на использовании больших данных, Интернета вещей, искусственного интеллекта и цифровых платформ для управления городской средой [11, 13]. В последние годы многие исследователи пытаются перенести отдельные принципы Smart City на сельские территории, однако особенности сельского пространства требуют иных организационных и экономических решений [13, 15, 17].

Технологическое ядро этих концепций опирается на быстро развивающийся аппарат дистанционного зондирования и машинного обучения в агропроизводстве: спутниковый мониторинг и вегетационные индексы [25, 26], прогнозирование урожайности методами машинного обучения [27, 28] и цифровые двойники в «умном» сельском хозяйстве [29]. Отдельную линию образуют работы о доверии к данным и решениям в распределённых агропродовольственных системах: риск-ориентированные схемы верификации, объединяющие цифровую прослеживаемость, мониторинг на основе искусственного интеллекта и выборочный лабораторный аудит [30], а также исследования условий доверия при обмене сельскохозяйственными данными и роли отраслевых кодексов поведения [37]. Для интеллектуальной сельской территории эти вопросы существенны: показатели блоков формируются из ведомственных, спутниковых и корпоративных источников, и их пригодность для управленческих решений определяется не только полнотой, но и проверяемостью.

Основные ограничения существующих концепций

Несмотря на активное развитие исследований, анализ современной литературы позволяет выделить ряд принципиальных ограничений существующих подходов.

Во-первых, большинство исследований рассматривает цифровизацию преимущественно как развитие инфраструктуры связи и электронных сервисов [10, 12, 20]. При этом значительно меньше внимания уделяется трансформации производственной структуры сельской экономики и формированию новых источников создания добавленной стоимости.

Во-вторых, существующие модели ориентированы преимущественно на относительно компактные территории Европы и Восточной Азии, характеризующиеся высокой плотностью населения и развитой транспортной инфраструктурой [13, 15, 16, 21]. Они недостаточно учитывают особенности стран с огромной территорией, низкой плотностью населения и значительной пространственной неоднородностью.

В-третьих, большинство исследований оценивает эффективность цифровизации через показатели доступности Интернета, цифровых услуг и уровня информатизации населения [1-4]. Однако подобные показатели не отражают влияние цифровых технологий на производительность агропромышленного комплекса, экспортную конкурентоспособность и устойчивость сельской экономики.

В-четвертых, современные концепции редко рассматривают сельскую территорию как единую интегрированную систему, объединяющую производство, логистику, переработку, образование, здравоохранение, экологический мониторинг и государственное управление на основе единой цифровой платформы.

В-пятых, интегральные индексы цифрового развития в подавляющем большинстве строятся на аддитивной свёртке нормализованных показателей, то есть являются полностью компенсаторными: высокое значение одного измерения арифметически возмещает провал другого. В методологической литературе по композитным индикаторам такое свойство рассматривается как источник систематического искажения ранжирований [31-36].

Казахстанский контекст как источник новой научной модели

Особенности Казахстана существенно отличаются от большинства стран, на материалах которых сформированы современные концепции Smart Village.

Казахстан обладает одной из крупнейших территорий мира, характеризуется крайне низкой плотностью населения, значительными расстояниями между населенными пунктами, разнообразием природно-климатических условий и высокой специализацией отдельных регионов на различных видах сельскохозяйственного производства.

На севере страны доминирует зерновое хозяйство, на юге – орошаемое земледелие, в западных и центральных регионах – пастбищное животноводство, в юго-восточных областях активно развиваются садоводство и овощеводство. Одновременно сохраняются существенные различия в уровне доходов населения, обеспеченности социальной инфраструктурой и доступности современных цифровых технологий.

В этих условиях механическое применение зарубежных моделей Smart Village не позволяет решить стратегические задачи национального развития.

Главной целью цифровой трансформации сельских территорий Казахстана должно стать не только повышение качества предоставления государственных услуг, но и формирование новой модели пространственного развития, обеспечивающей рост производительности агропромышленного комплекса, увеличение экспорта продукции с высокой добавленной стоимостью, создание новых рабочих мест и снижение миграционного оттока населения.

Научный пробел и авторская концепция

Проведенный анализ показывает наличие существенного научного пробела. В доступной литературе не обнаружено интегральной концепции, объединяющей цифровую трансформацию сельских территорий, интеллектуальное управление природными ресурсами, искусственный интеллект, спутниковый мониторинг, цифровые двойники, экспортно-ориентированное развитие агропромышленного комплекса и социальную устойчивость сельских сообществ в единой измеримой модели.

Для восполнения данного пробела в настоящем исследовании предлагается концепция «Интеллектуальная сельская территория» (Intelligent Rural Territory, IRT).

В отличие от существующих подходов, интеллектуальная сельская территория рассматривается как единая цифровая социально-экономическая экосистема, в которой данные становятся стратегическим производственным ресурсом, а искусственный интеллект, спутниковые технологии, цифровые двойники и платформенные сервисы обеспечивают повышение эффективности производства, устойчивое использование природных ресурсов, рост доходов населения и укрепление экспортного потенциала агропромышленного комплекса.

Концепция «Интеллектуальная сельская территория» как новая модель пространственного развития

Научное обоснование новой концепции

Анализ современных исследований показал, что существующие концепции Smart Village, Digital Village и Rural Revitalization [10-13, 21-23] внесли значительный вклад в понимание цифровой трансформации сельских территорий. Однако их объединяет одна общая особенность – цифровые технологии рассматриваются преимущественно как средство повышения доступности услуг, совершенствования инфраструктуры и локального управления.

В условиях Казахстана подобный подход является необходимым, но недостаточным.

Для страны, обладающей одной из крупнейших территорий мира, богатыми земельными ресурсами и высоким аграрным потенциалом, основной целью цифровой трансформации должно стать создание новой модели пространственного развития, в которой сельская территория выступает не как объект государственной поддержки, а как интеллектуальная производственная система, генерирующая экономический рост, экспортную выручку и социальную устойчивость.

Таким образом, предлагается переход от парадигмы «цифровизация инфраструктуры» к парадигме «интеллектуализации территориальной экономики».

Авторское определение

В настоящем исследовании предлагается следующее определение.

Интеллектуальная сельская территория (Intelligent Rural Territory, IRT) – это интегрированная пространственная социально-экономическая система, функционирующая на основе данных, искусственного интеллекта, цифровых платформ, спутникового мониторинга, цифровых двойников и интеллектуального управления природными ресурсами, обеспечивающая устойчивое развитие агропромышленного комплекса, повышение качества жизни населения и рост экспортной конкурентоспособности страны.

В отличие от существующих определений, данная концепция объединяет четыре взаимосвязанных компонента:

– цифровую инфраструктуру;
– интеллектуальное управление агропроизводством;
– социальную устойчивость сельских территорий;
– экспортно-ориентированную экономику.

Именно их интеграция формирует качественно новую модель развития.

Архитектура интеллектуальной сельской территории

Предлагаемая модель включает шесть взаимосвязанных уровней (рис. 1). Уровни связаны двумя встречными потоками: восходящим потоком данных, в котором первичные измерения последовательно превращаются в решения, и нисходящим контуром управления, в котором решения возвращаются на нижние уровни в виде управляющих воздействий.



Рисунок 1 – Шестиуровневая архитектура интеллектуальной сельской территории

Первый уровень – цифровая инфраструктура

Создается гибридная коммуникационная среда, объединяющая волоконно-оптические линии связи, мобильные сети, спутниковый Интернет, сети Интернета вещей и облачные вычисления.

Основная задача данного уровня состоит не только в обеспечении доступа к Интернету, но и в создании среды непрерывного обмена данными между всеми участниками сельской экономики.

Второй уровень – цифровые данные

На этом уровне формируется единое цифровое пространство сельской территории. В него входят: цифровые карты земель; цифровые паспорта полей; кадастровая информация; сведения о водных ресурсах; климатические данные; спутниковые снимки; данные датчиков; информация о сельскохозяйственной технике; данные о производстве и логистике. Данные становятся новым производственным ресурсом.

Третий уровень – интеллектуальная аналитика

Искусственный интеллект обеспечивает прогноз урожайности [27, 28]; диагностику заболеваний растений; прогнозирование засух; управление водными ресурсами; оптимизацию внесения удобрений; прогноз цен; анализ экспортных рынков; оценку климатических рисков [25, 26]. Таким образом осуществляется переход от реактивного управления к управлению на основе прогнозов.

Четвертый уровень – цифровые платформы

Все данные интегрируются в единую цифровую платформу. Она объединяет фермеров; кооперативы; перерабатывающие предприятия; логистические компании; банки; страховые организации; государственные органы; научные учреждения; образовательные организации. Платформа становится ядром цифровой экономики сельской территории, а цифровой двойник территории – её вычислительным представлением [29]. Устойчивость такой платформы определяется не только техническим сопряжением информационных систем, но и правилами обмена данными и механизмами согласования интересов участников, характерными для многосторонних платформ данных [24].

Пятый уровень – интеллектуальная экономика

В результате цифровой трансформации формируются новые виды экономической деятельности: агроданные как услуга; цифровой агроконсалтинг; роботизированное сельское хозяйство; интеллектуальная логистика; цифровая сертификация продукции; дистанционный мониторинг; экспортные цифровые платформы. Экономика начинает развиваться не только за счет производства продукции, но и за счет производства знаний и цифровых сервисов.

Шестой уровень – устойчивое развитие

Конечным результатом функционирования интеллектуальной сельской территории являются рост производительности труда; увеличение доходов населения; повышение занятости; снижение миграции; рациональное использование природных ресурсов; увеличение экспорта продукции; повышение качества жизни. Таким образом, цифровизация становится механизмом достижения устойчивого развития.

Основные принципы интеллектуальной сельской территории

Предлагаемая концепция базируется на четырёх принципах, не сводимых к описанной выше архитектуре и задающих правила её применения.

– Цифровизация оценивается по экономическому результату – приросту производительности, доходов, экспортной выручки и занятости, – а не по числу подключений и внедрённых сервисов.

– Данные территории рассматриваются как производственный ресурс, для которого установлены режим доступа, требования к качеству и процедура проверяемости.

– Государство переходит от управления объектами к управлению цифровыми экосистемами и правилами обмена данными между участниками.

– Интеллектуальная сельская территория обязана обеспечивать социальную устойчивость: создание рабочих мест и доступ к образованию, здравоохранению и государственным услугам.

Предлагаемая модель может быть использована не только в Казахстане, но и в других странах с обширными территориями, низкой плотностью населения и высоким потенциалом агропромышленного производства.

Intelligent Rural Territory Index (IRTI): методика оценки интеллектуального развития сельских территорий

Концепция индекса и его отличие от индексов семейства IDI

Для количественной оценки уровня интеллектуального развития сельских территорий предлагается индекс Intelligent Rural Territory Index (IRTI). Индекс предназначен для комплексной оценки эффективности цифровой трансформации сельских территорий и может использоваться для ранжирования сельских районов; оценки эффективности государственных программ; распределения бюджетных инвестиций; мониторинга достижения национальных целей устойчивого развития; оценки инвестиционной привлекательности сельских территорий.

Наиболее авторитетным международным инструментом измерения цифрового развития является индекс развития ИКТ (ICT Development Index, IDI) Международного союза электросвязи [1-3]. В редакции методологии 3.1 он объединяет десять показателей в два столпа – универсальную связность (Universal Connectivity) и содержательную связность (Meaningful Connectivity); показатели нормируются к фиксированным реперным значениям (goalposts) и агрегируются с равными весами по иерархической схеме [4]. Значение IDI для Казахстана составило 90,1 балла в выпуске 2024 года, 90,5 – в 2025 году и 93,0 – в 2026 году (столп Universal Connectivity – 92,6, Meaningful Connectivity – 93,5) при среднемировом уровне 79 баллов и среднем по региону СНГ 87 баллов [1-3].

Существенно, что МСЭ сознательно отказался от ранжирования стран: в соответствии с Резолюцией 131 (пересм. Бухарест, 2022) публикуются только баллы, поскольку рейтинговое представление «может усиливать восприятие конкуренции и вести к ошибочным выводам» [1, 5]. Процедура пересмотра методологии индекса также вынесена в отдельный регламентируемый процесс [42]. Настоящее исследование принимает обе эти нормы: во-первых, публикуемым результатом IRTI является не место в списке, а значение индекса вместе с интервалом рангов; во-вторых, любое изменение состава показателей и весов документируется отдельно и не применяется задним числом.

При этом семейство IDI решает иную задачу, чем та, что стоит перед настоящим исследованием. Различия носят принципиальный характер и определяют конструкцию IRTI.

– Единица наблюдения. IDI измеряет экономику страны в целом [1-4]; IRTI строится для субнациональной единицы – области, а в перспективе района, – где сосредоточена сельская экономика.

– Предмет измерения. IDI измеряет связность как таковую; IRTI измеряет способность территории конвертировать связность в производительность, доходы, экспорт и удержание населения.

– Форма агрегирования. IDI использует равновзвешенное аддитивное агрегирование [4], то есть является компенсаторным. IRTI использует некомпенсаторную геометрическую свёртку, при которой провал по любому блоку не возмещается остальными [31-36].

– Отношение к пропускам. IDI восполняет отсутствующие значения на этапе подготовки данных; IRTI не восполняет пропуски и не публикует индекс для единиц с недостаточной наблюдаемостью, публикуя вместо этого перечень таких единиц наравне с результатами.

Архитектура индекса IRTI

Индекс рассчитывается по шести взаимосвязанным измерениям (блокам), показанным на рисунке 2. Состав показателей ограничен девятнадцатью позициями: показатель включается в расчётный контур только при выполнении двух условий – наличии публикуемого источника с периодичностью не реже одного раза в год и наличии операционального определения, при котором два независимых исполнителя получат одно и то же значение. Всё, что этим условиям не удовлетворяет, вынесено в перспективный контур и в расчёт не входит. Блоки DI, SA, HC, ES и GI содержат по три показателя, блок EC – четыре. Полный реестр показателей с указанием направления действия, уровня агрегирования и канала источника приведён в таблице А.1, публикуемой как online-материал.



Рисунок 2 – Шесть измерений индекса IRTI и их показатели

Таблица 1 – Полосы интерпретации значений IRTI (квинтильное разбиение совокупности опубликованных значений)

Полоса	Квинтиль	Управленческая интерпретация
Территории-лидеры	V	Сбалансированный профиль по всем блокам; территории пригодны для тиражирования решений
Развитые территории	IV	Устойчивое развитие при одном ограничивающем блоке
Территории перехода	III	Смешанный профиль; результат чувствителен к выбору весов
Территории развития	II	Два и более блока в нижней части распределения
Территории приоритетной поддержки	I	Выраженная несбалансированность профиля; требуется адресная программа по ограничивающему блоку

Примечание: Полосы определяются по квинтилям фактического распределения опубликованных значений и пересчитываются при каждом полном расчёте; они характеризуют положение единицы внутри совокупности, а не уровень значения индекса. Единицы, для которых индекс не публикуется, в определении границ полос не участвуют.

Нормализация показателей

Показатели измеряются в несопоставимых единицах, поэтому перед агрегированием они приводятся к безразмерной шкале [0; 1] линейным преобразованием min-max [31, 32]. Для показателя прямого действия

$$\tilde{x}_{ij} = \frac{x_{ij} - min_j}{max_j - min_j} \quad (1)$$

для показателя обратного действия — с инверсией:

$$\tilde{x}_{ij} = 1 - \frac{x_{ij} - min_j}{max_j - min_j} \quad (2)$$

,где $\tilde{x}_{ij}$ – нормализованное значение j-го показателя для i-й территории; min_j и max_j – границы нормализации, зафиксированные при первом полном расчёте.

Две процедурные нормы существенны для сопоставимости во времени. Во-первых, границы нормализации фиксируются один раз и переиспользуются в последующие годы: если пересчитывать их ежегодно, динамика индекса будет отражать смену базы нормирования, а не изменение состояния территорий. Во-вторых, выбросы обрабатываются винзоризацией по 5-му и 95-му процентилям с полным протоколированием каждого изменённого значения, что предотвращает ситуацию, при которой одно аномальное наблюдение задаёт шкалу для всей совокупности [31, 33]. Следует различать два способа задания границ. Для показателей, имеющих естественные пределы, – долей и уровней, ограниченных интервалом [0; 1] (доступ к широкополосной связи, доля домохозяйств с Интернетом, уровень занятости, доля переработанной продукции, доля деградированных земель, доля государственных услуг в электронной форме, доля опубликованных наборов открытых данных, наблюдаемость), – принимаются содержательные реперные значения 0 и 1 по образцу goalposts методологии IDI [4]; такие границы не зависят от состава панели и обеспечивают сопоставимость между расчётами. Для показателей без естественного верхнего предела (урожайность, обеспеченность техникой, производительность труда, экспорт на душу населения, плотность субъектов малого и среднего бизнеса, водозабор, характеристики NDVI) границы задаются по минимуму и максимуму первой полной расчётной панели и фиксируются вместе с датой их установления. Для второй группы показателей регламент пересмотра границ при появлении значений за пределами исходного диапазона принимается заранее и публикуется вместе с методикой.

Свёртка внутри блока и между блоками

Внутри блока применяется аддитивная свёртка по фактически наблюдённым показателям:

$$B_{ik} = \frac{1}{|O_{ik}|} \sum_{j \in O_{ik}} \tilde{x}_{ij} \quad (3)$$

, где O_{ik} – множество показателей блока k, наблюдённых для территории i. Компенсаторность внутри блока допустима: показатели одного блока измеряют одно и то же явление разными способами и в этом смысле взаимозаменяемы.

Между блоками компенсаторность недопустима. Общепринятая аддитивная форма

$$IRTI_i^{add} = \sum_{k=1}^{K} w_k B_{ik} \quad (4)$$

позволяет территории с развитой связью, но деградирующим сельским хозяйством получить тот же балл, что и территории со сбалансированным профилем. Содержательно это неверно: цифровая инфраструктура при отсутствии производства не создаёт добавленной стоимости. Поэтому основной формой индекса принимается взвешенное геометрическое среднее [34–36]:

$$IRTI_i = \prod_{k=1}^{K} [max(B_{ik}, \varepsilon)]^{w_k}, \quad \sum_{k=1}^{K} w_k = 1 \quad (5)$$

, где ε – нижняя отсечка, ограничивающая штраф за полностью проваленный блок (базовое значение ε = 0,01), а w_k – веса блоков. Геометрическая свёртка обладает свойством некомпенсаторности: предельная норма замещения между блоками зависит от достигнутых уровней, и чем ниже блок, тем дороже обходится его дальнейшее снижение. Именно это свойство обосновано в литературе по композитным индикаторам как условие корректного ранжирования разнородных единиц [34, 35]. Величина ε не является технической деталью: при равных весах блок с нулевой оценкой умножает итоговое значение индекса не на нуль, а на ε в степени 1/6, то есть на 0,316 при ε = 0,001, на 0,464 при ε = 0,01 и на 0,607 при ε = 0,05.

Тем самым ε задаёт максимальную величину штрафа, и её выбор требует содержательного обоснования. Базовое значение ε = 0,01 принято как уровень, ниже которого блок считается не выполняющим свою функцию: он соответствует предельному штрафу примерно в два с половиной раза относительно сбалансированного профиля и сохраняет различимость единиц с одним проваленным блоком между собой. Чувствительность результата к ε проверяется в обязательном порядке и публикуется вместе с расчётом.

Некомпенсаторная форма не лишает результат управленческой интерпретируемости: логарифмирование восстанавливает аддитивность вкладов

$$ln\, IRTI_i = \sum_{k=1}^{K} w_k \, ln\, B_{ik} \quad (6)$$

, что позволяет разложить итоговое значение на слагаемые по блокам и указать, какой именно блок ограничивает территорию.

В базовом режиме веса приняты равными (w_k = 1/6). При отсутствии обоснованной иерархии блоков равное взвешивание нейтрально; любой иной набор требует раскрытия процедуры. В частности, применение метода анализа иерархий [38] допускается только при одновременном выполнении четырёх условий: раскрыт состав экспертной панели с областями компетенции; приложена полная матрица парных сравнений; коэффициент согласованности CR < 0,10; описана процедура агрегирования индивидуальных суждений. До выполнения этих условий веса, объявленные «экспертными», в расчёт не принимаются.

Политика пропусков и наблюдаемость

Пропуски не восполняются средними значениями. Подстановка среднего систематически завышает оценку наименее наблюдаемых территорий – то есть именно тех, где точность оценки наиболее важна для распределения поддержки.

Блок считается наблюдаемым, если по нему наблюдено не менее двух показателей и охват составляет не менее 0,5 (неравенство нестрогое). Для блоков из трёх показателей оба условия совпадают; для блока EC из четырёх показателей они расходятся, и два наблюдённых показателя из четырёх дают охват ровно 0,5 – такой блок признаётся наблюдаемым. Правило вида «доля пропусков в блоке до 20%» для блоков из трёх показателей неработоспособно: один пропуск даёт 33%, и при геометрической свёртке любой единичный пропуск обнулял бы индекс целиком. Если хотя бы один блок признан ненаблюдаемым, индекс для данной территории не публикуется, а сама территория включается в публикуемый перечень непубликуемых единиц. Доля фактически наблюдаемых показателей вынесена в отдельный показатель GI_observability: наблюдаемость территории рассматривается как характеристика качества управления, а не как техническая деталь.

Интерпретация значений

До получения первого полного расчёта на реальных данных абсолютные пороговые значения индекса эмпирически не обоснованы, поэтому основной схемой категоризации приняты квинтили фактического распределения (таблица 1). Полосы представляют собой разбиение совокупности, а не абсолютную шкалу значений: принадлежность территории к полосе зависит от состава панели, а при малом числе единиц границы полос определяются положением отдельных наблюдений. Следствие этого свойства видно и на используемой синтетической панели: единицы со значениями 0,477 и 0,192 попадают в одну полосу, хотя разрыв между ними больше, чем весь разброс девяти верхних единиц. Поэтому полосы публикуются только вместе со значением индекса и интервалом рангов и не используются для сравнения между годами. Переход к абсолютной шкале возможен после накопления ряда наблюдений на реальных данных.

Вычислительный протокол и его апробация

Состав протокола

Методика реализована в виде воспроизводимого вычислительного протокола (рис. 3). Протокол включает шесть последовательных шагов расчёта и два блока проверок. Каждый прогон формирует манифест воспроизводимости: SHA-256 всех входных файлов и конфигураций, метку времени UTC, применённый набор весов, значение ε, параметры олитики пропусков, число опубликованных и снятых с публикации единиц. Результат без манифеста считается невоспроизводимым и не публикуется.



Рисунок 3 – Вычислительный протокол IRTI: шаги расчёта, схема Монте-Карло и проверки устойчивости

Информационная система расчёта индекса

Протокол реализован в виде модульной информационной системы, состоящей из пяти компонентов: модуля сбора и загрузки данных, модуля нормализации и контроля качества, расчётного ядра, модуля анализа устойчивости и модуля публикации результатов. Разделение на модули задано границами ответственности: изменение источника данных не затрагивает расчётное ядро, а изменение формы свёртки не затрагивает слой загрузки.

Модуль сбора данных получает исходные значения по четырём каналам: наборы Бюро национальной статистики и портала открытых данных data.egov.kz (выгрузка в форматах CSV и XLSX, при наличии – через программный интерфейс); ведомственная отчётность операторов связи и Министерства сельского хозяйства в виде структурированных табличных форм; зональная статистика по растрам дистанционного зондирования (GeoTIFF, агрегирование значений по границам сельскохозяйственных угодий административной единицы); производные показатели, вычисляемые самой системой. Каждая загрузка сохраняется без изменений в неизменяемом хранилище исходных данных с указанием источника, даты выгрузки и контрольной суммы SHA-256; все последующие преобразования выполняются над копией, что делает любой опубликованный результат прослеживаемым до исходного файла.

Модуль нормализации приводит записи к единой схеме «единица наблюдения – год – код показателя – значение – признак наблюдаемости», выполняет контроль типов и допустимых диапазонов, протоколирует винзоризацию и применяет зафиксированные границы нормализации по формулам (1) и (2). Входными параметрами расчётного ядра служат нормализованная матрица показателей, конфигурация блоков, вектор весов и значение ε; выходными – вектор значений индекса, разложение по блокам согласно формуле (6), перечень единиц, снятых с публикации, и указание ограничивающего блока для каждой опубликованной единицы.

Модуль анализа устойчивости выполняет прогон Монте-Карло по распределению Дирихле и формирует медианный ранг и интервал рангов, а также проверки чувствительности к значению ε и к форме свёртки. Модуль публикации формирует выходные таблицы и манифест воспроизводимости – машиночитаемый файл, содержащий контрольные суммы всех входных файлов и конфигураций, метку времени UTC, применённый набор весов, значение ε, параметры политики пропусков, начальное значение генератора псевдослучайных чисел, число опубликованных и снятых с публикации единиц и версию программного кода. Расчёт без манифеста не публикуется.

Регламент обновления предполагает годовой цикл: ежегодный пересчёт при неизменных границах нормализации и неизменном составе показателей; отдельно документируемый пересмотр методики с указанием версии и даты введения; отсутствие пересчёта ранее опубликованных значений задним числом. Сопряжение с внешними системами реализуется через тот же слой загрузки: интерфейсы к системам ведомственного мониторинга, к сервисам зональной статистики по данным дистанционного зондирования и к цифровому двойнику территории, для которого индекс и его поблочное разложение

выступают агрегированной характеристикой состояния, а сценарные расчёты двойника — источником прогнозных значений отдельных показателей.

Ранжирование методом Монте-Карло

Точечное ранжирование территорий по композитному индексу вводит в заблуждение: оно предъявляет читателю один порядок, тогда как этот порядок зависит от набора весов, выбранного исследователем. Поэтому ранжирование в настоящей работе выполняется не при одном наборе весов, а по распределению весов [33, 36].

Вектор весов моделируется распределением Дирихле с центром в равных весах:

$$w^{(m)} \sim Dir(\alpha), \quad \alpha_k = \frac{c}{K}, \quad m = 1, \dots, M \tag{7}$$

, где K = 6 – число блоков, c – параметр концентрации (принято c = 20), M – число реализаций. Чем меньше c, тем шире исследуемое пространство весов. Для каждой реализации $w^{(m)}$ индекс пересчитывается по формуле (5), территории упорядочиваются, и фиксируется ранг каждой территории. Публикуемыми характеристиками являются медианный ранг и интервал рангов между 5-м и 95-м процентилями:

$$R_i^{med} = med_m \, rank\left(IRTI_i\left(w^{(m)}\right)\right), \quad \left[R_i^{0,05};\, R_i^{0,95}\right] \tag{8}$$

Территория считается устойчиво ранжированной, если размах интервала рангов не превышает двух позиций. Результат, устойчивый только при одном наборе весов, публикуется с явной пометкой о неустойчивости.

Число реализаций принято равным M = 100 000, начальное значение генератора псевдослучайных чисел зафиксировано и записано в манифест, что делает результат в точности воспроизводимым. Расчёт индекса и полный прогон Монте-Карло для 17 единиц занимают секунды на персональном компьютере; вычислительные ресурсы высокопроизводительного кластера требуются только для зональной статистики по растрам дистанционного зондирования при переходе к районному уровню.

Условия проверки программной реализации

Важное ограничение. Приводимые ниже результаты являются проверкой программной реализации вычислительного протокола, а не рейтингом областей Республики Казахстан. Расчёт выполнен на синтетической панели, воспроизводящей размерность задачи (17 единиц, 19 показателей, около 8% случайных пропусков) и содержащей пять единиц с несбалансированным профилем – высокая цифровая инфраструктура при слабом сельском хозяйстве, – из них три с выраженным дисбалансом. Назначение проверки – убедиться, что реализация отрабатывает заявленные свойства: некомпенсаторность свёртки, политику пропусков и устойчивость рангов. Поскольку порождающий процесс синтетической панели известен, воспроизведение этих свойств подтверждает корректность реализации, но не является эмпирическим свидетельством в пользу конструкции индекса. Содержательная интерпретация конкретных значений и мест применительно к реальным областям недопустима; полный расчёт на данных Бюро национальной статистики и портала открытых данных станет предметом следующей публикации.

Наименования областей сохранены в таблицах и на рисунках исключительно как метки единиц наблюдения, обеспечивающие сопоставимость структуры выходных таблиц с будущим расчётом на реальных данных.

Результаты проверки программной реализации

При заявленной политике пропусков индекс опубликован для 14 из 17 единиц (табл. 2). Три единицы сняты с публикации: по каждой из них хотя бы один блок не набрал двух наблюдённых показателей. Это ожидаемое поведение протокола: при геометрической свёртке публикация индекса по частично наблюдаемой единице означала бы неявную подстановку недостающих значений.

Ранжирование методом Монте-Карло показано на рисунке 4. Из четырнадцати опубликованных единиц восемь имеют устойчивый ранг, шесть – неустойчивый. Неустойчивость распределена не случайно: пять из шести неустойчиво ранжированных единиц имеют несбалансированный профиль, у которых порядок определяется тем, какому блоку исследователь придаст больший вес. Шестая неустойчивая единица (№ 7) сбалансирована, но расположена в плотной части распределения, где три соседних значения

индекса различаются менее чем на 0,03, и небольшое изменение весов меняет их порядок. Точечный рейтинг скрыл бы оба обстоятельства полностью.

Таблица 2 – Результаты проверки программной реализации протокола IRTI на синтетической панели: значения индекса и ранжирование методом Монте-Карло (100 000 реализаций весов)

№	Единица наблюдения	IRTI (геом.)	IRTI (аддит.)	Медианный ранг	Интервал рангов 5-95%	Полоса
1	Павлодарская	0,695	0,741	1	1-1	Территории-лидеры
2	Жамбылская	0,615	0,624	2	2-2	Территории-лидеры
3	Туркестанская	0,592	0,606	3	3-4	Территории-лидеры
4	Актюбинская	0,578	0,593	4	3-5	Развитые территории
5	область Абай	0,564	0,575	5	5-6	Развитые территории
6	Западно-Казахстанская	0,552	0,555	6	4-6	Развитые территории
7	область Ұлытау	0,507	0,536	7	6-9*	Территории перехода
8	Алматинская	0,503	0,511	8	7-9	Территории перехода
9	Карагандинская	0,477	0,481	9	7-9	Территории развития
10	Акмолинская	0,192	0,301	10	10-13*	Территории развития
11	Атырауская	0,181	0,372	12	10-14*	Территории развития
12	Восточно-Казахстанская	0,168	0,274	12	11-14*	Территории приоритетной поддержки
13	Мангистауская	0,153	0,346	13	10-14*	Территории приоритетной поддержки
14	Кызылординская	0,135	0,405	14	11-14*	Территории приоритетной поддержки

Примечание: Медианный ранг вычисляется независимо для каждой единицы по 100 000 реализациям весов, поэтому медианы разных единиц могут совпадать, а отдельные значения ранга – не встречаться ни у одной единицы: в настоящем расчёте медианный ранг 12 получен для двух единиц, а ранг 11 не получен ни для одной. Совпадения не разрешаются принудительно, поскольку порядок единиц задаётся значением индекса, а публикуемой характеристикой служит интервал рангов, а не место в списке. Звёздочкой отмечены единицы, ранг которых неустойчив к выбору весов, то есть размах интервала рангов превышает две позиции.

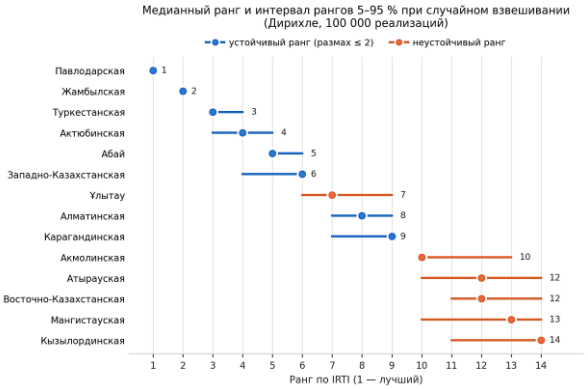


Рисунок 4 – Медианный ранг и интервал рангов 5-95 % при случайном взвешивании блоков (распределение Дирихле, 100 000 реализаций)

Профили единиц по блокам приведены на рисунке А.1, публикуемом как online-материал. Тепловая карта делает видимой структуру, которую итоговое число неизбежно скрывает: единицы в нижней части таблицы имеют не равномерно низкие оценки, а резко несбалансированные – высокая цифровая инфраструктура при близких к нулю оценках интеллектуального сельского хозяйства и экономической результативности.

Проверка свойств свёртки

Сопоставление аддитивной и геометрической форм (рис. 5) даёт прямую проверку заявленного свойства некомпенсаторности. Ранговая корреляция Спирмена между двумя

формами составила ρ = 0,934 при p = 1,0·10⁻⁶ (n = 14) – то есть по значениям формы близки. Однако сама по себе корреляция значений здесь малоинформативна: содержательный эффект проявляется не в общем порядке, а в адресном штрафе. У девяти сбалансированных единиц разность между аддитивной и геометрической оценками не превышает 0,05 (максимум 0,046), тогда как у пяти единиц с несбалансированным профилем она составляет от 0,106 до 0,270, причём у трёх наиболее несбалансированных – от 0,191 до 0,270, что соответствует потере нескольких позиций в ранжировании. Иными словами, геометрическая свёртка делает ровно то, ради чего она вводится, – наказывает несбалансированность профиля пропорционально её выраженности, не переупорядочивая при этом сбалансированную часть совокупности.

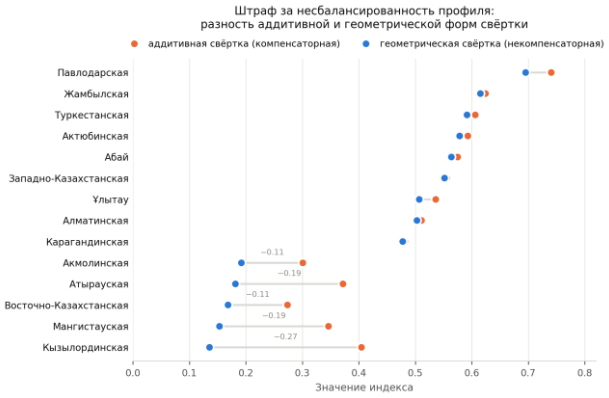


Рисунок 5 – Штраф за несбалансированность профиля: сопоставление аддитивной и геометрической форм свёртки

Это наблюдение имеет методологическое следствие для формулировки проверяемых следствий модели. Первоначально предполагалось считать некомпенсаторность подтверждённой при ρ < 0,90; проверка показывает, что такой порог слишком жёсток и при работающем механизме приводит к формальному «неподтверждению». Информативной статистикой является не корреляция значений, а максимальное смещение ранга у единиц с несбалансированным профилем, и именно она принимается в качестве критерия.

Результаты остальных проверок устойчивости сведены в таблице 3.

Таблица 3 – Сводка проверок устойчивости результатов

Проверка	Статистика	Значение	Вывод
Устойчивость рангов к весам	Число единиц с размахом интервала рангов более двух позиций	6 из 14	Публикуются с пометкой о неустойчивости
Форма свёртки	Ранговая корреляция Спирмена между аддитивной и геометрической формами	ρ = 0,934; p = 1,0·10⁻⁶ (n = 14)	Порядок сохраняется; штраф адресный
Форма свёртки	Разность значений у пяти несбалансированных единиц	0,106–0,270	Некомпенсаторность работает
Чувствительность к ε	Максимальное смещение ранга и множитель штрафа за нулевой блок при ε = 0,001 / 0,01 / 0,05	2 позиции; 0,316 / 0,464 / 0,607	Порядок устойчив, значение индекса чувствительно
Наблюдаемость	Корреляция наблюдаемости с прочими блоками	ρ = −0,353; p = 0,164 (n = 17)	Мощность недостаточна для вывода

Примечание: Все проверки выполнены на той же синтетической панели, что и таблица 2. Проверки формы свёртки и устойчивости рангов выполнены по 14 опубликованным единицам, проверка связи наблюдаемости – по всем 17 единицам панели, поскольку различия в наблюдаемости проявляются именно на снятых с публикации единицах. Проверка связи наблюдаемости с прочими блоками на синтетических данных не имеет содержательного смысла и приведена для полноты протокола; кроме того, при n = 17 мощность недостаточна для вывода о наличии или отсутствии связи, и её результат подлежит перепроверке на реальных данных.

Ограничения исследования

Прозрачное перечисление ограничений является частью предлагаемой методики, а не оговоркой к ней.

Ограничение данных. Приведённые числовые результаты получены на синтетической панели и не являются оценкой реальных областей. Готовность источников для полного расчёта неоднородна. Показатели блоков социальной устойчивости, экологической устойчивости и качества управления, а также большая часть показателей блоков цифровой инфраструктуры и экономической результативности формируются из открытых источников – наборов Бюро национальной статистики, портала data.egov.kz, баланса земель Министерства сельского хозяйства [6, 7, 41] и материалов дистанционного зондирования [25, 26]; препятствием здесь является трудоёмкость ручной выгрузки, поскольку аналитическая система Taldau закрыта для автоматического доступа. Данные о покрытии сетями 4G+ по площади сельской территории не публикуются в открытых источниках и требуют ведомственного запроса. Итоги национальной сельскохозяйственной переписи 2025 года, закрывающие блоки SA и EC на районном уровне, на момент подготовки статьи опубликованы только в части показателей охвата [39, 40]. Отдельным ограничением является проверяемость исходных данных: часть показателей поступает из ведомственных и корпоративных источников, для которых требуется процедура выборочного аудита, аналогичная риск-ориентированным схемам верификации в цепочках поставок [30].

Ограничение уровня агрегирования. Областной уровень слишком груб для управленческих решений: внутри одной области различия между районами могут превышать различия между областями. Переход к районному уровню (около 170 единиц) является необходимым условием практического применения индекса и заблокирован публикацией итогов переписи, а не готовностью методики.

Ограничение весов. Базовый режим равных весов нейтрален, но не обоснован содержательно. Обоснованная иерархия блоков требует полноценной процедуры экспертного оценивания с раскрытием матрицы парных сравнений и коэффициента согласованности [38]; до её проведения любые «экспертные» веса были бы произвольными. Ранжирование методом Монте-Карло частично компенсирует это ограничение, показывая, какие выводы устойчивы к выбору весов, а какие нет.

Ограничение пороговых значений. Абсолютная шкала интерпретации до первого полного расчёта эмпирически не откалибрована; используются квинтили фактического распределения, которые по построению не позволяют сравнивать уровни между годами. Переход к абсолютной шкале возможен только после накопления ряда наблюдений.

Ограничение сопоставимости. Фиксация границ нормализации обеспечивает сопоставимость во времени, но делает индекс уязвимым к появлению значений за пределами исходного диапазона. Регламент пересмотра границ должен быть принят заранее и опубликован, по аналогии с процедурой пересмотра методологии IDI [42].

Ограничение винзоризации. Правило обработки выбросов по 5-му и 95-му процентилям чувствительно к объёму совокупности. На панели из 17 единиц оно затрагивает менее одного наблюдения с каждой стороны и практически не работает, тогда как при переходе к районному уровню (около 170 единиц) оно будет заменять примерно по восемь значений с каждой стороны. Пороги винзоризации должны быть привязаны к объёму совокупности и зафиксированы отдельно для областного и районного уровней.

Ограничение, связанное со стимулами отчётности. Внутриблочная свёртка выполняется по фактически наблюдённым показателям (формула 3), а блок сохраняет статус наблюдаемого при двух показателях из трёх. Отсюда следует измеримый стимул: территория, у которой не опубликован именно худший показатель блока, получает более высокую оценку блока и, следовательно, более высокое значение индекса. Показатель GI_observability частично противодействует этому, но его вес в итоговой конструкции составляет около 1/18, и он одновременно выступает критерием фильтрации единиц и оцениваемым показателем, что делает его защитную роль ограниченной. Для индекса, предназначенного в том числе для распределения бюджетных инвестиций, это существенно: до расчёта на реальных данных необходимо предусмотреть контроль пропусков не только по их доле, но и по систематичности – сопоставление состава пропущенных показателей между годами и между

территориями, а также проверку того, не концентрируются ли пропуски на показателях с заведомо низкими значениями.

Заключение

В работе предложена концепция интеллектуальной сельской территории (Intelligent Rural Territory) как модели пространственного развития, в которой сельская территория рассматривается не как объект государственной поддержки, а как интеллектуальная производственная система. Разработана шестиуровневая архитектура такой территории, связывающая цифровую инфраструктуру, данные, интеллектуальную аналитику, платформы, новые виды экономической деятельности и результаты устойчивого развития двумя встречными потоками – восходящим потоком данных и нисходящим контуром управления.

Для количественной оценки предложен индекс IRTI, объединяющий цифровую инфраструктуру, интеллектуальное сельское хозяйство, экономическую результативность, человеческий капитал, экологическую устойчивость и качество управления. Индекс отличается от международных индексов цифрового развития семейства IDI [1-5] тремя конструктивными решениями: субнациональной единицей наблюдения; измерением не связности как таковой, а способности территории конвертировать связность в экономический и социальный результат; и, главное, некомпенсаторной геометрической свёрткой, при которой провал по любому блоку не возмещается успехом по остальным [34-36].

Методика доведена до воспроизводимого вычислительного протокола с фиксацией границ нормализации, протоколированием винзоризации, явной политикой пропусков и манифестом воспроизводимости для каждого прогона. Ранжирование выполняется не при одном наборе весов, а по распределению Дирихле в 100 000 реализаций, что позволяет публиковать медианный ранг вместе с интервалом рангов и открыто указывать единицы, порядок которых к выбору весов неустойчив.

Проверка программной реализации протокола на синтетической панели воспроизвела заявленные свойства. Некомпенсаторная свёртка накладывает адресный штраф на территории с несбалансированным профилем (разность с аддитивной формой от 0,106 до 0,270 против максимум 0,046 у сбалансированных единиц), не переупорядочивая при этом сбалансированную часть совокупности. Политика пропусков отрабатывает как проектировалось, снимая с публикации единицы с недостаточно наблюдаемыми блоками вместо неявной подстановки недостающих значений. Анализ чувствительности показал, что шесть из четырнадцати опубликованных рангов неустойчивы к выбору весов, – обстоятельство, которое точечный рейтинг скрыл бы полностью. Поскольку порождающий процесс синтетической панели известен, эти результаты свидетельствуют о корректности реализации протокола и не заменяют эмпирической проверки на реальных данных.

Проверка выявила и два дефекта первоначального протокола, исправленных в настоящей редакции. Правило «доля пропусков в блоке до 20 %» оказалось неработоспособным для блоков из трёх показателей и заменено правилом «не менее двух наблюдённых показателей и охват не ниже 0,5». Критерий некомпенсаторности через ранговую корреляцию $\rho < 0{,}90$ оказался слишком жёстким и заменён максимальным смещением ранга у несбалансированных единиц. Оба исправления получены именно потому, что протокол был реализован и прогнан, а не описан словесно; это подтверждает практическую ценность требования исполнимости методики.

Перспективы дальнейших исследований

Первое и наиболее приоритетное направление – расчёт индекса на реальных данных. Как показано в разделе ограничений, для тринадцати из девятнадцати показателей источники открыты уже сейчас, поэтому работа начинается не с ожидания ведомственных данных, а с ядра вычислимых показателей: композиты NDVI и границы административных единиц дают блоки SA и ES средствами дистанционного зондирования, наборы Бюро национальной статистики и портала открытых данных – блоки HC и GI. Остальные показатели досчитываются к этому ядру по мере открытия источников; единицы, по которым хотя бы один блок остаётся ненаблюдаемым, публикуются в перечне непубликуемых, а не достраиваются подстановками.

Второе направление – переход к районному уровню (около 170 единиц). Он требует зональной статистики по растрам дистанционного зондирования в равновеликой проекции и

станет возможным после публикации содержательных итогов национальной сельскохозяйственной переписи 2025 года [39, 40]. Именно на районном уровне индекс приобретает управленческий смысл: адресность программ поддержки определяется на этом масштабе.

Третье направление – обоснование весов блоков. Планируется проведение полноценной процедуры экспертного оценивания с раскрытием состава панели, матрицы парных сравнений и коэффициента согласованности [38], а также сопоставление экспертных весов с весами, полученными методом энтропии и факторным анализом, с последующей проверкой устойчивости выводов ко всем трём наборам средствами той же схемы Монте-Карло.

Четвёртое направление – построение временного ряда индекса и переход от квинтильной категоризации к абсолютной шкале, откалиброванной эмпирически. Это позволит перейти от сравнения территорий между собой к оценке динамики каждой территории относительно собственного прошлого состояния – постановке, существенно более пригодной для оценки эффективности государственных программ.

Пятое направление – расширение показателя площадного охвата интеллектуальными технологиями. В отличие от индексов, считающих проекты и населённые пункты, показатель доли сельскохозяйственных угодий, охваченных цифровым мониторингом, методологически корректен именно для страны с площадью используемого земельного фонда 262,9 млн га и низкой плотностью населения [6, 7], и вычислим средствами дистанционного зондирования без ведомственной отчётности.

Шестое направление – верификация прогнозной способности индекса: проверка того, предсказывают ли значения IRTI и структура его блочных вкладов последующую динамику производительности труда, экспорта продукции агропромышленного комплекса и миграционного сальдо сельского населения. Положительный результат такой проверки превратит индекс из инструмента описания в инструмент раннего предупреждения, что и является конечной целью разработки.

Наконец, предложенная модель по построению не является страновой. Страны с обширной территорией, низкой плотностью населения и высокой ролью агропромышленного комплекса – Монголия, Австралия, отдельные регионы Российской Федерации, страны Центральной Азии – сталкиваются с теми же ограничениями европейских моделей Smart Village. Апробация IRTI на их данных представляется естественным продолжением работы и одновременно внешней проверкой переносимости методики.

Список литературы

1. Measuring digital development: The ICT Development Index 2026. – Geneva: International Telecommunication Union, 2026. URL: https://www.itu.int/itu-d/reports/statistics/idi2026/.
2. Measuring digital development: The ICT Development Index 2025. – Geneva: International Telecommunication Union, 2025. https://www.itu.int/hub/publication/d-ind-ict_mdd-2025-1/.
3. Measuring digital development: The ICT Development Index 2024. – Geneva: International Telecommunication Union, 2024. https://www.itu.int/hub/publication/d-ind-ict_mdd-2024-3/.
4. Methodology of the ICT Development Index: Version 3.1. – Geneva: International Telecommunication Union, October 2023. https://www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/Documents/IDI/IDI_2023_Version3_1_Oct2023.pdf.
5. The ICT Development Index (IDI) [офиц. страница статистики]. – International Telecommunication Union, Telecommunication Development Bureau. https://www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/Pages/IDI/default.aspx (панель данных: https://datahub.itu.int/dashboards/idi/) (дата обращения: 15.05.2026).
6. Сводный аналитический отчет о состоянии и использовании земель Республики Казахстан за 2024 год. – Астана: Министерство сельского хозяйства Республики Казахстан, Комитет по управлению земельными ресурсами, 2025. – Данные на 1 ноября 2024 г.
7. Сводный аналитический отчет о состоянии и использовании земель Республики Казахстан за 2023 год. – Астана: Министерство сельского хозяйства Республики Казахстан, 2024. – Данные на 1 ноября 2023 г.
8. Об утверждении Концепции цифровой трансформации, развития отрасли информационно-коммуникационных технологий и кибербезопасности на 2023-2029 годы: постановление

Правительства Республики Казахстан от 28 марта 2023 года № 269. https://adilet.zan.kz/rus/docs/P2300000269 (дата обращения: 15.05.2026).
9. Об утверждении Государственной программы «Цифровой Казахстан»: постановление Правительства Республики Казахстан от 12 декабря 2017 года № 827. https://adilet.zan.kz/rus/docs/P1700000827 (дата обращения: 15.05.2026).
10. Zavratnik V. Smart Villages: Comprehensive Review of Initiatives and Practices / V. Zavratnik, A. Kos, E. Stojmenova Duh // Sustainability. – 2018. – Vol. 10, № 7. – Art. 2559. https://doi.org/10.3390/su10072559.
11. Visvizi A. It's Not a Fad: Smart Cities and Smart Villages Research in European and Global Contexts / A. Visvizi, M.D. Lytras // Sustainability. – 2018. – Vol. 10, № 8. – Art. 2727. https://doi.org/10.3390/su10082727.
12. Wolski O. Smart Villages Revisited: Conceptual Background and New Challenges at the Local Level / O. Wolski, M. Wójcik // Smart Villages in the EU and Beyond. – Bingley: Emerald Publishing, 2019. – P. 29-48. https://doi.org/10.1108/978-1-78769-845-120191004.
13. Adamowicz M. The «Smart Village» as a Way to Achieve Sustainable Development in Rural Areas of Poland / M. Adamowicz, M. Zwolińska-Ligaj // Sustainability. – 2020. – Vol. 12, № 16. – Art. 6503. https://doi.org/10.3390/su12166503.
14. The Use of IoT Technology in Smart Cities and Smart Villages: Similarities, Differences, and Future Prospects / N. Cvar et al // Sensors. – 2020. – Vol. 20, № 14. – Art. 3897. https://doi.org/10.3390/s20143897.
15. Komorowski Ł. Smart Villages: Where Can They Happen? / Ł. Komorowski, M. Stanny // Land. – 2020. – Vol. 9, № 5. – Art. 151. https://doi.org/10.3390/land9050151.
16. Smart Villages Policies: Past, Present and Future / S. Stojanova et al // Sustainability. – 2021. – Vol. 13, № 4. – Art. 1663. https://doi.org/10.3390/su13041663.
17. Territorial and Human Geography Challenges: How Can Smart Villages Support Rural Development and Population Inclusion? / E. Anastasiou et al // Social Sciences. – 2021. – Vol. 10, № 6. – Art. 193. https://doi.org/10.3390/socsci10060193.
18. Gerli P. What makes a smart village smart? A review of the literature / P. Gerli, J. Navio Marco, J. Whalley // Transforming Government: People, Process and Policy. – 2022. – Vol. 16, № 3. – P. 292-304. https://doi.org/10.1108/TG-07-2021-0126.
19. Increased Attention to Smart Development in Rural Areas: A Scientometric Analysis of Smart Village Research / Q. Wang et al // Land. – 2022. – Vol. 11, № 8. – Art. 1362. https://doi.org/10.3390/land11081362.
20. EU action for Smart Villages. – Brussels: European Commission, DG AGRI, 2017. https://ec.europa.eu/newsroom/agri/items/58296/en (дата обращения: 15.08.2026).
21. Comprehensive evaluation of digital village development in the context of rural revitalization: A case study from Jiangxi Province of China / H. Liu et al // PLOS ONE. – 2024. – Vol. 19, № 5. – Art. e0303847. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0303847.
22. Deng J. The Impact of Digital Rural Construction on Rural Revitalization — Empirical Evidence from Chinese County Panel Data / J. Deng, X. Li, N. Zhang // Agriculture. – 2024. – Vol. 14, № 11. – Art. 1903. https://doi.org/10.3390/agriculture14111903.
23. Has Digital Village Construction Narrowed the Urban–Rural Income Gap: Evidence from Chinese Counties / Y. Liu et al // Sustainability. – 2024. – Vol. 16, № 13. – Art. 5330. https://doi.org/10.3390/su16135330.
24. Otto B. Designing a multi-sided data platform: findings from the International Data Spaces case / B. Otto, M. Jarke // Electronic Markets. – 2019. – Vol. 29, № 4. – P. 561-580. https://doi.org/10.1007/s12525-019-00362-x.
25. Weiss M. Remote sensing for agricultural applications: A meta-review / M. Weiss, F. Jacob, G. Duveiller // Remote Sensing of Environment. – 2020. – Vol. 236. – Art. 111402. https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111402.
26. A global systematic review of the remote sensing vegetation indices / K. Yan et al // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2025. – Vol. 139. – Art. 104560. https://doi.org/10.1016/j.jag.2025.104560.

27. van Klompenburg T. Crop yield prediction using machine learning: A systematic literature review / T. van Klompenburg, A. Kassahun, C. Catal // Computers and Electronics in Agriculture. – 2020. – Vol. 177. – Art. 105709. https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105709.
28. Machine Learning in Agriculture: A Review / K.G. Liakos et al // Sensors. – 2018. – Vol. 18, № 8. – Art. 2674. https://doi.org/10.3390/s18082674.
29. Digital twins in smart farming / C. Verdouw et al // Agricultural Systems. – 2021. – Vol. 189. – Art. 103046. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.103046.
30. Kremenchutskiy A. A Risk-Triggered Hybrid Assurance Framework Integrating Digital Traceability, AI-Based Monitoring, and Selective Laboratory Audits for Organic Supply Chains / A. Kremenchutskiy // Natural and Engineering Sciences. – 2026. – Vol. 11, Iss. 2. – P. 211-224. https://doi.org/10.28978/nesciences.262019
31. Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and User Guide. – Paris: OECD Publishing; European Commission, Joint Research Centre, 2008. https://doi.org/10.1787/9789264043466-en.
32. Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and User Guide / M. Nardo et al // OECD Statistics Working Papers. – 2005. – № 2005/03. https://doi.org/10.1787/533411815016.
33. Saisana M. Uncertainty and sensitivity analysis techniques as tools for the quality assessment of composite indicators / M. Saisana, A. Saltelli, S. Tarantola // Journal of the Royal Statistical Society: Series A. – 2005. – Vol. 168, № 2. – P. 307-323. https://doi.org/10.1111/j.1467-985X.2005.00350.x.
34. Munda G. Noncompensatory/nonlinear composite indicators for ranking countries: a defensible setting / G. Munda, M. Nardo // Applied Economics. – 2009. – Vol. 41, № 12. – P. 1513-1523. https://doi.org/10.1080/00036840601019364.
35. Munda G. Social Multi-Criteria Evaluation for a Sustainable Economy / G. Munda. – Berlin; Heidelberg: Springer, 2008. https://doi.org/10.1007/978-3-540-73703-2.
36. On the Methodological Framework of Composite Indices: A Review of the Issues of Weighting, Aggregation, and Robustness / S. Greco et al // Social Indicators Research. – 2019. – Vol. 141, № 1. – P. 61-94. https://doi.org/10.1007/s11205-017-1832-9.
37. van der Burg S. Trust in farm data sharing: reflections on the EU code of conduct for agricultural data sharing / S. van der Burg, L. Wiseman, J. Krkeljas // Ethics and Information Technology. – 2021. – Vol. 23, № 3. – P. 185-198. https://doi.org/10.1007/s10676-020-09543-1.
38. Saaty T.L. Decision making with the analytic hierarchy process / T.L. Saaty // International Journal of Services Sciences. – 2008. – Vol. 1, № 1. – P. 83-98. https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590.
39. О проведении национальной сельскохозяйственной переписи Республики Казахстан в 2025 году: постановление Правительства Республики Казахстан от 29 декабря 2023 года № 1248. https://adilet.zan.kz/rus/docs/P2300001248 (дата обращения: 15.05.2026).
40. Национальная сельскохозяйственная перепись 2025 года [офиц. раздел]. – Астана: Бюро национальной статистики Агентства по стратегическому планированию и реформам Республики Казахстан. https://stat.gov.kz/ru/national/agriculture2025/ (дата обращения: 15.05.2026).
41. Статистика сельского, лесного, охотничьего и рыбного хозяйства [офиц. раздел]. – Астана: Бюро национальной статистики Агентства по стратегическому планированию и реформам Республики Казахстан. https://stat.gov.kz/ru/industries/business-statistics/stat-forrest-village-hunt-fish/ (дата обращения: 15.05.2026)
42. Process for revising the ICT Development Index methodology. – Geneva: International Telecommunication Union, BDT, 2026. https://www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/Documents/IDI/ITU_ProcessForRevisingIDIMethodology_2026.pdf (дата обращения: 15.05.2026)

References

1. Measuring digital development: The ICT Development Index 2026. – Geneva: International Telecommunication Union, 2026. URL: https://www.itu.int/itu-d/reports/statistics/idi2026/. (in English).

2. Measuring digital development: The ICT Development Index 2025. – Geneva: International Telecommunication Union, 2025. https://www.itu.int/hub/publication/d-ind-ict_mdd-2025-1/. (in English).
3. Measuring digital development: The ICT Development Index 2024. – Geneva: International Telecommunication Union, 2024. https://www.itu.int/hub/publication/d-ind-ict_mdd-2024-3/. (in English).
4. Methodology of the ICT Development Index: Version 3.1. – Geneva: International Telecommunication Union, October 2023. https://www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/Documents/IDI/IDI_2023_Version3_1_Oct2023.pdf. (in English).
5. The ICT Development Index (IDI) [ofits. stranitsa statistiki]. – International Telecommunication Union, Telecommunication Development Bureau. https://www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/Pages/IDI/default.aspx (panel' dannykh: https://datahub.itu.int/dashboards/idi/) (data obrashcheniya: 15.05.2026). (in English).
6. Svodnyi analiticheskii otchet o sostoyanii i ispol'zovanii zemel' Respubliki Kazakhstan za 2024 god. – Astana: Ministerstvo sel'skogo khozyaistva Respubliki Kazakhstan, Komitet po upravleniyu zemel'nymi resursami, 2025. – Dannye na 1 noyabrya 2024 g. (in Russian).
7. Svodnyi analiticheskii otchet o sostoyanii i ispol'zovanii zemel' Respubliki Kazakhstan za 2023 god. – Astana: Ministerstvo sel'skogo khozyaistva Respubliki Kazakhstan, 2024. – Dannye na 1 noyabrya 2023 g. (in Russian).
8. Ob utverzhdenii Kontseptsii tsifrovoi transformatsii, razvitiya otrasli informatsionno-kommunikatsionnykh tekhnologii i kiberbezopasnosti na 2023-2029 gody: postanovlenie Pravitel'stva Respubliki Kazakhstan ot 28 marta 2023 goda № 269. https://adilet.zan.kz/rus/docs/P2300000269 (data obrashcheniya: 15.05.2026). (in Russian).
9. Ob utverzhdenii Gosudarstvennoi programmy «Tsifrovoi Kazakhstan»: postanovlenie Pravitel'stva Respubliki Kazakhstan ot 12 dekabrya 2017 goda № 827. https://adilet.zan.kz/rus/docs/P1700000827 (data obrashcheniya: 15.05.2026). (in Russian).
10. Zavratnik V. Smart Villages: Comprehensive Review of Initiatives and Practices / V. Zavratnik, A. Kos, E. Stojmenova Duh // Sustainability. – 2018. – Vol. 10, № 7. – Art. 2559. https://doi.org/10.3390/su10072559. (in English).
11. Visvizi A. It's Not a Fad: Smart Cities and Smart Villages Research in European and Global Contexts / A. Visvizi, M.D. Lytras // Sustainability. – 2018. – Vol. 10, № 8. – Art. 2727. https://doi.org/10.3390/su10082727. (in English).
12. Wolski O. Smart Villages Revisited: Conceptual Background and New Challenges at the Local Level / O. Wolski, M. Wójcik // Smart Villages in the EU and Beyond. – Bingley: Emerald Publishing, 2019. – P. 29-48. https://doi.org/10.1108/978-1-78769-845-120191004. (in English).
13. Adamowicz M. The «Smart Village» as a Way to Achieve Sustainable Development in Rural Areas of Poland / M. Adamowicz, M. Zwolińska-Ligaj // Sustainability. – 2020. – Vol. 12, № 16. – Art. 6503. https://doi.org/10.3390/su12166503. (in English).
14. The Use of IoT Technology in Smart Cities and Smart Villages: Similarities, Differences, and Future Prospects / N. Cvar et al // Sensors. – 2020. – Vol. 20, № 14. – Art. 3897. https://doi.org/10.3390/s20143897. (in English).
15. Komorowski Ł. Smart Villages: Where Can They Happen? / Ł. Komorowski, M. Stanny // Land. – 2020. – Vol. 9, № 5. – Art. 151. https://doi.org/10.3390/land9050151. (in English).
16. Smart Villages Policies: Past, Present and Future / S. Stojanova et al // Sustainability. – 2021. – Vol. 13, № 4. – Art. 1663. https://doi.org/10.3390/su13041663. (in English).
17. Territorial and Human Geography Challenges: How Can Smart Villages Support Rural Development and Population Inclusion? / E. Anastasiou et al // Social Sciences. – 2021. – Vol. 10, № 6. – Art. 193. https://doi.org/10.3390/socsci10060193. (in English).
18. Gerli P. What makes a smart village smart? A review of the literature / P. Gerli, J. Navio Marco, J. Whalley // Transforming Government: People, Process and Policy. – 2022. – Vol. 16, № 3. – P. 292-304. https://doi.org/10.1108/TG-07-2021-0126. (in English).
19. Increased Attention to Smart Development in Rural Areas: A Scientometric Analysis of Smart Village Research / Q. Wang et al // Land. – 2022. – Vol. 11, № 8. – Art. 1362. https://doi.org/10.3390/land11081362. (in English).

20. EU action for Smart Villages. – Brussels: European Commission, DG AGRI, 2017. https://ec.europa.eu/newsroom/agri/items/58296/en (data obrashcheniya: 15.08.2026). (in English).
21. Comprehensive evaluation of digital village development in the context of rural revitalization: A case study from Jiangxi Province of China / H. Liu et al // PLOS ONE. – 2024. – Vol. 19, № 5. – Art. e0303847. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0303847. (in English).
22. Deng J. The Impact of Digital Rural Construction on Rural Revitalization – Empirical Evidence from Chinese County Panel Data / J. Deng, X. Li, N. Zhang // Agriculture. – 2024. – Vol. 14, № 11. – Art. 1903. https://doi.org/10.3390/agriculture14111903. (in English).
23. Has Digital Village Construction Narrowed the Urban–Rural Income Gap: Evidence from Chinese Counties / Y. Liu et al // Sustainability. – 2024. – Vol. 16, № 13. – Art. 5330. https://doi.org/10.3390/su16135330. (in English).
24. Otto B. Designing a multi-sided data platform: findings from the International Data Spaces case / B. Otto, M. Jarke // Electronic Markets. – 2019. – Vol. 29, № 4. – P. 561-580. https://doi.org/10.1007/s12525-019-00362-x. (in English).
25. Weiss M. Remote sensing for agricultural applications: A meta-review / M. Weiss, F. Jacob, G. Duveiller // Remote Sensing of Environment. – 2020. – Vol. 236. – Art. 111402. https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111402. (in English).
26. A global systematic review of the remote sensing vegetation indices / K. Yan et al // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2025. – Vol. 139. – Art. 104560. https://doi.org/10.1016/j.jag.2025.104560. (in English).
27. van Klompenburg T. Crop yield prediction using machine learning: A systematic literature review / T. van Klompenburg, A. Kassahun, C. Catal // Computers and Electronics in Agriculture. – 2020. – Vol. 177. – Art. 105709. https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105709. (in English).
28. Machine Learning in Agriculture: A Review / K.G. Liakos et al // Sensors. – 2018. – Vol. 18, № 8. – Art. 2674. https://doi.org/10.3390/s18082674. (in English).
29. Digital twins in smart farming / C. Verdouw et al // Agricultural Systems. – 2021. – Vol. 189. – Art. 103046. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.103046. (in English).
30. Kremenchutskiy A. A Risk-Triggered Hybrid Assurance Framework Integrating Digital Traceability, AI-Based Monitoring, and Selective Laboratory Audits for Organic Supply Chains / A. Kremenchutskiy // Natural and Engineering Sciences. – 2026. – Vol. 11, Iss. 2. – P. 211-224. https://doi.org/10.28978/nesciences.262019 (in English).
31. Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and User Guide. – Paris: OECD Publishing; European Commission, Joint Research Centre, 2008. https://doi.org/10.1787/9789264043466-en. (in English).
32. Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and User Guide / M. Nardo et al // OECD Statistics Working Papers. – 2005. – № 2005/03. https://doi.org/10.1787/533411815016. (in English).
33. Saisana M. Uncertainty and sensitivity analysis techniques as tools for the quality assessment of composite indicators / M. Saisana, A. Saltelli, S. Tarantola // Journal of the Royal Statistical Society: Series A. – 2005. – Vol. 168, № 2. – P. 307-323. https://doi.org/10.1111/j.1467-985X.2005.00350.x. (in English).
34. Munda G. Noncompensatory/nonlinear composite indicators for ranking countries: a defensible setting / G. Munda, M. Nardo // Applied Economics. – 2009. – Vol. 41, № 12. – P. 1513-1523. https://doi.org/10.1080/00036840601019364. (in English).
35. Munda G. Social Multi-Criteria Evaluation for a Sustainable Economy / G. Munda. – Berlin; Heidelberg: Springer, 2008. https://doi.org/10.1007/978-3-540-73703-2. (in English).
36. On the Methodological Framework of Composite Indices: A Review of the Issues of Weighting, Aggregation, and Robustness / S. Greco et al // Social Indicators Research. – 2019. – Vol. 141, № 1. – P. 61-94. https://doi.org/10.1007/s11205-017-1832-9. (in English).
37. van der Burg S. Trust in farm data sharing: reflections on the EU code of conduct for agricultural data sharing / S. van der Burg, L. Wiseman, J. Krkeljas // Ethics and Information Technology. – 2021. – Vol. 23, № 3. – P. 185-198. https://doi.org/10.1007/s10676-020-09543-1. (in English).
38. Saaty T.L. Decision making with the analytic hierarchy process / T.L. Saaty // International Journal of Services Sciences. – 2008. – Vol. 1, № 1. – P. 83-98. https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590. (in English).

39. O provedenii natsional'noi sel'skokhozyaistvennoi perepisi Respubliki Kazakhstan v 2025 godu: postanovlenie Pravitel'stva Respubliki Kazakhstan ot 29 dekabrya 2023 goda № 1248. https://adilet.zan.kz/rus/docs/P2300001248 (data obrashcheniya: 15.05.2026). (in Russian).
40. Natsional'naya sel'skokhozyaistvennaya perepis' 2025 goda [ofits. razdel]. – Astana: Byuro natsional'noi statistiki Agentstva po strategicheskomu planirovaniyu i reformam Respubliki Kazakhstan. https://stat.gov.kz/ru/national/agriculture2025/ (data obrashcheniya: 15.05.2026). (in Russian).
41. Statistika sel'skogo, lesnogo, okhotnich'ego i rybnogo khozyaistva [ofits. razdel]. – Astana: Byuro natsional'noi statistiki Agentstva po strategicheskomu planirovaniyu i reformam Respubliki Kazakhstan. https://stat.gov.kz/ru/industries/business-statistics/stat-forrest-village-hunt-fish/ (data obrashcheniya: 15.05.2026) (in Russian).
42. Process for revising the ICT Development Index methodology. – Geneva: International Telecommunication Union, BDT, 2026. https://www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/Documents/IDI/ITU_ProcessForRevisingIDIMethodology_2026.pdf (data obrashcheniya: 15.05.2026). (in English).

Финансирование. *Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках программы грантового финансирования научных исследований (№ AP23488699).*

Благодарности. *Авторы выражают признательность ТОО «Шуйское-21» за предоставление доступа к производственной площадке, данным полевых наблюдений и результатам эксплуатации цифровых решений в реальных условиях сельскохозяйственного производства. Полевая апробация технологических решений на базе хозяйства позволила уточнить состав показателей блоков интеллектуального сельского хозяйства и экономической результативности и проверить операциональность их определений. Авторы благодарят рецензентов за замечания, которые привели к пересмотру формы агрегирования индекса, политики пропусков и критериев проверки следствий модели.*

Ш.Ж. Сеилов[1], Б.Ш. Журсинбек[1], М.У. Байдельдинов[1], А.К. Майданов[1]*, А.А. Сейлов[1,2]
[1]Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
010008, Қазақстан Республикасы, Астана қаласы, Сәтбаев көшесі, 2
[2]«Ауыл телеком» ЖШС («Қазақтелеком» АҚ еншілес компаниясы)
*e-mail: makeadil@mail.ru

АУЫЛ ШАРУАШЫЛЫҒЫ КЕШЕНІН ЦИФРЛЫҚ ТРАНСФОРМАЦИЯЛАУ ЖАҒДАЙЫНДА ҚАЗАҚСТАННЫҢ КЕҢІСТІКТІК ДАМУЫНЫҢ МОДЕЛІ РЕТІНДЕГІ ИНТЕЛЛЕКТУАЛДЫ АУЫЛДЫҚ АУМАҚ

Ауылдық аумақтардың тұрақты дамуы Қазақстанның азық-түлік қауіпсіздігін қамтамасыз етудің, ұлттық экономиканың өсуінің және халықтың өмір сүру сапасын арттырудың басты шарттарының бірі болып қала береді. Цифрлық инфрақұрылымға, көлік желісіне және ауыл шаруашылығына елеулі мемлекеттік инвестициялар салынғанына қарамастан, аумақтық дамудың біркелкі еместігі, еңбек өнімділігінің төмендігі, ауылдық аудандар экономикасының шектеулі әртараптандырылуы және халықтың көші-қоны сақталуда.

Жұмыста «Интеллектуалды ауылдық аумақ» (Intelligent Rural Territory, IRT) тұжырымдамасы ұсынылады. Ол ауылдық аумақты цифрлық технологиялар агроөнеркәсіптік кешеннің тиімділігін арттырудың, экспорттық әлеуетті өсірудің және халықтың өмір сүру сапасын жақсартудың құралына айналатын біртұтас әлеуметтік-экономикалық жүйе ретінде қарастырады. Негізінен телекоммуникациялық инфрақұрылымға бағытталған Smart Village және Digital Village тұжырымдамаларынан айырмашылығы, ұсынылған модель цифрлық трансформацияны ауылдық аумақтардың жаңа экономикасын қалыптастырудың негізі деп санайды.

Цифрлық инфрақұрылымды, деректерді, интеллектуалды талдауды, платформаларды, экономикалық қызметтің жаңа түрлерін және тұрақты даму нәтижелерін байланыстыратын алты деңгейлі архитектура ұсынылған.

Ауылдық аумақтардың цифрлық кемелдігін, экономикалық нәтижелілігін, әлеуметтік тұрақтылығын және экспорттық дайындығын кешенді бағалауға арналған Intelligent Rural Territory

Index (IRTI) индексі енгізілді. Аддитивті агрегаттауға негізделген IDI индекстерінен айырмашылығы, IRTI компенсацияланбайтын геометриялық жинақтауды пайдаланады: алты блоктың кез келгені бойынша сәтсіздік қалғандарының жетістігімен өтелмейді.

Әдістеме нормалау шекараларын бекітетін, винзоризацияны хаттамалайтын, олқылықтар саясаты айқын және әрбір есептеудің қайталанымдылық манифесі бар есептеу хаттамасына дейін жеткізілген. Рейтингілеу бір салмақтар жиынтығы бойынша емес, 100 000 іске асырудағы Дирихле үлестірімі бойынша орындалады, бұл медиандық рангіні 5-95% рангілер аралығымен бірге жариялауға мүмкіндік береді.

Бұл жұмыс әдіснамалық сипатта. Сандық нәтижелер 17 бақылау бірлігінен тұратын синтетикалық панельде алынған және хаттаманың бағдарламалық іске асырылуының дұрыстығын тексеруге қызмет етеді, нақты облыстардың бағасы болып табылмайды. Тексеру олқылықтар саясаты бойынша индекс 14 бірлік үшін жарияланатынын, олардың алтауының рангісі салмақтарды таңдауға тұрақсыз екенін, ал компенсацияланбайтын жинақтау теңгерімсіз бейіндерге атаулы айыппұл салып, жиынтықтың теңгерімді бөлігін қайта реттемейтінін көрсетті. Ресми статистика бойынша есептеу келесі жарияланымда жоспарланған.

Нәтижелер Қазақстан Республикасының ауылдық аумақтарын цифрлық трансформациялау мемлекеттік саясатын әзірлеу кезінде және «Қазақстанның интеллектуалды ауылдық аумағы – 2035» ұлттық бағдарламасын қалыптастыруда пайдаланылуы мүмкін.

Түйін сөздер: *интеллектуалды ауылдық аумақ, Smart Village, цифрлық трансформация, агроөнеркәсіптік кешен, композиттік индекс, компенсацияланбайтын агрегаттау, сезімталдық талдауы, Монте-Карло әдісі, ғарыштық мониторинг, тұрақты даму, Қазақстан.*

Sh.Zh. Seilov[1], B.Sh. Zhursinbek[1], M.U. Baideldinov[1], A.K. Maidanov[*], A.A. Seilov[1,2]
[1]L.N. Gumilyov Eurasian National University,
2 Satpayev Street, Astana, 010008, Republic of Kazakhstan
[2]Auyl Telecom LLP (a subsidiary of Kazakhtelecom JSC)
*e-mail: makeadil@mail.ru

INTELLIGENT RURAL TERRITORY AS A MODEL OF SPATIAL DEVELOPMENT OF KAZAKHSTAN UNDER DIGITAL TRANSFORMATION OF THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX

Sustainable rural development is a key condition for food security and economic growth in Kazakhstan. Despite substantial public investment in digital infrastructure and agriculture, uneven territorial development, low labour productivity, limited economic diversification and outward rural migration persist.

The paper proposes the concept of the Intelligent Rural Territory (IRT), treating a rural area as an integrated socio-economic system in which digital technologies raise the efficiency of the agro-industrial complex, expand exports and improve living standards. Unlike Smart Village and Digital Village, which focus on telecommunication infrastructure and individual services, the model treats digital transformation as the basis of a new rural economy. A six-level architecture links infrastructure, data, analytics, platforms, new economic activities and sustainability outcomes through an upward data flow and a downward control loop.

The Intelligent Rural Territory Index (IRTI) is introduced for integrated assessment of digital maturity, economic performance, social sustainability and export readiness. Unlike the compensatory additive IDI family, IRTI uses non-compensatory geometric aggregation, so failure in any of the six blocks cannot be offset by the others. It is implemented as a modular information system with fixed normalisation bounds, logged winsorisation, an explicit missing-data policy and a reproducibility manifest; ranking uses a Dirichlet distribution of 100,000 weight vectors, reporting the median rank and the 5–95 % rank interval.

This is a methodological study: the numerical results come from a synthetic panel of 17 units and verify the software implementation, not actual regions. The index is published for 14 units, the ranks of six are unstable with respect to weights, and non-compensatory aggregation penalises unbalanced profiles without reordering the balanced part of the sample. Computation on official statistics is planned for a subsequent publication.

The results can inform state policy for rural digital transformation in Kazakhstan and the national programme «Intelligent Rural Territory of Kazakhstan – 2035».

Key words: *intelligent rural territory, Smart Village, digital transformation, agro-industrial complex, composite index, non-compensatory aggregation, sensitivity analysis, Monte Carlo method, satellite monitoring, sustainable development, Kazakhstan.*

Сведения об авторах

Шахмаран Журсинбекович Сеилов – кандидат технических наук, профессор кафедры компьютерной и программной инженерии, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астна, Казахстан; e-mail: seilov_shzh@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7057-0461.

Бибинур Шахмарановна Журсинбек – докторант кафедры компьютерной и программной инженерии, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан; e-mail: zhursinbek99@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-4505-470X.

Марат Урасканович Байдельдинов – кандидат технических наук, кафедра компьютерной и программной инженерии, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан; e-mail: make3508@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3295-2949.

Адиль Кокенович Майданов* – преподаватель кафедры компьютерной и программной инженерии, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан; e-mail: makeadil@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2392-5164.

Амирали Ажибекович Сейлов – генеральный директор ТОО «Ауыл телеком» (дочерняя компания АО «Казахтелеком»), докторант кафедры информационных систем, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан; e-mail: seilov-amirali@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9777-5069.

Авторлар туралы мәліметтер

Шахмаран Жүрсінбекұлы Сеилов – техника ғылымдарының кандидаты, профессор, компьютерлік және бағдарламалық инженерия кафедрасы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан; e-mail: seilov_shzh@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7057-0461.

Бибінұр Шахмаранқызы Жүрсінбек – компьютерлік және бағдарламалық инженерия кафедрасының докторанты, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан; e-mail: zhursinbek99@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-4505-470X.

Марат Урасканович Байдельдинов – техника ғылымдарының кандидаты, компьютерлік және бағдарламалық инженерия кафедрасы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан; e-mail: make3508@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3295-2949.

Адиль Кокенович Майданов* – компьютерлік және бағдарламалық инженерия кафедрасының оқытушысы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан; e-mail: makeadil@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2392-5164.

Амирали Ажибекович Сейлов – «Ауыл телеком» ЖШС («Қазақтелеком» АҚ еншілес компаниясы) бас директоры, ақпараттық жүйелер кафедрасының докторанты, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан; e-mail: seilov-amirali@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9777-5069.

Information about the authors

Shakhmaran Seilov – Candidate of Technical Sciences, Professor, Department of Computer and Software Engineering, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; e-mail: seilov_shzh@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7057-0461.

Bibinur Zhursinbek – PhD student, Department of Computer and Software Engineering, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; e-mail: zhursinbek99@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-4505-470X.

Marat Baideldinov – Candidate of Technical Sciences, Department of Computer and Software Engineering, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; e-mail: make3508@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3295-2949.

Adil Maidanov* – Lecturer, Department of Computer and Software Engineering, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; e-mail: makeadil@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2392-5164.

Amirali Seilov – General Director, Auyl Telecom LLP (a subsidiary of Kazakhtelecom JSC), PhD student, Department of Information Systems, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; e-mail: seilov-amirali@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9777-5069.

Поступила в редакцию 08.06.2026
Поступила после доработки 04.09.2026
Принята к публикации 08.09.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-29

CC BY 4.0
Check for updates

МРНТИ: 53.01.91

S.N. Uali[1,2], A.B. Seisenova[1,3], O.S. Kapizov[1.3], D.K. Mukhanov[1,4*], K.R. Manap[1,3]
[1]Scientific Center for New Technologies,
Almaty, Al-Farabi 7k, Nurly Tau Business Center, Block 5A, 334b, 050059, Kazakhstan
[2]International IT University, 34/1 Manasa str., Bostandyk district, Almaty, Kazakhstan, 050040
[3]AlAkSan, Al-Farabi 7k, Nurly Tau Business Center, Block 5A, 334b, 050059, Kazakhstan
[4]Al-Farabi Kazakh National University, 71 al-Farabi Avenue, Almaty, 050040
[*]e-mail: dd_511@mail.ru

SIMULATION AND PERFORMANCE ANALYSIS OF PID-TYPE ITERATIVE LEARNING CONTROL IN THE LABORATORY LINE TESTING OF CYLINDRICAL CELL BATTERIES

Abstract: *The increasing demand for reliable rechargeable energy storage systems has strengthened the need for accurate laboratory testing procedures for cylindrical cell batteries. Laboratory and pilot-line testing stations repeatedly perform charging, discharging, voltage verification, capacity estimation, and internal resistance measurements. These operations require precise current and voltage regulation because even small transient deviations may affect cell classification, aging analysis, and safety evaluation. This work presents a simulation-based study of PID-type Iterative Learning Control (PID-type ILC) for repeated laboratory line testing of cylindrical cell batteries. The proposed approach combines the classical proportional-integral-derivative control structure with an iterative learning mechanism that updates the control input after each repeated cycle using the previous tracking error. A simplified MATLAB model of a cylindrical battery charging process was developed using state-of-charge dynamics, internal resistance, terminal voltage estimation, actuator saturation, and a repeated finite-time testing interval. The simulation evaluates the controller response over successive cycles and analyzes current tracking, voltage behavior, control effort, state of charge, and error convergence. The results demonstrate that PID-type ILC can reduce tracking error over repeated cycles and improve the repeatability of laboratory battery testing. The method is especially relevant for automated quality-control lines where many cells are tested under similar protocols. The proposed simulation can serve as a preliminary digital model before experimental implementation on a real battery testing bench.*

Key words: *cylindrical cell battery, PID control, iterative learning control, laboratory testing, charging simulation, MATLAB, battery quality control, renewable materials.*

1. Introduction

Rechargeable batteries are a central component of modern electric transportation, consumer electronics, autonomous equipment and distributed power across the global infrastructure. Among the developed and already available formats, cylindrical cells remain as one of the most widely used battery formats on the globe due to their geometry that supports standardized manufacturing, mechanical and thermal stability and efficient packaging [1, 2]. Popular formats such as 18650, 21700, and 4680 cells are used in large battery packs where thousands of individual cells must demonstrate consistent electrical performance and safety characteristics.

Transition towards sustainable and safe energy systems is also changing the direction where battery research is heading. In addition to improving energy density and cycle life, researchers are actively studying renewable materials for separators, binders and other additives of known battery components known this day. Carbon derived from biomass such as lignin, cellulose, rice husk, coconut shells and other agricultural residues become considered as a possible new research route for lower-cost and resource-efficient electrode materials [3]. Although material development is important, practical application of those batteries depends heavily on reliable laboratory testing methods that can measure performance in a repeatable and controlled manner.

Battery testing process is not a single measurement – but a sequence of constantly repeated operations. A typical laboratory or pilot-line may include constant current and voltage charging, discharge capacity testing and open circuit rest periods, thermal monitoring and resistance estimations (Fig. 1). These tests are often repeated across many cells, or over many cycles of the same cell. Because the procedure is repetitive, the control system does not have to treat every cycle

©S.N. Uali, A.B. Seisenova, O.S. Kapizov, D.K. Mukhanov, K.R. Manap, 2026

as though it were entirely new. Instead, it can learn from earlier tracking errors and perform better in the next repetition [4-6].

Classical proportional-integral-derivative control is widely used in industrial systems because it is simple, transparent, and effective at regulating current, voltage, temperature, and actuator output [7,8]. In a battery testing station, a PID controller can regulate the charging current or terminal voltage by comparing the desired setpoint with the measured value. However, classical PID control mainly responds within the current operation. It does not automatically retain the error pattern from a previous test cycle and use it to improve the next one. This limitation becomes especially important when the same testing protocol is repeated many times.

Iterative Learning Control is designed for systems that perform repeated, finite-duration tasks. Its basic principle is straightforward: the control input for a new iteration is corrected using the tracking error measured in the previous one [4-6]. When this idea is combined with PID-type correction, the resulting controller uses the proportional, integral, and derivative components of the previous-cycle error to update the input trajectory for the next cycle [5]. This approach is well suited to laboratory battery testing because charge and discharge profiles are often repeated under similar conditions.

The aim of this work is to develop and analyze a MATLAB simulation of PID-type Iterative Learning Control for laboratory line testing of cylindrical cell batteries [9]. The focus is not on detailed electrochemical modeling, but rather on a control-oriented representation of the charging process, tracking accuracy, and cycle-to-cycle learning behavior [10, 11]. The study examines how the controller improves current tracking over repeated test cycles and how that improvement can support stable, repeatable laboratory battery measurements.

Unlike a conventional single-cycle PID implementation, the proposed framework explicitly uses the tracking error from the previous finite-duration test cycle to update the command trajectory for the next cycle. The contribution of this study lies in the implementation and analysis of this PID-type ILC strategy within a simplified control-oriented model of cylindrical-cell laboratory testing, with simultaneous evaluation of current tracking, RMS error convergence, terminal voltage, and state-of-charge behavior. The developed approach provides a preliminary digital-control framework for subsequent experimental implementation on a physical battery testing system (Figure 1).



Figure 1 – General concept of a laboratory line for cylindrical cell testing with PID-type ILC control

2. Methodology

2.1. Object of Study: Cylindrical Cell Battery Testing

This study focuses on a cylindrical rechargeable cell tested on a laboratory production line. In real testing stations, cells are placed in holders, connected to programmable charge-discharge channels, and monitored using sensors for voltage, current, temperature, and sometimes pressure or impedance. As the predefined test profile is applied, the system records how the cell responds. The resulting data are then used for cell grading, defect detection, capacity evaluation, and process validation [10].

The operation examined here is a repeated constant-current charging phase. This phase is especially representative because it appears in formation, capacity testing, and routine charge verification [1, 10]. The target charging current serves as the reference trajectory, while the actual current is treated as the controlled output. To reduce the tracking error between the desired and measured current, the controller adjusts the charger command. The same testing interval is assumed to repeat over multiple cycles. These cycles may correspond either to repeated tests on the same

cell or to sequential tests of similar cells manufactured under the same technological conditions. In either situation, the process is repetitive and finite in duration, which makes the use of ILC a reasonable choice [4-6]. When the iterations represent different cells rather than repeated tests of the same cell, the effectiveness of ILC depends on the cells and tester dynamics remaining sufficiently similar. Significant cell-to-cell variations in internal resistance, capacity, temperature, or initial state of charge may reduce the transferability of the learned command. Such variations should therefore be considered during future experimental implementation of the proposed control strategy.

2.2. Control-Oriented Battery Model

To keep the simulation easy to interpret and well suited for controller analysis, we chose a simplified, control-oriented battery model [10, 11]. The model captures the key elements: state of charge, open-circuit voltage, internal resistance, and the charger's first-order current response together with the battery system. It does not represent every electrochemical process taking place inside the cell, but it is more than adequate for examining tracking behavior and how the controller learns over time [1, 12].

The open-circuit voltage is approximated as a linear function of the state of charge. During charging, the terminal voltage is obtained by adding the ohmic voltage drop created by the internal resistance. The state of charge is then updated based on the charging current and the cell's nominal capacity [10-12].

The simplified equations are given below:

$$Voc(t) = Vmin + (Vmax - Vmin)SOC(t),$$
$$Vt(t) = Voc(t) + I(t)Rint,$$
$$SOC(t + \Delta t) = SOC(t) + I(t)\Delta t \,/\, (Cnom \cdot 3600).$$

Here, Voc is the open-circuit voltage, Vt is the terminal voltage, $I(t)$ is the charging current, Rint is the internal resistance, Cnom is the nominal capacity in ampere-hours, and Δt is the simulation time step. Voltage and current limits are included to imitate safety constraints used in real testing equipment.

2.3. PID Control Principle

The classical PID controller calculates the control signal using the present, accumulated, and predicted trend of the error. For a reference value r(t) and measured output y(t), the error is defined as e(t) = r(t) - y(t). The continuous PID control law can be written as [7,8]:

$$u(t) = K\_p\, e(t) + K\_i\backslash int\_0\hat{}t\, e(\backslash tau)\backslash, d\backslash tau + K\_d\backslash frac\{de(t)\}\{dt\}$$

The proportional term provides immediate correction, the integral term removes steady-state error, and the derivative term reacts to the rate of error change. In battery testing, PID control may be applied to charging current, voltage, discharge current, or chamber temperature. The controller output may represent a charger current command, power electronics duty cycle, or electronic load command.

2.4. PID-Type Iterative Learning Control

PID-type Iterative Learning Control extends the PID idea from single-cycle feedback to repeated-cycle learning [4-6]. The method updates the next control input trajectory by using the error measured during the previous iteration. The update law used in this study is:

$$u_{k+1}(t) = u_k(t) + K_p e_k(t) + K_i \int_0^t e_k(\tau)\, d\tau + K_d \frac{de_k(t)}{dt}$$

Here, is the iteration number, is the command trajectory used during the kth testing cycle, and ek(t) is the tracking error from that cycle. The proportional learning term corrects direct error, the integral learning term compensates accumulated bias, and the derivative learning term responds to changes in the error trajectory [5,6]. After each cycle, the next control trajectory is corrected and constrained by actuator saturation limits.

The main advantage of this method is that the controller can gradually improve the entire time profile of the control input. Instead of only reacting to the present error, the system uses previous information to anticipate repeated deviations. In a battery laboratory line, this behavior is useful when the same protocol is applied to many cells and the tester dynamics remain similar.

2.5. Simulation Procedure

The simulation was carried out in MATLAB (Fig. 2) using a discrete-time model [9]. The time step was kept small enough to capture detailed transient behavior during the first minute of testing. Each cycle followed the same reference current profile. The first cycle began with an initial charger command. Once the current response and the error had been calculated, the resulting error

trajectory was used to adjust the control input for the next cycle [4-6]. This procedure was repeated over twenty cycles (Table 1). Twenty learning iterations were used as a fixed evaluation horizon. This number was sufficient to capture the rapid initial reduction in tracking error and the subsequent approach to a nearly steady RMS-error level, while maintaining a compact simulation interval for comparative analysis.

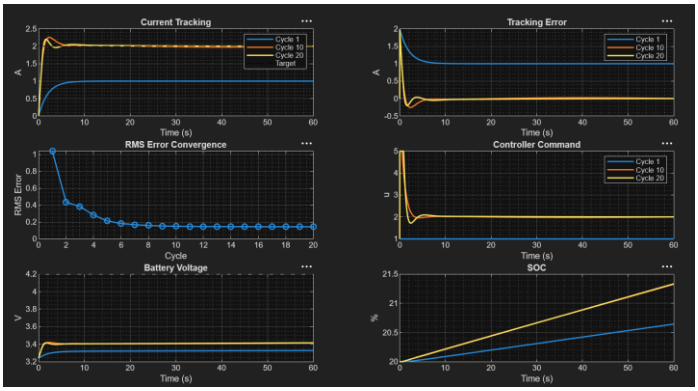


Figure 2 – MATLAB simulation flowchart of the repeated PID-type ILC battery testing process

Table 1 – Main simulation parameters used in the PID-type ILC model

Parameter	Symbol / value	Purpose
Simulation time	60 s	Finite testing interval
Time step	0.01 s	Detailed transient resolution
Nominal capacity	2.5 Ah	SOC calculation
Initial SOC	20%	Initial battery state
Internal resistance	0.08 Ω	Terminal voltage calculation
Reference current	2 A	Target charging value
Number of cycles	20	ILC learning iterations
Voltage limit	4.2 V	Charging safety constraint
Proportional learning gain	K_p=0.35	Direct error correction
Integral learning gain	K_i=0.02	Accumulated error compensation
Derivative learning gain	K_d=0.01	Transient error correction
Charger command saturation	U_{min}=0 U_{max}=5	Actuator constraint

The analysis focused on the following performance indicators: current tracking response, tracking error, root-mean-square error, maximum absolute error, controller command evolution, terminal voltage, and state-of-charge progression. Together, these indicators help determine whether the controller improves the repeatability of the test and whether the charging process stays within safe operating limits.

3. Results and Discussion

3.1. Current Tracking Across Iterations

A clear sign of how well the controller performs is how accurately it tracks the current (Fig. 3). During the first cycle, the charging current does not match the reference value right away because the initial command trajectory has not yet been tuned. The largest error appears during the transient stage of the response, as the system climbs from zero current toward the desired charging level [7, 8].

After several iterations, the PID-type ILC update adjusts the command trajectory based on the error observed in earlier cycles [4-6]. As a result, the later cycles reach the target current faster and with less tracking error. Comparing the first, fifth, tenth, and twentieth cycles makes the learning effect easy to see. The response becomes sharper and more consistent because the controller has effectively learned the approximate command required to offset the system's slow dynamics.

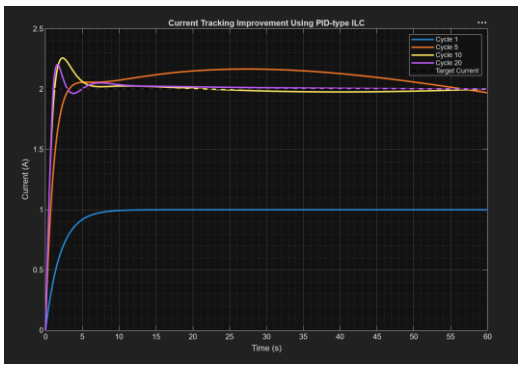


Figure 3 – Current tracking response for selected learning cycles: Cycle 1, Cycle 5, Cycle 10, and Cycle 20

3.2. Error Convergence

Figure 4 shows that the tracking-error profile changes substantially as the learning process progresses. The first cycle is characterized by a relatively large positive error because the charger response does not immediately reach the 2 A reference current. By Cycles 5 and 10, the magnitude of the error is markedly reduced, although transient over- and under-correction remain visible. By Cycle 20, the tracking error is concentrated mainly within the initial transient period and remains close to zero during most of the testing interval.

This trend is further confirmed by the RMS tracking error presented in Figure 5. The RMS error decreases from approximately 1.04 A during the first iteration to about 0.14 A by the twentieth iteration, corresponding to an overall reduction of approximately 86%. The largest improvement occurs during the first several iterations, after which the RMS error approaches a nearly steady level. This behavior demonstrates progressive cycle-to-cycle learning and diminishing tracking-error corrections.

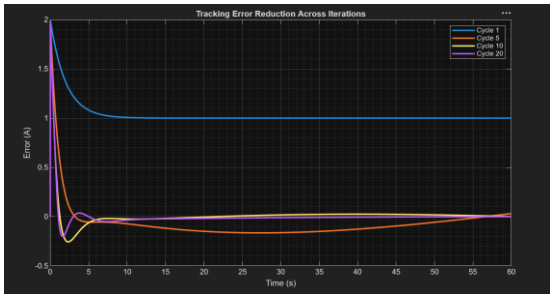


Figure 4 – Tracking error reduction during selected cycles of the laboratory battery testing simulation

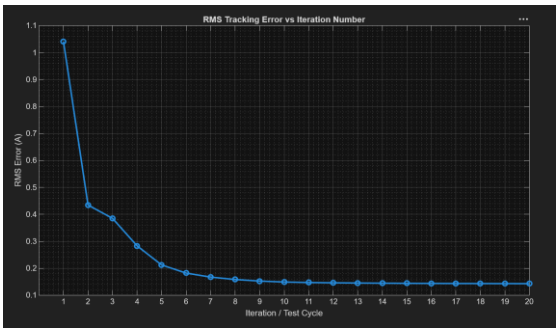


Figure 5 – RMS tracking error convergence as a function of iteration number

3.3. Controller Command Evolution

The learned controller command illustrates how the input trajectory shifts from one cycle to the next (Fig. 6). During the first cycle, the command is relatively simple and does not fully make up for the dynamic lag in the charger-battery system. As learning progresses, the command becomes better matched to the process dynamics. In practical terms, the controller starts applying a command that more effectively anticipates the charging current the system needs.

Just as importantly, the command must stay within physical limits. In the simulation, saturation constraints were included to prevent unrealistically large or negative charger commands. This mirrors the behavior of real battery testing equipment, where current, voltage, and power outputs are restricted by hardware capabilities and safety settings.

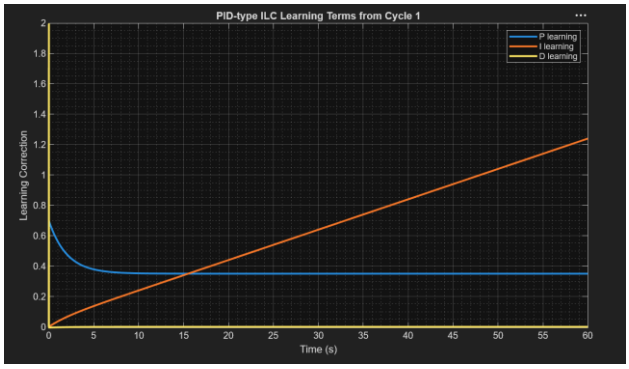


Figure 6 – Evolution of the learned charger command over repeated PID-type ILC cycles.

3.4. Voltage and State-of-Charge Behavior

Terminal voltage is one of the most important safety indicators in battery testing (Fig. 7). As the state of charge increases, and as current moves through the cell's internal resistance, the simulated voltage rises gradually. Throughout the interval examined, the voltage curve stays below the defined maximum voltage limit. This suggests that the improvement in current tracking does not compromise the basic safety requirement of charging.

The state-of-charge response increases smoothly over the one-minute test interval (Fig. 8). Because the simulation covers only a short period compared with a full charging process, the increase in SOC remains moderate. Even so, the SOC curve is still useful because it shows that the battery model responds consistently to the charging current and that the repeated cycles remain physically reasonable.

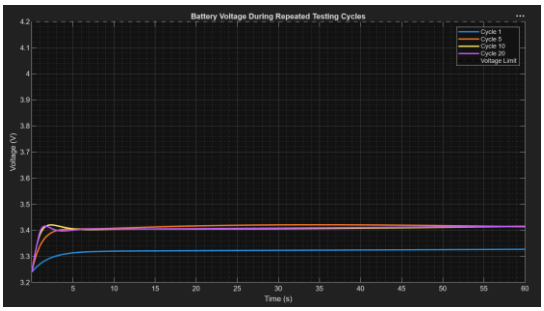


Figure 7 – Terminal voltage response during repeated cylindrical cell testing cycles

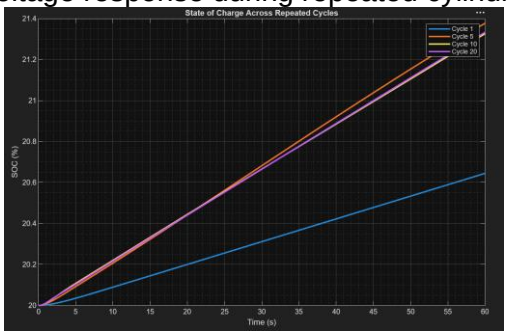


Figure 8 – State-of-charge progression during the simulated laboratory charging interval

3.5. Relevance for Laboratory and Pilot-Line Testing

The results obtained through simulations support the suitability of PID-type ILC for laboratory line testing of cylindrical cells [4-6]. In such systems, the same procedures are repeated for many cells,

and high repeatability is often more valuable than aggressive one-time control action. By reducing cycle-to-cycle error, the controller may improve the reliability of capacity measurements, internal resistance estimation, and grading decisions [10, 11].

This approach is also relevant for batteries based on renewable or bio-derived materials [3]. New material systems often require careful laboratory validation because their electrochemical properties, internal resistance, and aging behavior may differ from conventional cells [1, 2]. A more repeatable testing control method makes it easier to distinguish real material performance from measurement variation caused by poor control accuracy.

The presented simulation is intentionally simplified and should be treated as a preliminary control study (Table 2). A real cell has nonlinear voltage-SOC behavior, temperature-dependent resistance, aging effects, hysteresis, and electrochemical diffusion phenomena. However, the simplified model is useful for demonstrating the learning principle and for preparing future implementation in MATLAB/Simulink or on a physical battery analyzer.

Table 2 – Interpretation of main simulation outputs

Output graph	Meaning	Expected interpretation
Current tracking	Actual current compared with reference current	Later cycles should approach the target faster
Tracking error	Difference between reference and actual current	Error amplitude should decrease with learning
RMS error	Average tracking quality over one cycle	A downward trend shows learning convergence
Controller command	Input sent to the charger model	Command becomes optimized while staying within limits
Battery voltage	Terminal voltage during charging	Voltage must remain below the safety limit
SOC	Charging progress of the cell	SOC should increase smoothly and consistently

4. Conclusion

This work presents a simulation study of PID-type Iterative Learning Control applied to laboratory line testing of 18650-type cylindrical cells [4-6]. The study focuses on repeated constant-current charging, which is one of the most important operations in battery formation, its capacity evaluation, and other quality control procedures [10].

The MATLAB model that was developed included a simplified representation of battery voltage, internal resistance, state-of-charge dynamics, actuator limits, and a repeated finite-time testing cycle [1, 2, 9-12]. After each cycle, the PID-type ILC algorithm updated the charger command using the proportional, integral, and derivative components of the previous tracking error [5, 6]. The simulation results showed that the controller improves tracking performance over repeated cycles. Current tracking becomes more precise, the tracking error decreases, the RMS error steadily converges downward, and the controller command gradually develops into a more effective input trajectory.

At the same time, voltage and state-of-charge behavior stay within reasonable operating limits. These results suggest that PID-type ILC could be valuable for automated laboratory and pilot-line battery testing, especially when the same protocol is repeated across large numbers of cylindrical cells. The method can help create more repeatable measurement conditions and may improve the reliability of cell grading and performance analysis.

Future research should examine nonlinear electrochemical battery models, temperature effects, experimental validation on a real battery analyzer, and applications involving cylindrical cells made from renewable or bio-derived materials [1-3, 12].

References

1. Scrosati B. Lithium batteries: Status, prospects and future / B. Scrosati, J. Garche // Journal of Power Sources. – 2010. – № 195(9). – P. 2419-2430. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.11.048.

2. Goodenough J.B. The Li-ion rechargeable battery: A perspective / J.B. Goodenough, K. Park // Journal of the American Chemical Society. – 2013. – № 135(4). – P. 1167-1176. https://doi.org/10.1021/ja3091438.

3. Zhu Z. The rational design of biomass-derived carbon materials towards next-generation energy storage: A review / Z. Zhu, Z. Xu // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2020. – № 134, Article 110308. https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110308.
4. Arimoto S. Bettering operation of robots by learning / S. Arimoto, S. Kawamura, F. Miyazaki // Journal of Robotic Systems. – 1984. – № 1(2). – P. 123-140. https://doi.org/10.1002/rob.4620010203.
5. Bristow D.A. A survey of iterative learning control / D.A. Bristow, M. Tharayil, A.G. Alleyne // IEEE Control Systems Magazine. – 2006 – № 26(3). – P. 96-114. https://doi.org/10.1109/MCS.2006.1636313.
6. Polynomial Iterative Learning Control (ILC) Tracking Control Design for Uncertain Repetitive Continuous-Time Linear Systems Applied to an Active Suspension of a Car Seat / S.B. Attia et al // Mathematics. – 2024. – № 12(16). – P. 2573. https://doi.org/10.3390/math12162573.
7. Elkholy M.M. Modern Control Techniques and Operational Challenges in Permanent Magnet Synchronous Motors: A Comprehensive Review / M.M. Elkholy, M.M. Algendy, E.A. El-Hay // Automation. – 2025. – № 6(4). – P. 49. https://doi.org/10.3390/automation6040049.
8. Nise N.S. Control systems engineering (7th ed.). Wiley. 2015.
9. MathWorks. (n.d.). MATLAB and Simulink documentation for control system design and simulation. MathWorks. https://www.mathworks.com/help/slcontrol/index.html.
10. Plett, G.L. Battery Management Systems, Volume I: Battery Modeling. Artech House, Norwood, MA. 2015.
11. Electrochemical modeling in lithium batteries: Pathways to next-generation power sources / Hosein Jahangir et al // Journal of Power Sources. – 2025 – Vol. 654. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2025.237833.
12. Albakri M. A Review of Modelling, State of Charge Estimation and Management Methods of EV Lithium-Ion Batteries / M. Albakri, A. Darwish // Batteries. – 2026. – № 12(3). – P. 92. https://doi.org/10.3390/batteries12030092.

Funding

This research has been/was/is funded by the Committee of Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (grant № BR28713383).

Ш.Н. Уали[1,2], А.Б. Сейсенова[1,3], О.С. Капизов[1,3], Д.К. Муханов[1,4*], К.Р. Манап[1,3]
[1]Scientific Center for New Technologies,
050059, Республика Казахстан, Алматы, Аль-Фараби 7к, блок 5А,
[2]Международный университет информационных технологий,
050040, Казахстан, г. Алматы, Бостандыкский район, ул. Манаса, 34/1
[3]AlAkSan, 050059, Республика Казахстан, Аль-Фараби 7к, блок 5А
[4]Казахский национальный университет имени аль-Фараби,
050040, Республика Казахстан, г. Алматы, пр. аль-Фараби, 71
*e-mail: dd_511@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ PID-ТИПОВОГО ИТЕРАТИВНОГО ОБУЧАЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ ПРИ ЛАБОРАТОРНОМ ЛИНЕЙНОМ ТЕСТИРОВАНИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ АККУМУЛЯТОРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Рост спроса на надежные перезаряжаемые системы хранения энергии усилил необходимость в точных лабораторных методах испытания цилиндрических аккумуляторных элементов. Лабораторные и пилотные испытательные станции многократно выполняют операции зарядки, разрядки, проверки напряжения, оценки емкости и измерения внутреннего сопротивления. Эти операции требуют точного регулирования тока и напряжения, поскольку даже небольшие переходные отклонения могут повлиять на классификацию элементов, анализ старения и оценку безопасности. В данной работе представлено исследование на основе моделирования PID-типового итеративного обучающего управления для повторяющегося лабораторного линейного тестирования цилиндрических аккумуляторных элементов. Предлагаемый подход объединяет классическую структуру пропорционально-интегрально-дифференциального управления с механизмом итеративного обучения, который обновляет управляющее воздействие после каждого повторяющегося цикла с использованием ошибки отслеживания предыдущего цикла. Упрощенная MATLAB-модель процесса зарядки цилиндрического аккумулятора была разработана с учетом динамики состояния заряда, внутреннего

сопротивления, оценки клеммного напряжения, насыщения исполнительного устройства и повторяющегося конечного временного интервала испытания. В ходе моделирования оценивается отклик контроллера на протяжении последовательных циклов и анализируются отслеживание тока, поведение напряжения, управляющее воздействие, состояние заряда и сходимость ошибки. Результаты показывают, что PID-типовое ILC способно уменьшать ошибку отслеживания в повторяющихся циклах и повышать повторяемость лабораторных аккумуляторных испытаний. Метод особенно актуален для автоматизированных линий контроля качества, где большое количество элементов тестируется по схожим протоколам. Предложенная модель может служить предварительной цифровой основой перед экспериментальной реализацией на реальном стенде для испытания аккумуляторов.

Ключевые слова: *цилиндрический аккумуляторный элемент, PID-управление, итеративное обучающее управление, лабораторное тестирование, моделирование зарядки, MATLAB, контроль качества аккумуляторов, возобновляемые материалы.*

Ш.Н. Уәли[1,2], А.Б. Сейсенова[1,3], Ө.С. Капизов[1,3], Д.К. Муханов[1,4*], К.Р. Манап[1,3]
[1]Scientific Center for New Technologies,
050059, Қазақстан Республикасы, Алматы, Аль-Фараби 7к, блок 5А
[2]Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті,
050040, Қазақстан, Алматы қ., Бостандық ауданы, Манас көшесі, 34/1
[3]AlAkSan, 050059, Қазақстан Республикасы, Алматы, Аль-Фараби 7к, блок 5А
[4]Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,
050040, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., әл-Фараби даңғылы, 71
[*]e-mail: dd_511@mail.ru

ЦИЛИНДРЛІК АККУМУЛЯТОРЛЫҚ ЭЛЕМЕНТТЕРДІ ЗЕРТХАНАЛЫҚ ЖЕЛІДЕ СЫНАУ КЕЗІНДЕГІ PID-ТИПТІ ИТЕРАТИВТІ ОҚЫТУШЫ БАСҚАРУДЫ МОДЕЛЬДЕУ ЖӘНЕ ӨНІМДІЛІГІН ТАЛДАУ

Қайта зарядталатын сенімді энергия сақтау жүйелеріне сұраныстың артуы цилиндрлік аккумуляторлық элементтерді дәл зертханалық сынау әдістеріне деген қажеттілікті күшейтті. Зертханалық және пилоттық желідегі сынақ станциялары зарядтау, разрядтау, кернеуді тексеру, сыйымдылықты бағалау және ішкі кедергіні өлшеу операцияларын бірнеше рет қайталайды. Бұл операциялар ток пен кернеуді дәл реттеуді талап етеді, себебі аз ғана өтпелі ауытқулардың өзі элементтерді жіктеу, қартаюды талдау және қауіпсіздікті бағалау нәтижелеріне әсер етуі мүмкін. Бұл жұмыста цилиндрлік аккумуляторлық элементтерді қайталанатын зертханалық желіде сынау үшін PID-типті итеративті оқытушы басқаруды қолдануға арналған модельдеуге негізделген зерттеу ұсынылады. Ұсынылған тәсіл классикалық пропорционалды-интегралды-дифференциалды басқару құрылымын алдыңғы қадағалау қатесін пайдалана отырып, әрбір қайталанатын циклден кейін басқару кірісін жаңартатын итеративті оқыту механизмімен біріктіреді. Цилиндрлік аккумуляторды зарядтау процесінің жеңілдетілген MATLAB моделі заряд күйінің динамикасын, ішкі кедергіні, қысқыш кернеуді бағалауды, атқарушы құрылғының қанығуын және қайталанатын шекті уақыттық сынақ аралығын ескере отырып жасалды. Модельдеу контроллердің бірнеше цикл бойындағы жауабын бағалайды және токты қадағалау, кернеу әрекеті, басқару әсері, заряд күйі және қателіктің жинақталуы мен азаюын талдайды. Нәтижелер PID-типті ILC қайталанатын циклдер барысында қадағалау қатесін азайтып, зертханалық аккумуляторлық сынақтардың қайталанғыштығын жақсарта алатынын көрсетеді. Бұл әдіс көптеген элементтер ұқсас хаттамалар бойынша тексерілетін автоматтандырылған сапаны бақылау желілері үшін ерекше маңызды. Ұсынылған модельдеу нақты аккумуляторлық сынақ стендінде эксперименттік іске асыруға дейінгі алдын ала цифрлық модель ретінде қызмет ете алады.

Түйін сөздер: *цилиндрлік аккумуляторлық элемент, PID басқару, итеративті оқытушы басқару, зертханалық сынау, зарядтауды модельдеу, MATLAB, аккумулятор сапасын бақылау, жаңартылатын материалдар.*

Information about authors

Shynybek Nakhypbekuly Uali – Student, Department of Mathematical Computer Modeling, Faculty of Computer Technology and CyberSecurity, International IT University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: ualishynybek@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-6180-3990.

Aknur Berdibayevna Seisenova – PhD, Scientific Center for New Technologies, AlAkSan, Almaty, Kazakhstan; e-mail: z_aknura@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8981-307X.

Omirzak Sembiuly Kapizov – Scientific Center for New Technologies, AlAkSan, Almaty, Kazakhstan; e-mail: ok-sir@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1979-7625.

Dauren Kabdrakimovich Mukhanov* – Department of Chemistry and Chemical Technology, Al-Farabi Kazakh National University, Center for Advanced Science and Technology, Almaty, Kazakhstan; e-mail: dd_511@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-1645-8625.

Kalima Rakhymbekkyzy Manap – Researcher, Scientific Center for New Technologies, AlAkSan, Almaty, Kazakhstan; e-mail: amanatglobalhalima@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8397-8375.

Сведения об авторах

Шыныбек Нахыпбекулы Уали – студент, кафедра математического и компьютерного моделирования, факультет компьютерных технологий и Кибербезопасности, Международный университет информационных технологий, Алматы, Казахстан; e-mail: ualishynybek@gmail.com ; ORCID: https://orcid.org/0009-0003-6180-3990.

Акнур Бердибаевна Сейсенова – PhD, Scientific Center for New Technologies, AlAkSan, Алматы, Казахстан; e-mail: z_aknura@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8981-307X.

Омирзак Сембиулы Капизов – Scientific Center for New Technologies, AlAkSan, Алматы, Казахстан; e-mail: ok-sir@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1979-7625.

Даурен Кабдракимович Муханов* – докторант факультета химии и химической технологии, Казахского национального университета имени аль-Фараби, Center for Advanced Science and Technology, Алматы, Казахстан; e-mail: dd_511@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-1645-8625.

Қалима Рахымбеккызы Манап – научный сотрудник, ТОО «Scientific Center for New Technologies», AlAkSan, Алматы, Казахстан, e-mail: amanatglobalhalima@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8397-8375.

Авторлар туралы мәліметтер

Шыныбек Нахыпбекұлы Уали – студент, Математикалық және компьютерлік модельдеу кафедрасы, Компьютерлік технологиялар және киберқауіпсіздік факультеті, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті, Алматы, Қазақстан; e-mail: ualishynybek@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-6180-3990.

Акнур Бердибаевна Сейсенова – PhD, Scientific Center For New Technologies; AlAkSan, Алматы, Қазақстан; e-mail: z_aknura@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8981-307X.

Өмірзақ Сембіұлы Қапизов – Scientific Center For New Technologies; AlAkSan, Алматы, Қазақстан; e-mail: ok-sir@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1979-7625.

Даурен Кабдракимович Муханов* – химия және химиялық технология факультетінің, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің докторанты, Center for Advanced Science and Technology, Алматы, Қазақстан; e-mail: dd_511@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-1645-8625.

Калима Рахымбекқызы Манап – ғылыми қызметкер, «Scientific Center for New Technologies» ЖШС, AlAkSan, Алматы, Қазақстанж; e-mail: amanatglobalhalima@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8397-8375.

Received 01.06.2026
Revised 10.09.2026
Accepted 14.09.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-30

ГРНТИ: 28.23.15

CC BY 4.0
Check for updates

Ш.Ж. Сеилов[1], Б.Ш. Журсинбек[1], А.А. Кременчуцкий[1], С.Ж. Казыбаева[2], А.К. Майданов[1]*
[1]Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева,
010008, Республика Казахстан, г. Астана, ул. К. Сатпаева, 2
[2]ТОО «Казахский НИИ плодоовощеводства»,
050060, Республика Казахстан, г. Алматы, проспект Гагарина, 238/5
*e-mail: makeadil@mail.ru

МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УРОЖАЙНОСТИ ЯБЛОНЕВЫХ САДОВ

Аннотация: *Прогнозирование урожайности яблоневых садов в горно-предгорных зонах Казахстана остаётся открытой задачей: классические агрономические методы субъективны, а методы компьютерного зрения требуют репрезентативных обучающих выборок, отсутствующих для региона. Предложены архитектура информационной системы прогнозирования урожайности и её интерпретируемое полумеханистическое расчётное ядро для сорта Апорт (Malus domestica cv. Aport) в микрозоне предгорий Заилийского Алатау. Ядро реализовано как четырёхзвенный*

©Ш.Ж. Сеилов, Б.Ш. Журсинбек, А.А. Кременчуцкий, С.Ж. Казыбаева, А.К. Майданов, 2026

фенологический каскад (цветение, завязывание плодов, рост плода, формирование урожая); каждый параметр снабжён явным провенансом, диапазоном неопределённости и оценкой структурной идентифицируемости, а логистическая функция роста плода в текущей версии в итоговое уравнение урожайности не входит, оставаясь перспективным модулем. По результатам Монте-Карло-оценки неопределённости и анализа чувствительности изменение базовой температуры на 1°C смещает расчётную дату начала цветения на 5-8 суток, тогда как разброс расчётной урожайности определяется преимущественно завязываемостью и структурой насаждения. Демонстрационный прогон на данных хозяйства «Алмалы» (Алматинская область) даёт 11,05 т/га при 95% интервале параметрической неопределённости ± 2,15 т/га; он выполнен при параметризации по одной полевой точке (n = 1) и не является независимо валидированным производственным прогнозом. Архитектура рассматривается как основа для последующей интеграции в цифровой двойник сада.

Ключевые слова: *яблоня, апорт, полумеханистическая модель, прогноз урожайности, фенологический каскад, анализ чувствительности, структурная идентифицируемость, цифровой двойник сада.*

Введение

Прогнозирование урожайности яблони обслуживает планирование объёмов хранения, логистики и сбыта, оценку потребности в рабочей силе и управление прореживанием [1, 2]; типовой горизонт оперативного прогноза составляет 6-8 недель до уборки, что требует непрерывного сбора разнородных данных и автоматизированного расчёта в контуре системы поддержки принятия решений [3, 4]. Для предгорной зоны Заилийского Алатау задача осложняется высотным градиентом 700-1700 м, создающим изменчивость температурных сумм (даты начала цветения в соседних кварталах различаются на 7-10 суток), микроклиматической мозаикой склонов и отсутствием многолетних калиброванных рядов наблюдений в открытом доступе; климатические изменения дополнительно снижают надёжность оценок по многолетним нормам [5].

Сорт Апорт (Malus domestica cv. Aport) исторически районирован в регионе и является предметом программы восстановления промышленных насаждений; его подвойно-привойные комбинации и генетическое положение изучались в рецензируемой литературе [6-8], однако специализированных механистических моделей урожайности Апорта для предгорного микроклимата не представлено. Цель работы – разработать архитектуру информационной системы прогнозирования урожайности сада и её интерпретируемое полумеханистическое расчётное ядро, пригодные к работе при разреженных наблюдениях, охарактеризовать параметрическую неопределённость и чувствительность ядра и сформулировать протокол его независимой валидации. Новизна состоит в параметризации модели урожайности Апорта с явным провенансом каждого параметра и оценкой его структурной идентифицируемости и в интеграции ядра в многослойную информационную систему. Приведённый ниже прогон является демонстрационным, выполнен при n = 1 и не является производственным прогнозом.

Условия и методы исследования

Объект – квартал яблоневого сада хозяйства «Алмалы» (ТОО «Казахский НИИ плодоовощеводства», Алматинская область), сорт Апорт на полукарликовом подвое, возраст около 15 лет, схема посадки 5,0 × 3,0 м. Метеоданные – суточные ряды температуры воздуха и сумм осадков метеостанции «Алмалы» за январь-октябрь 2025 г. Дата начала цветения регистрировалась визуально (≥ 50 % раскрытых цветков, ± 1 сут), числа цветков Nfl и плодов Nfr – на 30 модельных деревьях (погрешность ≈ ± 15 %), средняя масса плода Wharvest – взвешиванием выборки ≥ 200 плодов товарной фракции. Наблюдения сезона 2025 г.: цветение – 3 мая; Nfl ≈ 2200; Nfr ≈ 71; уборка – 25 сентября; Wharvest = 235 г; осадки периода роста плода – 218 мм. Расчёты выполнены на суперкомпьютере PARAM BILIM ЕНУ им. Л.Н. Гумилёва.

Существующие подходы к прогнозу урожая сада разделяются на несколько классов [1, 2]. Классический агрономический прогноз (произведение числа деревьев, числа плодов на дерево и средней массы плода) интерпретируем, но субъективен и не разрешает временную динамику: его сомножители становятся известны слишком поздно для решений о прореживании. Оценка по объёму кроны средствами лазерного сканирования [9, 10] опирается на допущение о постоянстве коэффициента продуктивности, что для склонного к

альтернансу Апорта является упрощением. Методы компьютерного зрения на базе детекторов YOLO и Mask R-CNN [11] требуют репрезентативных обучающих наборов, отсутствующих для региона: предобученные веса получены на насаждениях с иной геометрией кроны, поэтому без доменной адаптации их перенос даёт систематическое смещение. Цифровой двойник сада [4, 12] – среда интеграции, которой необходимо интерпретируемое механистическое ядро, а системные модели продукционного процесса (APSIM, DSSAT, WOFOST, STICS) параметризованы для однолетних культур. Поэтому базовым слоем системы принято полумеханистическое ядро с явным провенансом параметров.

Архитектура расчётного ядра: фенологический каскад

Ядро реализует четырёхзвенный фенологический каскад, последовательно описывающий цветение, завязывание плодов, рост плода и формирование урожая (рис. 1). Декомпозиция на звенья с независимыми параметрами обеспечивает модульную калибровку по мере поступления полевых данных, атрибуцию расхождений расчёта с фактом конкретному звену (заморозки нарушают звено завязываемости, засуха – звено роста плода) и отображение каждого звена в отдельный сервис цифрового двойника [4]. Архитектура является полумеханистической гибридной: накопление сумм активных температур и логистический рост плода механистичны, итоговая поправка массы плода феноменологична.

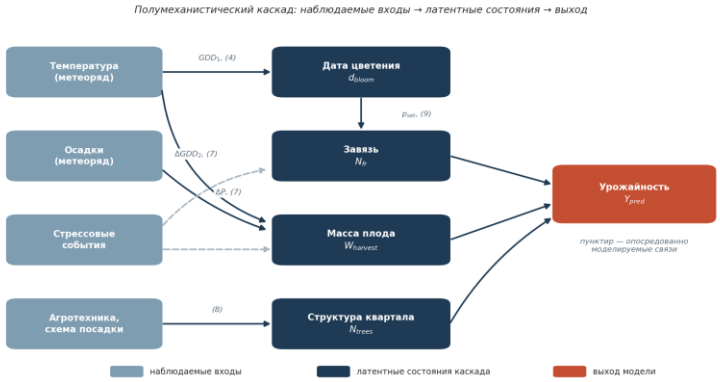


Рисунок 1 – Структурная схема фенологического каскада

Цветение. Начало цветения определяется накоплением суммы активных температур (Growing Degree Days, GDD) выше базовой температуры Tb (1):

$$\mathrm{GDD} = \sum_{d=d_0}^{d_{\mathrm{bloom}}} \max\left(T_{\mathrm{mean,d}} - T_{\mathrm{b}}, 0\right) \qquad (1)$$

где Tmean,d – среднесуточная температура; суммирование ведётся от даты старта накопления d0 до даты начала цветения dbloom. Литературные значения Tb для Malus domestica составляют 4,0-5,5 °C [13, 14]; ввиду отсутствия локальных оценок диапазон расширен до 6,0 °C, что определяет важность анализа чувствительности к этому параметру. Блок накопления часов охлаждения не включён: потребность яблони в охлаждении здесь, по экспертной оценке, удовлетворяется в большинстве лет, а локальные измерения отсутствуют [15].

Завязывание плодов. Коэффициент удержания pset – доля цветков, перешедших в товарный плод, – интегрирует эффективность опыления, оплодотворение завязей и две волны естественной осыпи [16]; он задаётся на цветок и при 2000-3000 цветков на дерево составляет по литературе 2,5-4,5%. В настоящей версии pset принят константой с диапазоном неопределённости и не реализован как функция погодных переменных; это одно из основных упрощений модели.

Рост плода. Рост массы плода описывается трёхпараметрической логистической функцией (2):

$$W(t) = \frac{W_{\max}}{1 + \exp\left(-k(t - t_0)\right)} \qquad (2)$$

, где Wmax – асимптотическая масса плода (г), k – параметр скорости роста (сут$^{-1}$), t0 – точка перегиба. Для Апорта Wmax = 180-300 г, k = 0,03-0,06 сут$^{-1}$ по близкородственным крупноплодным сортам [18]; асимметричные кривые (Ричардса, гибкая сигмоида) требуют четвёртого параметра, неидентифицируемого при одной сезонной кривой [17]. Статус блока

оговаривается явно: соотношение (2) даёт внутрисезонную траекторию накопления массы для промежуточных оценок на произвольную дату, однако масса плода на дату уборки задаётся соотношением (3), поэтому Wmax, k и t0 в итоговое уравнение (6) не входят и в расчёте урожайности не участвуют. Логистический блок является, таким образом, не действующим звеном текущего расчёта, а перспективным модулем; его замыкание на (3) отнесено к дальнейшей работе.

Поправка средней массы плода. Масса плода при уборке корректируется линейной функцией метеорологических аномалий сезона (3):

$$W_{\text{harvest}} = a_0 + a_1 \cdot \Delta\text{GDD}_2 + a_2 \cdot \Delta P \quad (3)$$

, где a0 – базовая масса плода при климатической норме, ΔGDD2 и ΔP – отклонения суммы активных температур периода роста плода и суммы осадков от многолетних норм (1800 °C·сут и 209 мм). Использование аномалий удерживает поправочные члены в физически разумных пределах. При n = 1 коэффициенты a0, a1, a2 заданы как априорные оценки на основе моделей-аналогов и не являются результатом локальной подгонки.

Структура квартала и итоговое уравнение. Число деревьев на гектар определяется схемой посадки (4):

$$N_{\text{trees}} = \frac{10^4}{d_{\text{row}} \cdot d_{\text{tree}}} \quad (4)$$

, где drow — междурядье, dtree – расстояние в ряду (м). Среднее число плодов на дерево раскрывается через субмодели цветения и завязываемости (5):

$$N_{\text{fr}} = N_{\text{fl}} \cdot p_{\text{set}} \quad (5)$$

, где Nfl — среднее число цветков на дерево; при прямом полевом учёте Nfr наблюдается непосредственно. Расчётная урожайность квартала (т/га) вычисляется по уравнению (6):

$$Y_{\text{pred}} = N_{\text{trees}} \cdot N_{\text{fr}} \cdot W_{\text{harvest}} \cdot 10^{-6} \quad (6)$$

, где множитель 10−6 переводит граммы в тонны. Обозначения пояснены при первом употреблении и используются единообразно во всём тексте; сводный глоссарий приведён в online-приложении.

Параметризация с явным провенансом и распределения параметров

Каждый параметр сопровождается источником (Л – литература, П – полевые данные, Э – экспертная оценка), центральным значением с диапазоном неопределённости, типом распределения и уровнем критичности (табл. 1). Для параметров с известным центральным значением использовано нормальное распределение, усечённое границами диапазона, с σ, равным одной шестой ширины диапазона; для параметров, о которых известен только диапазон (прежде всего a0, a1, a2), – равномерное распределение как наименее информативное. Параметры с пометкой «критический» — первоочередные цели полевой программы 2026-2027 гг.

Таблица 1 – Параметризация модели для Апорта и распределения параметров при Монте-Карло-моделировании

Параметр	Ед.	Центр	Диапазон	Распределение	Ист.	Критичность
Tb	°C	4,5	4,0-6,0	усеч. норм., σ = 0,33	Л	критический
GDD1	°C·сут	350	280-420	усеч. норм., σ = 23	Л+Э	средний
GDD2	°C·сут	1850	1600-2100	усеч. норм., σ = 83	Л+Э	средний
pset	–	0,032	0,025-0,045	усеч. норм., σ = 0,0033	Л+Э	критический
Nfl	шт	2200	1500-3000	усеч. норм., σ = 250	П+Э	средний
Wmax	г	240	180-300	усеч. норм., σ = 20	Л+П	средний
k	сут$^{-1}$	0,045	0,03-0,06	равномерное	Л	низкий
t0	сут	65	55-75	равномерное	Л	низкий
a0	г	230	200-260	равномерное (prior)	Л+Э	критический
a1	г/(°C·сут)	0,025	0,010-0,040	равномерное (prior)	Л+Э	критический
a2	г/мм	0,30	0,10-0,50	равномерное (prior)	Л+Э	критический
drow	м	5,0	4,5-6,0	усеч. норм., σ = 0,25	П	низкий
dtree	м	3,0	2,5-3,5	усеч. норм., σ = 0,17	П	низкий
P	мм	218	150-320	усеч. норм., σ = 28	П	низкий

Примечание: GDD1 – сумма активных температур от старта накопления до начала цветения, GDD2 – от начала цветения до уборки. «Э» – экспертная оценка авторов; «усеч. норм.» – нормальное распределение, усечённое границами диапазона. Диапазоны отражают разброс правдоподобных значений по кварталам и сезонам микрозоны, поэтому оценка неопределённости консервативна.

Идентифицируемость параметров при n = 1 различна. Геометрия схемы посадки (drow, dtree, Ntrees) и число плодов Nfr определяются прямым полевым учётом. Базовая температура Tb идентифицируема слабо: единственная наблюдённая дата цветения не позволяет отделить Tb от даты старта накопления d0. Коэффициенты a0, a1, a2 (три параметра при одной точке) и pset как функция погоды структурно неидентифицируемы и заданы априорно.

Уравнение (6) детерминировано при фиксированных параметрах; распределение расчётной урожайности получено маргинализацией методом Монте-Карло (N = 10 000 итераций, seed = 20250925, розыгрыш из распределений таблицы 1 и полный прогон каскада на каждой итерации). Параметры разыгрываются независимо, поскольку при n = 1 корреляционная структура из данных не оценивается; отрицательные связи (Nfl-pset, Nfr-Wharvest, Tb-GDD1) уменьшают дисперсию произведения, поэтому допущение независимости даёт консервативную оценку. Интервал охватывает только параметрическую неопределённость и не включает структурную, поэтому именуется 95 % интервалом параметрической неопределённости (ИПН), а не доверительным интервалом. Анализ чувствительности выполнен в скрининговой постановке; глобальная декомпозиция дисперсии методами Соболя или Морриса [19] отнесена к байесовскому этапу.

Различаются три режима использования модели: P1 – диагностический прогон по фактическим данным, проверяющий согласованность звеньев каскада и корректность единиц; P2 – демонстрационное моделирование по априорным параметрам таблицы 1, дающее Ypred с 95% ИПН и результаты анализа чувствительности; P3 – независимый прогноз до уборки по параметрам, откалиброванным на независимых сезонах и кварталах. Работа выполнена в режимах P1 и P2; режим P3 не выполнялся, и ни одна из приведённых ниже величин производственным прогнозом не является.

Работоспособность архитектуры и точность прогноза – разные утверждения. Для независимой валидации (режим P3) заранее фиксируется набор метрик на независимой выборке: MAE и RMSE в т/га, MAPE и коэффициент детерминации R^2, поскольку отчёт по одной метрике допускает неоднозначную интерпретацию [20, 21]. При n = 1 ни одна из них статистически не определена: MAE и RMSE вырождаются в модуль единичного отклонения, R^2 не определён при нулевой межобъектной дисперсии. Программа валидации 2026-2027 гг. предусматривает не менее трёх хозяйств по три квартала с разной экспозицией и высотой, не менее двух сезонов, перекрёстную проверку leave-one-orchard-out и leave-one-season-out, фиксацию прогноза за 6-8 недель до уборки и ориентиры MAPE не более 15% при покрытии 95% ИПН не ниже 0,90; развёрнутый протокол приведён в online-приложении.

Архитектура информационной системы и программная реализация

Расчётное ядро – лишь один из слоёв системы. Информационная система построена как четырёхслойная архитектура (рис. 2), в которой каждый слой имеет свою зону ответственности, темп обновления и определённый интерфейс к соседним слоям [3, 22]. Программно реализовано расчётное ядро (слой L3); слои L1, L2 и L4 описаны на уровне проектных решений и интерфейсов, их развёртывание входит в программу работ 2026-2027 гг.

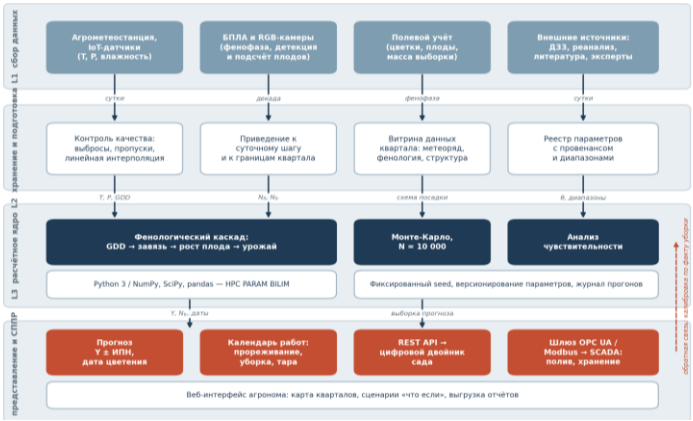


Рисунок 2 – Архитектура информационной системы прогнозирования урожайности яблоневого сада

L1 – сбор данных: агрометеостанция и IoT-датчики температуры, осадков и влажности с суточным темпом опроса, съёмка БПЛА и стационарные RGB-камеры для датировки фенофаз, полевой учёт через мобильное приложение агронома, данные дистанционного зондирования [22]. L2 – хранение и подготовка данных: контроль качества, приведение рядов к единому суточному шагу и к границам квартала, ведение реестра параметров; ключевое проектное решение – отделение реестра от кода модели, при котором параметр хранится вместе с источником, диапазоном, типом распределения и датой обновления, что делает параметризацию версионируемой. L3 – расчётный слой: фенологический каскад, модуль Монте-Карло и модуль анализа чувствительности. L4 – представление и поддержка решений: прогноз Ypred с интервалом ИПН, расчётная дата цветения, календарь агротехнических работ, REST API для цифрового двойника сада и шлюз OPC UA/Modbus для систем автоматизации полива, сортировки и хранения [11, 12]. Пунктирная обратная связь на рисунке 2 – контур калибровки: данные уборки возвращаются в реестр параметров. Обмен между слоями организован в форматах CSV и JSON.

Программная реализация. Ядро реализовано на языке Python 3 (NumPy, SciPy, pandas); Монте-Карло-прогон векторизован и выполнен на суперкомпьютере PARAM BILIM. Порядок вычислений: контроль качества метеоряда; накопление GDD до порога GDD1 и определение dbloom по (1); расчёт Nfr по (5) либо подстановка из полевого учёта; накопление GDD2 и расчёт аномалий ΔGDD2, ΔP; расчёт Wharvest по (3); расчёт Ntrees по (4) и Ypred по (6). Воспроизводимость обеспечивается фиксированным зерном генератора, версионированием реестра параметров и журналом прогонов с контрольными суммами входных файлов; псевдокод алгоритмов приведён в online-приложении.

Результаты исследований

Базовая температура Tb – наиболее критичный параметр для предгорного микроклимата: в начале вегетации среднесуточная температура часто колеблется в диапазоне 3-7°C, и небольшое смещение порога резко изменяет число «активных» суток. При вариации Tb в диапазоне 3,0-6,0°C с шагом 0,5°C по метеоряду сезона 2025 г. расчётная дата начала цветения смещается с 25 апреля (Tb = 3,0 °C) до 14 мая (Tb = 6,0°C), а расчётная урожайность изменяется от 12,3 до 9,7 т/га относительно базовых 11,05 т/га при Tb = 4,5°C: смещение даты цветения при фиксированной дате уборки изменяет продолжительность периода роста плода, вследствие чего пересчитываются GDD2 и аномалия ΔGDD2, а через (3) – масса плода и урожайность по (6). Изменение Tb на 1°C смещает расчётную дату цветения на 5-8 суток, а урожайность – примерно на 7,5%.

Скрининговый анализ типа «один-за-раз» по пяти агрегированным факторам, входящим в (6) либо однозначно определяющим его сомножители (Nfl, pset, Ntrees = 476-889 дер./га, Wharvest = 200-270 г и Tb = 3,0-6,0°C), показывает, что разброс расчётной урожайности определяется преимущественно завязываемостью и структурой насаждения, тогда как абсолютный вклад Tb умеренный. Параметры логистической кривой Wmax, k и t0 в анализ не включены, поскольку в текущей версии не входят в (6). Без локальной калибровки Tb связанный с ним разброс составляет около ± 7,5 %, поэтому модуль автоматической детекции даты начала цветения (RGB-камеры либо БПЛА) имеет приоритет № 1 в инструментальном оснащении хозяйства.

Демонстрационный прогон каскада

Демонстрационный прогон (режим P2) выполнен на реальных входных данных одной полевой точки – квартала хозяйства «Алмалы», сезон 2025 г.; промежуточные выходы звеньев каскада приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Промежуточные выходы звеньев каскада при демонстрационном прогоне

Звено каскада	Выход	Значение
Цветение	Накопленная сумма GDD	343 °C·сут к 1 мая; порог GDD1 = 350 °C·сут достигнут 3 мая
Завязь	Число плодов на дерево Nfr	70,4 (расч. по (5)); 71 (полевой учёт)
Рост плода	GDD2 цветение–уборка	1850 °C·сут
Рост плода	Wharvest по (3)	234 г (наблюдено 235 г)
Урожай	Ntrees по (4)	667 дер./га
Итог	Ypred (среднее Монте-Карло-выборки)	11,05 т/га

Распределение расчётной урожайности оценено методом Монте-Карло (N = 10 000): Ypred = 11,05 ± 2,15 т/га при границах 95 % ИПН [7,1; 15,6] т/га, то есть около ± 39 % от центрального значения, что отражает априорный характер большинства параметров при n = 1; итоговая величина является средним выборки, а не произведением округлённых значений таблицы 2. Отклонения расчётных величин от наблюдённых для того же квартала и сезона составили: дата начала цветения – 0 сут; Nfr – 0,6 шт/дерево (0,8 %); Wharvest – 1 г (0,4 %); урожайность – 0,08 т/га (0,7 %; 11,05 против оценки 11,13 т/га по фактическим Ntrees = 667 дер./га, Nfr = 71 шт и Wharvest = 235 г). Все отклонения относятся к той единственной точке, по которой задана параметризация, поэтому характеризуют внутреннюю согласованность модели, но не являются метриками прогностической точности: совпадение даты цветения – слабая проверка при априорных Tb и GDD1; отклонение по Wharvest квазинезависимо, поскольку a0, a1, a2 под эту точку не подгонялись; отклонение по урожайности независимой проверкой не является, так как Ntrees и Nfr служат общими входами расчёта и оценки. При погрешности полевого учёта ≈ ± 15 % для Nfr согласие на уровне долей процента само по себе не свидетельствует о высокой точности модели.

Обсуждение

Работа устанавливает воспроизводимую базовую линию: структуру информационной системы и расчётного ядра с задокументированными параметрами, указанными источниками и количественно охарактеризованной параметрической неопределённостью. Звенья каскада корректно передают значения по цепочке, промежуточные величины остаются в физически допустимых пределах, расчётная дата цветения совпала с наблюдённой, а расчётная масса плода отличается от наблюдённой на 1 г. Не показано и в рамках имеющихся данных показано быть не может: прогностическая точность на независимой выборке, устойчивость между сезонами и объектами и пригодность для производственного планирования. Полумеханистическое ядро занимает промежуточное место между классическим агрономическим прогнозом и методами компьютерного зрения и цифровых двойников: оно сохраняет интерпретируемость и оперативность при средних требованиях к данным и позволяет атрибутировать выходы модулей машинного обучения физическим факторам.

Ограничения. Параметризация по одной полевой точке обусловливает высокую параметрическую неопределённость (± 39 %) и неопределимость метрик точности. Константный pset не учитывает заморозки и дефицит опылителей; коэффициенты поправки массы плода априорны, а сама поправка феноменологична, поэтому вне диапазона наблюдённых условий возможно смещение. Симметричная логистическая кривая не воспроизводит асимметрию реального роста [17], отсутствие многолетнего ряда не разрешает альтернанс, скрининговый анализ чувствительности не разлагает дисперсию выхода [19], а метеоряд по одной станции не описывает микроклиматическую неоднородность склонов, учёт которой требует собственных агрометеостанций хозяйств [22] и данных дистанционного зондирования [2].

Дальнейшая работа предполагает переход от константного pset к его зависимости от погодных переменных периода цветения, замену логистической кривой кривой Ричардса с замыканием этого блока на расчёт Wharvest [17, 18], включение блока накопления холода [5, 15], байесовскую оценку параметров с корреляционной структурой и глобальный анализ чувствительности [19]. Главным направлением является многоточечная полевая программа 2026-2027 гг., которая позволит впервые вычислить метрики точности на независимой выборке.

Заключение

Предложена четырёхслойная архитектура информационной системы прогнозирования урожайности яблоневого сада с определёнными источниками и потоками данных, алгоритмом работы расчётного ядра и интерфейсами интеграции с IoT-датчиками, агрометеостанциями, БПЛА, цифровым двойником сада и системами промышленной автоматизации. Расчётным ядром служит интерпретируемая полумеханистическая модель урожайности сорта Апорт – четырёхзвенный фенологический каскад с явным провенансом каждого параметра, оценкой структурной идентифицируемости и документированными распределениями. Показана высокая чувствительность фенологической датировки к базовой температуре (1°C соответствует смещению расчётной даты цветения на 5-8 суток) и установлено, что разброс

расчётной урожайности определяется преимущественно завязываемостью, числом цветков и плотностью насаждения. Демонстрационный прогон (11,05 т/га; 95 % ИПН [7,1; 15,6] т/га) выполнен при n = 1, подтверждает внутреннюю согласованность архитектуры, но не её прогностическую точность; для перевода результата в статус производственного прогноза сформулирован протокол независимой валидации с метриками MAE, RMSE, MAPE и R^2, реализация которого запланирована на 2026-2027 гг. Архитектура рассматривается как основа для последующей интеграции расчётного ядра в цифровой двойник сада.

Дополнительные материалы (online-приложение). Глоссарий переменных; таблица и графики одномерного анализа чувствительности к Tb; диаграмма «торнадо»; распределение Ypred по результатам Монте-Карло-моделирования; развёрнутый протокол независимой валидации; структура потоков данных; сравнение параметров Апорта и сортов-аналогов; сравнение подходов к прогнозированию; псевдокод алгоритмов расчётного ядра.

Список литературы

1. Fruit yield prediction and estimation in orchards: a state-of-the-art comprehensive review for both direct and indirect methods / L. He et al // Computers and Electronics in Agriculture. – 2022. – Vol. 195. – Art. 106812. https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106812.
2. Tree crop yield estimation and prediction using remote sensing and machine learning: a systematic review / C. Trentin et al // Smart Agricultural Technology. – 2024. – Vol. 9. – Art. 100556. https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100556.
3. Decision support systems for agriculture 4.0: survey and challenges / Z. Zhai et al // Computers and Electronics in Agriculture. – 2020. – Vol. 170. – Art. 105256. https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105256.
4. Digital twins in smart farming / C. Verdouw et al // Agricultural Systems. – 2021. – Vol. 189. – Art. 103046. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.103046.
5 Unusually warm winter seasons may compromise the performance of current phenology models – predicting bloom dates in young apple trees with PhenoFlex / E. Fernandez et al // Agricultural and Forest Meteorology. – 2022. – Vol. 322. – Art. 109020. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.109020.
6. Identifying fire blight-resistant Malus sieversii rootstocks grafted with cultivar «Aport» using monitoring data / A. Taskuzhina et al // Horticulturae. – 2024. – Vol. 10, № 10. – Art. 1052. https://doi.org/10.3390/horticulturae10101052.
7. Apple varieties from Kazakhstan and their relation to foreign cultivars assessed with RosBREED 10K SNP array / D. Gritsenko et al // European Journal of Horticultural Science. – 2022. – Vol. 87, № 1. – Art. 6. https://doi.org/10.17660/eJHS.2022/006.
8. Genetic diversity of apple cultivars growing in Kazakhstan / M.E. Omasheva et al // Russian Journal of Genetics. – 2018. – Vol. 54, № 2. – P. 176-187. https://doi.org/10.1134/S1022795418020138.
9. Lidar-based tree recognition and platform localization in orchards / J.P. Underwood et al // Journal of Field Robotics. – 2015. – Vol. 32, № 8. – P. 1056-1074. https://doi.org/10.1002/rob.21607.
10. Mapping almond orchard canopy volume, flowers, fruit and yield using lidar and vision sensors / J.P. Underwood et al // Computers and Electronics in Agriculture. – 2016. – Vol. 130. – P. 83-96. https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.09.014.
11. Sapkota R. Comparing YOLOv8 and Mask R-CNN for instance segmentation in complex orchard environments / R. Sapkota, D. Ahmed, M. Karkee // Artificial Intelligence in Agriculture. – 2024. – Vol. 13. – P. 84-99. https://doi.org/10.1016/j.aiia.2024.07.001.
12. Digital twins in agriculture and forestry: a review / A.C. Tagarakis et al // Sensors. – 2024. – Vol. 24, № 10. – Art. 3117. https://doi.org/10.3390/s24103117.
13. A comprehensive overview of the spatial and temporal variability of apple bud dormancy release and blooming phenology in Western Europe / J.-M. Legave et al // International Journal of Biometeorology. – 2013. – Vol. 57, № 2. – P. 317-331. https://doi.org/10.1007/s00484-012-0551-9.
14. Agroclimatic requirements and phenological responses to climate change of local apple cultivars in northwestern Spain / A. Delgado et al // Scientia Horticulturae. – 2021. – Vol. 283. – Art. 110093. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110093.

15. Petri J.L. Consequences of insufficient winter chilling on apple tree bud-break / J.L. Petri, G.B. Leite // Acta Horticulturae. – 2004. – Vol. 662. – P. 53-60. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2004.662.4.
16. Sheffield C.S. Perfect syncarpy in apple (Malus × domestica «Summerland McIntosh») and its implications for pollination, seed distribution and fruit production (Rosaceae: Maloideae) / C.S. Sheffield, R.F. Smith, P.G. Kevan // Annals of Botany. – 2005. – Vol. 95, № 4. – P. 583-591. https://doi.org/10.1093/aob/mci058.
17. A flexible sigmoid function of determinate growth / X. Yin et al // Annals of Botany. – 2003. – Vol. 91, № 3. – P. 361-371. https://doi.org/10.1093/aob/mcg029.
18. Fruit growth patterns of four apple cultivars using nonlinear growth models / P. Zadravec et al // European Journal of Horticultural Science. – 2014. – Vol. 79, № 2. – P. 52-59. https://doi.org/10.1079/ejhs.2014/4258554.
19. Sensitivity analysis of environmental models: a systematic review with practical workflow / F. Pianosi et al // Environmental Modelling & Software. – 2016. – Vol. 79. – P. 214-232. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.02.008.
20. Chicco D. The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation / D. Chicco, M.J. Warrens, G. Jurman // PeerJ Computer Science. – 2021. – Vol. 7. – Art. e623. https://doi.org/10.7717/peerj-cs.623.
21. Saldaña-Villota T.M. Comparison of statistical indices for the evaluation of crop models performance / T.M. Saldaña-Villota, J.M. Cotes-Torres // Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín. – 2021. – Vol. 74, № 3. – P. 9675-9684. https://doi.org/10.15446/rfnam.v74n3.93562.
22. The potential of low-cost IoT-enabled agrometeorological stations: a systematic review / C.M. Al Kalaany et al // Sensors. – 2025. – Vol. 25, № 19. – Art. 6020. https://doi.org/10.3390/s25196020.

Благодарность:

Финансирование. Работа выполнена в рамках программы грантового финансирования научных исследований (№ AP 23488699). Источник финансирования не участвовал в проектировании модели, анализе данных и подготовке рукописи.

Ш.Ж. Сеилов[1], Б.Ш. Жүрсінбек[1], А.А. Кременчуцкий[1], С.Ж. Қазыбаева[2], А.К. Майданов[1]*

[1]Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ.,
010008, Қазақстан Республикасы, Астана қ., Қ. Сәтбаев көшесі, 2
[2]«Қазақ жеміс-көкөніс шаруашылығы ғылыми-зерттеу институты» ЖШС,
050060, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Гагарин даңғылы, 238/5
*e-mail: makeadil@mail.ru

АЛМА БАҚТАРЫНЫҢ ӨНІМДІЛІГІН БОЛЖАУ ЖҮЙЕСІНІҢ МОДЕЛІ

Қазақстанның таулы және тау бөктеріндегі аймақтарында алма бақтарының өнімділігін болжау өзекті мәселе болып қала береді: дәстүрлі агрономиялық әдістер субъективті, ал компьютерлік көру әдістері өңір үшін қолжетімді емес репрезентативті оқыту деректерін қажет етеді. Жұмыста Іле Алатауының тау бөктеріндегі микрозонаға арналған Апорт сортының (Malus domestica cv. Aport) өнімділігін болжайтын ақпараттық жүйенің архитектурасы және оның түсіндірілетін жартылай механистік есептеу өзегі ұсынылған. Өзек гүлдену, жемістің түйінденуі, жемістің өсуі және өнімнің қалыптасуы кезеңдерін сипаттайтын төрт буынды фенологиялық каскад түрінде іске асырылған; әрбір параметр шығу тегімен, белгісіздік диапазонымен және құрылымдық сәйкестендірілу деңгейімен сипатталған, ал жемістің өсуін сипаттайтын логистикалық функция маусым ішіндегі масса жинақталу траекториясын береді және модельдің қазіргі нұсқасында өнімділіктің қорытынды теңдеуіне кірмей, перспективалық модуль болып қалады. Параметрлік белгісіздік Монте-Карло әдісімен бағаланды: базалық температураның 1°C өзгеруі гүлденудің есептік басталу мерзімін 5-8 тәулікке жылжытады, ал өнімділік болжамының өзгергіштігі негізінен түйіндену коэффициенті мен екпе құрылымына тәуелді. «Алмалы» шаруашылығының (Алматы облысы) деректері бойынша PARAM BILIM суперкомпьютерінде жүргізілген демонстрациялық есептеу 11,05 т/га мәнін және 95 % параметрлік белгісіздік аралығының ± 2,15 т/га шамасын берді; есептеу бір далалық нүкте бойынша параметрленген (n = 1), демонстрациялық сипатта және тәуелсіз валидацияланған өндірістік болжам емес. Ұсынылған архитектура бақтың цифрлық егізіне кейіннен біріктірудің негізі ретінде қарастырылады.

Түйін сөздер: *алма ағашы, Апорт, жартылай механистік модель, өнімділікті болжау, фенологиялық каскад, сезімталдықты талдау, құрылымдық сәйкестендірілушілік, бақтың цифрлық егізі.*

Sh.Zh. Seilov[1], B.Sh. Zhursinbek[1], A.A. Kremenchutsky[1], S.Zh. Kazybayeva[2], A.K. Maidanov[1]*
[1]L.N. Gumilyov Eurasian National University,
2 K. Satpayev Street, Astana 010008, Republic of Kazakhstan
[2]LLP «Kazakh Research Institute of Fruit and Vegetable Growing»,
238/5 Gagarin Avenue, Almaty 050060, Republic of Kazakhstan
*e-mail: makeadil@mail.ru

MODEL OF A YIELD FORECASTING SYSTEM FOR APPLE ORCHARDS

Yield forecasting for apple orchards in the mountainous and foothill regions of Kazakhstan remains an open challenge: conventional agronomic methods are subjective, while computer vision approaches require representative training datasets that are unavailable for this region. This paper presents the architecture of a yield forecasting information system and its interpretable semi-mechanistic computational core for the regionalized Aport cultivar (Malus domestica cv. Aport) in the foothill microzone of the Trans-Ili Alatau. The core is implemented as a four-stage phenological cascade describing flowering, fruit set, fruit growth and yield formation, with explicit provenance, an uncertainty range and a structural identifiability assessment for every parameter; the logistic fruit growth function describes the within-season trajectory of mass accumulation and, in the present version, does not enter the final yield equation, remaining a prospective module. Parametric uncertainty is propagated by the Monte Carlo method: a one-degree Celsius change in the base temperature shifts the computed flowering date by five to eight days, whereas the variability of the computed yield is governed mainly by the fruit set coefficient and orchard structure parameters. A demonstration run on data from the Almaly farm (Almaty Region), performed on the PARAM BILIM supercomputer, gives 11.05 t/ha with a 95 % parametric uncertainty interval of ± 2.15 t/ha; the run is parameterised from a single field point (n = 1), is illustrative in nature and is not an independently validated operational forecast. The proposed architecture is regarded as a basis for subsequent integration into a digital twin of an orchard.

Key words: *apple tree, Aport, semi mechanistic model, yield forecasting, phenological cascade, sensitivity analysis, structural identifiability, digital twin of an orchard.*

Сведения об авторах

Шахмаран Журсинбекович Сеилов – к.т.н., профессор кафедры компьютерной и программной инженерии, ЕНУ им. Л.Н. Гумилёва, Астана, Казахстан; e-mail: seilov_shzh@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7057-0461.

Бибинур Шахмарановна Журсинбек – докторант кафедры компьютерной и программной инженерии, ЕНУ им. Л.Н. Гумилёва, Астана, Казахстан; e-mail: zhursinbek99@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-4505-470X.

Анатолий Анатольевич Кременчуцкий – к.т.н., директор India-Kazakhstan Centre of Excellence in ICT ЕНУ им. Л.Н. Гумилёва, Астана, Казахстан; e-mail: ankrem@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4179-7880.

Сауле Жамбуловна Казыбаева – к.с.-х.н., академик НААН РК, ТОО «Казахский НИИ плодоовощеводства», Алматинская область, Казахстан. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6833-0466.

Адиль Кокенович Майданов* – магистр, преподаватель кафедры компьютерной и программной инженерии, ЕНУ им. Л.Н. Гумилёва, Астана, Казахстан; e-mail: makeadil@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2392-5164.

Авторлар туралы мәліметтер

Шахмаран Жүрсінбекұлы Сеилов – т.ғ.к., компьютерлік және бағдарламалық инженерия кафедрасының профессоры, Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан; e-mail: seilov_shzh@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7057-0461.

Бибінұр Шахмаранқызы Жүрсінбек – компьютерлік және бағдарламалық инженерия кафедрасының докторанты, Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан; e-mail: zhursinbek99@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-4505-470X.

Анатолий Анатольевич Кременчуцкий – т.ғ.к., Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ-нің India-Kazakhstan Centre of Excellence in ICT директоры, Астана, Қазақстан; e-mail: ankrem@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4179-7880.

Сәуле Жамбылқызы Қазыбаева – а.ш.ғ.к., ҚР ҰААҒА академигі, «Қазақ жеміс және көкөніс шаруашылығы ғылыми-зерттеу институты» ЖШС, Алматы облысы, Қазақстан. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6833-0466.

Адиль Кокенович Майданов* – магистр, компьютерлік және бағдарламалық инженерия кафедрасының оқытушысы, Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан; e-mail: makeadil@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2392-5164.

Information about the authors

Shakhmaran Seilov – Cand. Sc. (Eng.), Professor, Department of Computer and Software Engineering, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; e-mail: seilov_shzh@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7057-0461.

Bibinur Zhursinbek – PhD student, Department of Computer and Software Engineering, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; e-mail: zhursinbek99@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-4505-470X.

Anatoliy Kremenchutskiy – Cand. Sc. (Eng.), Director of the India-Kazakhstan Centre of Excellence in ICT, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; e-mail: ankrem@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4179-7880.

Saule Kazybaeva – Cand. Sc. (Agric.), Academician of the National Academy of Agrarian Sciences of Kazakhstan, LLP «Kazakh Research Institute of Fruit and Vegetable Growing», Almaty Region, Kazakhstan. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6833-0466.

Adil Maidanov* — Master, Lecturer, Department of Computer and Software Engineering, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; e-mail: makeadil@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2392-5164.

Поступила в редакцию 02.06.2026
Поступила после доработки 09.09.2026
Принята к публикации 11.09.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-31

CC BY 4.0
Check for updates

ISTIR: 20.15.05

S. Aibagarov*, D. Marlambekov, A. Mukhanbet
Al-Farabi Kazakh National University,
71 Al-Farabi Ave., Almaty, Republic of Kazakhstan, 050040
*e-mail: awer1307dot@gmail.com

SAC-BASED UPLINK POWER CONTROL IN 5G NR: DEEP REINFORCEMENT LEARNING FOR JOINT THROUGHPUT AND ENERGY EFFICIENCY OPTIMIZATION

Abstract: *In this paper, the application of the Soft Actor-Critic (SAC) approach to uplink power control in 5G New Radio networks is investigated. A Gymnasium-compatible simulator for a 10-user uplink cell is constructed using the 3GPP TR 38.901 Urban Macro NLOS path-loss model with stochastic shadowing and Rayleigh fading at 3.5 GHz. The SAC agent observes SINR, transmit power, and path loss for all users and jointly selects continuous transmit powers in the range [0, 30] dBm. The training reward combines throughput (0.50), an energy-efficiency term (0.25), SINR quality (0.15), and fairness (0.10). Three SAC policies are trained for 500,000 timesteps and evaluated on 100 common scenarios against Full Power, Equal Power, and a simplified 3GPP-inspired Fractional Power Control (FPC) baseline. Using the standard network-level energy-efficiency metric, SAC achieves 14.866 Mbit/J at a mean transmit power of 9.905 dBm and a mean throughput of 2.540 Mbps. Network energy efficiency is significantly higher than Full Power and simplified FPC, while its difference from Equal Power is not statistically significant after multiplicity correction. A reward-weight sensitivity study confirms that changing objective priorities shifts the learned throughput-energy-efficiency operating point rather than yielding one universally dominant configuration.*

Key words: *5G NR, uplink power control, soft actor-critic, energy efficiency, SINR, Jain's fairness index, 3GPP channel model, deep reinforcement learning.*

1. Introduction

The quick development of connected devices in the framework of the 5G NR technology made the problem of radio resource management in the uplink much more complicated. In contrast to downlink scheduling when the gNB can centrally manage the process of transmission, the process of uplink power control implies that each User Equipment should make the decision about its transmit power using partial channel state information. This decentralized character of the problem, interference between users and time varying fading make it one of the most challenging open problem in the sphere of cellular network optimization [1, 2].

©S. Aibagarov, D. Marlambekov, A. Mukhanbet, 2026

On the other hand, there is an opposition between the two objectives of the uplink power control which are maximizing the sum rate and minimizing the total radiated power. The high level of the transmit power will help to increase the receive power of every UE but, at the same time, it will provide more interference for all the others and decrease their SINR. Due to the effect of interference coupling, the use of full transmit power will provide inefficient usage of energy and SINR balancing. The problem will be even more complicated due to the time varying fading channel [3, 4].

The solutions to the above problems offered by classical power control schemes involve using static or parameterized schemes. The scheme Full Power always works in such a way that it uses the maximum possible power P_max which guarantees maximization of throughput rate although results in too much interference. The Equal Power scheme uses an intermediate static value of power resulting in moderate throughput rate but without consideration of channel. The scheme 3GPP Fractional Power Control (FPC) [5] partially solves the problem of path losses but does not consider fast Rayleigh fading and interference [5, 6].

Deep reinforcement learning (DRL) has become a promising framework for adaptive management of resources in wireless communication networks [7, 17]. SAC is one of the DRL algorithms that has proven to be especially effective at solving tasks of a continuous nature, such as power allocation, thanks to its off-policy nature, which allows learning from a replay memory, and its maximum-entropy objective that drives exploration and avoids converging into local minima prematurely [18], [9]. Learning-based techniques have been shown to work effectively in downlink beamforming and spectrum management tasks [10, 11, 19]; however, joint optimization of the parameters mentioned is not yet widely investigated.

There are multiple common issues in existing DRL-based works on power control algorithms. Firstly, most of the previous work uses simplistic channel models without any real-world path loss and, thus, significantly underestimates the heterogeneity between different UEs [12]. Secondly, most of the literature focuses on optimizing just one metric, while in reality, operators have to deal with multiple metrics that may conflict with each other [13, 20]. Finally, the comparison with standard 3GPP benchmarks like FPC is not used in most cases and, therefore, no practical benefit from using DRL can be evaluated [6].

Recent studies further demonstrate the growing use of DRL for power- and resource-control problems. SAC has been applied to joint power and resource allocation in O-RAN-enabled cell-free massive MIMO systems [21], while SAC-based adaptive energy management has also been studied for NB-IoT power-saving control [22]. Other recent work investigates DRL-based power allocation for energy- and spectral-efficiency improvement in dense 5G deployments [23]. These studies confirm the relevance of adaptive learning-based control, but they address different architectures and objectives. The present work is intentionally narrower: it evaluates one continuous-control SAC formulation for joint uplink transmit-power selection in a controlled 3GPP-based simulator against conventional reference strategies rather than providing a comprehensive benchmark of DRL algorithms.

Luong et al. [7] and Ye et al. [14] discuss those issues and point out the need for further research in those areas in their surveys. The main question addressed in this paper is the following: can SAC agent learn a power control algorithm that will be better than Full Power, Equal Power, and FPC benchmarks in energy efficiency and SINR fairness, while still having competitive aggregate throughput, in realistic 3GPP UMa NLOS channel environment?

The scientific novelty of this study lies in combining centralized continuous multi-user power control with a four-objective reward and a reproducible 3GPP-based stochastic channel model, while directly comparing the learned policy with conventional reference power-control strategies under common evaluation scenarios. Unlike studies focused on broader O-RAN slicing, power-saving modes, or multi-algorithm benchmarking, the proposed setup isolates the throughput-energy-efficiency trade-off of joint uplink transmit-power adaptation for ten heterogeneous UEs. The resulting conclusions are therefore restricted to the considered simulator and baselines rather than generalized to all DRL or static power-control methods.

Contributions of this work are as follows. Firstly, we construct a Gymnasium-compatible, simplified interference-coupled uplink power-control scenario based on 3GPP TR 38.901 UMa NLOS path loss at 3.5 GHz, with ten UEs and a 9 MHz effective system bandwidth. Secondly, we design a combined SAC reward with four terms: throughput (0.50), energy efficiency (0.25), SINR quality (0.15), and fairness (0.10), and we additionally evaluate the sensitivity of the learned policy to three

alternative weight settings. Thirdly, three independently trained SAC policies are evaluated on 100 common scenarios against Full Power, Equal Power, and a simplified 3GPP-inspired FPC baseline using standard network energy efficiency and Jain's Fairness Index computed from linear SINR. Finally, we provide paired non-parametric statistical comparisons and seed-level robustness analysis to distinguish mean differences from statistically supported effects.

The rest of the paper is organized as follows. Section 2 introduces system model, MDP and training process. Section 3 discusses experimental results. Section 4 summarizes with suggestions for future work.

2. Methods and Materials

2.1 System Model

We consider a single-cell 5G NR-inspired uplink scenario with one gNB and N = 10 UEs over a total effective bandwidth B = 9 MHz, corresponding to 50 PRBs at 180 kHz each. The simulator does not explicitly schedule orthogonal PRBs among UEs. Instead, it uses a simplified interference-coupled shared-spectrum abstraction: all UEs transmit simultaneously and contribute to the interference term, while B/N is used as the effective per-user bandwidth in the Shannon-rate calculation. Thus, the model is intended as a controlled power-control abstraction rather than a complete NR uplink scheduler. Each UE independently selects its transmit power in the range [0, 30] dBm at every time step. The received SINR at the gNB for UE i is:

$$SINR_i = \frac{P_i G_i}{N_0 + \sum_{j \neq i} P_j G_j} \quad (1)$$

where G_i is the composite channel gain of UE i and N_0 is the thermal noise power. The noise floor is computed as:

$$N_0 = k_B \cdot T \cdot B \cdot NF \quad (2)$$

where k is Boltzmann's constant, T = 290 K, and NF = 9 dB is the receiver noise figure, giving approximately −95.46 dBm over the 9 MHz band. The instantaneous throughput of UE i is modeled using the Shannon capacity formula applied to its effective equal bandwidth share:

$$R_i = \frac{B}{N} \cdot log_2(1 + SINR_i) \ [bps] \quad (3)$$

During training, the energy-efficiency reward term is defined as the aggregate per-user quantity obtained by summing the individual ratios:

$$EE_{agg} = \sum_{i=1}^{N} \frac{R_i}{P_i} \quad (4)$$

where transmit power is converted from dBm to Watts. For performance evaluation, energy efficiency is measured at the network level as:

$$EE_{network} = \frac{\sum_i R_i}{\sum_i P_i} \quad (5)$$

with:

$$P_i[W] = 10^{\frac{P_i[dBm]-30}{10}} \quad (6)$$

The network-level metric is used for all system-level energy-efficiency comparisons reported in this study.

$$EE_i = \frac{R_i}{P_i} \ [bps/W] \quad (7)$$

2.2. Channel Model

The channel is modeled according to the 3GPP TR 38.901 Urban Macro (UMa) NLOS model at f=3.5 GHz [12]. The path loss for user equipment i at distance d_i ∈ [50, 500] is:

$$PL_i = 13.54 + 39.08 \cdot log_{10}(d_i) + 20 \cdot log_{10}(f) - 0.6(h_{UT} - 1.5)\ [dB] \quad (8)$$

where h_{BS} = 25 m and h_{UT} = 1.5 m. The composite linear channel gain per TTI combines three components:

$$G_i = 10^{\frac{-(PL_i + \xi_i)}{10}} \cdot |h_i|^2 \quad (9)$$

where the log-normal shadowing component is distributed as N(0, 8²) dB and the fast-fading component follows a Rayleigh model. Both stochastic channel components are redrawn at each environment step, whereas UE distances are sampled at episode initialization and remain fixed for the 200-step episode. This produces persistent large-scale distance heterogeneity with step-wise stochastic channel variation.

2.3. State Space, Action Space, and Reward

The observation vector s_t is a 30-dimensional normalized feature vector comprising three 10-dimensional blocks per UE:

$$s_t = [SINR_{norm}(10),\ P_{norm}(10),\ PL_{norm}(10)] \in [0,1]^{30} \quad (10)$$

SINR normalization uses the range [−20, 40] dB; power normalization divides by P_{max} = 30 dBm; path-loss normalization spans the range corresponding to d ∈ [50, 500] m. Including path loss allows the agent to distinguish between near and far UEs. The action space A = $[-1,1]^{10}$ is a continuous vector mapped to transmit powers as:

$$P_i = \frac{a_i + 1}{2} \cdot P_{max}\ [dBm] \quad (11)$$

so that a_i = −1 corresponds to 0 dBm and a_i = +1 to 30 dBm. Continuous actions allow fine-grained power adjustments impossible with discrete action spaces [19]. The composite reward at each TTI is:

$$r_t = 0.50 \cdot \tilde{r}_{tp} + 0.25 \cdot \tilde{r}_{ee} + 0.15 \cdot \tilde{r}_{sinr} + 0.10 \cdot Ÿ(SINR) \quad (12)$$

where the normalized throughput and energy efficiency components are:

$$\tilde{r}_{tp} = \frac{\sum R_i}{R_{max}}, \quad \tilde{r}_{ee} = \frac{\sum EE_i}{EE_{max}} \quad (13)$$

and the SINR quality component clips mean SINR (dB) to the practical range [−35, −15] dB:

$$\tilde{r}_{sinr} = clip\left(\frac{\overline{SINR} - (-35)}{-15 - (-35)}, 0, 1\right) \quad (14)$$

with normalization ceilings R_{max} = 5 Mbps and EE_{max} = 500 Mbps/J. The fairness term uses Jain's Fairness Index [15] over per-UE SINR values:

$$Ÿ(SINR) = \frac{(\sum SINR_i)^2}{N \cdot \sum SINR_i^2} \in \left[\frac{1}{N}, 1\right] \quad (15)$$

A value of J = 1 corresponds to perfectly equal SINR distribution across UEs. The SINR component in Equation (9) penalizes excessive power reduction that degrades link quality below baseline levels, preventing degenerate low-power solutions.

The reward weights were selected heuristically to reflect the relative operational importance of the four objectives while keeping their normalized contributions comparable. Throughput receives the largest weight (0.50) because maintaining user data rate is the primary QoS objective; energy

efficiency is assigned 0.25 to strongly discourage unnecessarily high transmit power. The SINR term (0.15) acts as a link-quality safeguard against overly aggressive power reduction, while the fairness term (0.10) prevents the policy from improving aggregate performance by disproportionately degrading individual UEs. This ordering therefore prioritizes service performance and energy savings while retaining minimum link quality and inter-user balance.

For the evaluation metrics, Jain's Fairness Index is computed using positive linear SINR values. SINR values expressed in dB are first converted to the linear scale as:

$$SINR_{linear} = 10^{\frac{SINR_{dB}}{10}} \quad (16)$$

after which Jain's Fairness Index is calculated as:

$$J = \frac{(\sum_i x_i)^2}{N \sum_i x_i^2} \quad (17)$$

where x_i denotes the linear SINR of UE i. The same linear representation of SINR is used in the fairness component of the training reward.

2.4. SAC Agent and Training

The SAC agent [9] is implemented using Stable-Baselines3 [16] with an MlpPolicy comprising two hidden layers of 128 units (Table 1). SAC's maximum entropy objective augments the reward with the policy entropy, encouraging exploration and preventing mode collapse:

$$\pi^* = arg\,max\pi \sum {}^{\circ}c_{\pi}[r_t + \alpha \cdot \mathcal{H}(\pi(\cdot \mid s_t))] \quad (18)$$

where H denotes entropy and α is a temperature parameter tuned automatically. Key hyperparameters are listed in Table 1.

Table 1 – SAC Hyperparameters.

Hyperparameter	Value
Algorithm	SAC (off-policy, continuous)
Total timesteps	500,000 per seed
Parallel environments	4
Network architecture	[128, 128] MLP (actor & critic)
Learning rate	3×10^{-4}
Replay buffer size	300,000
Mini-batch size	4,096
Soft update (τ)	0.005
Entropy coefficient	auto (target entropy)
Learning starts	5,000
Random seeds	0, 1, 2

In training, we use N_envs = 4 parallel environments in order to speed up data acquisition. The experience buffer holds the latest 300,000 transitions, and the gradients are updated after every step. Another evaluation environment (seed + 100) checks for the performance of the policy after every 25,000 steps.

The experiments were implemented in Python 3.11 using Gymnasium 0.29.1, Stable-Baselines3 2.3.2, and PyTorch 2.6.0. Training was performed on a CUDA-enabled workstation equipped with an NVIDIA GeForce RTX 5080 GPU; the implementation automatically falls back to CPU execution if CUDA is unavailable. The software dependencies and training scripts were fixed across all random seeds to ensure reproducibility.

2.5. Baseline Algorithms

Three conventional reference approaches to power control are considered as benchmarks. Full Power: all UEs transmit at the maximum power Pmax = 30 dBm irrespective of channel condition. Equal Power: all UEs transmit at a constant P = 15 dBm. Simplified 3GPP-inspired Fractional Power Control (FPC): the implemented baseline retains the principal fractional path-loss compensation term but is not the complete TS 38.213 PUSCH power-control procedure. It omits

explicit RB-allocation/numerology scaling, transport-format correction, TPC/closed-loop state, and BWP/reference-signal configuration terms. The simplified baseline sets the transmission power equal to:

$$P_i = clip(P_0 + \alpha \cdot PL_i, 0, 30) \ [dBm] \quad (19)$$

with open-loop parameters P_0 = −60 dBm and α = 0.8. This simplified FPC baseline compensates for deterministic path-loss differences but does not implement the complete standardized 3GPP uplink power-control chain or react to the instantaneous stochastic channel realization.

2.6. Evaluation Protocol

Each baseline is evaluated over 100 common scenarios of 200 TTIs. Each of the three independently trained SAC policies (training seeds 0, 1, and 2) is evaluated on the same 100 scenario seeds; the primary SAC result is formed by averaging the three policy outcomes within each scenario, yielding 100 paired scenario-level observations while retaining separate seed-level summaries. Learning-curve checkpoints use 10 evaluation episodes, whereas Figure 4 uses 50 episodes of the seed-0 SAC policy only to visualize per-UE power distributions. Performance is reported using mean and sample standard deviation for descriptive results, with median and IQR for the strongly skewed network-energy-efficiency metric. Inferential comparisons use two-sided paired Wilcoxon signed-rank tests on common scenarios, Holm correction across nine tests, and 95% bootstrap confidence intervals where reported. The evaluation metrics include mean SINR, aggregate throughput, standard network energy efficiency, mean transmit power, and Jain's Fairness Index computed from linear SINR.

2.7. Reward-Weight Sensitivity Analysis

To assess whether the conclusions depend critically on the manually selected reward weights, a limited sensitivity study evaluates four configurations using the same SAC architecture and training length. Configuration A is the original setting (0.50/0.25/0.15/0.10 for throughput/energy efficiency/SINR/fairness). Configuration B is throughput-oriented (0.60/0.20/0.10/0.10), Configuration C is energy-efficiency-oriented (0.40/0.35/0.15/0.10), and Configuration D is more balanced toward energy efficiency and fairness (0.40/0.30/0.15/0.15). Configurations B-D are each trained with three random seeds for 500,000 timesteps and all twelve policies are evaluated on the same 100 scenario seeds. The purpose is sensitivity analysis of the operating point, not proof that any weight vector is globally optimal.

3. Results

3.1. Learning Dynamics

The SAC learning curve is shown in Figure 1 for 500,000 training timesteps. The plotted quantity is the accumulated return over a complete 200-step evaluation episode, averaged across the three training seeds; the shaded region represents ±1 standard deviation across seeds. At 500,000 timesteps the three episode returns are 89.85, 82.58, and 80.06, with a mean of 84.16, corresponding to approximately 0.421 reward per step. Over the 200,000-350,000 timestep interval, the mean episode return is approximately 82.62 (0.413 per step), showing that the policy has reached a broadly stable training regime.



Figure 1 – SAC learning curve averaged over three training seeds. The y-axis is the mean accumulated return over a 200-step evaluation episode; the shaded area denotes ±1 standard deviation across seeds

3.2. Comparative Performance

Table 2 summarizes the performance comparison using the standard network-level energy-efficiency metric and Jain's Fairness Index computed from linear SINR. SAC achieves a mean throughput of 2.540 Mbps, a network energy efficiency of 14.866 Mbit/J, and a mean transmit power of 9.905 dBm. The corresponding network-energy-efficiency means are 0.268 Mbit/J for Full Power, 7.486 Mbit/J for Equal Power, and 0.261 Mbit/J for simplified FPC. SAC achieves substantially higher mean network energy efficiency than Full Power and simplified FPC. Its mean network energy efficiency is also higher than that of Equal Power; however, this difference is not statistically significant after Holm correction. Because the SAC distribution is strongly right-skewed, both median/IQR and inferential statistics are considered alongside the mean values.

Table 2 – Performance comparison over 100 paired evaluation scenarios. Throughput and network EE are reported as mean ± SD; SINR, mean power, and Jain fairness are scenario means.

Method	SINR (dB)	TP (Mbps)	Network EE (Mbit/J)	Power (dBm)	Jain's FI (linear SINR)
SAC (ours)	−26.971	2.540 ± 1.169	14.866 ± 25.347	9.905	0.166
Full Power	−23.356	2.682 ± 0.556	0.268 ± 0.056	30.000	0.163
Equal Power	−23.864	2.367 ± 0.543	7.486 ± 1.717	15.000	0.167
Simplified FPC	−19.553	2.098 ± 0.091	0.261 ± 0.034	28.094	0.198

Simplified FPC attains the highest mean SINR (−19.553 dB) because its path-loss compensation drives many users toward high transmit powers. SAC operates at a lower mean SINR (−26.971 dB) while reducing mean transmit power to 9.905 dBm. This reduction in absolute SINR is therefore an expected consequence of the learned low-power operating point rather than, by itself, evidence of ineffective control.

The trade-off is acceptable in the considered simulator because SAC preserves a mean throughput of 2.540 Mbps while achieving substantially higher standard network energy efficiency than Full Power and simplified FPC. Relative to Equal Power, SAC has a higher mean network EE, but the paired difference is not statistically significant after Holm correction; this comparison is therefore reported as a numerical operating-point difference rather than a proven superiority claim.

Using Jain's Fairness Index computed from linear SINR, the mean fairness values are 0.166 for SAC, 0.163 for Full Power, 0.167 for Equal Power, and 0.198 for simplified FPC. Thus, SAC does not outperform all baselines in terms of fairness. Paired tests show no significant fairness difference between SAC and Full Power or Equal Power, while simplified FPC achieves significantly higher fairness.

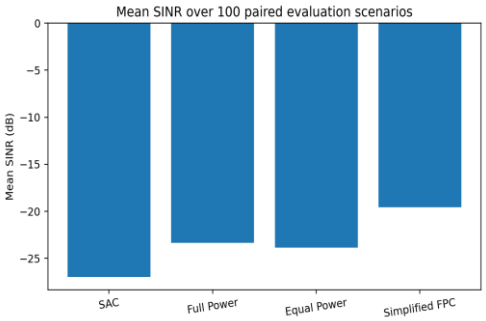


Figure 2 – Mean SINR by method over 100 paired evaluation scenarios. Detailed uncertainty estimates and paired statistical comparisons are reported in the accompanying analysis

3.3. Throughput-Energy Efficiency Tradeoff

Figure 3 plots mean throughput against the standard network-level energy-efficiency metric. Full Power provides the highest observed mean throughput (2.682 Mbps) but only 0.268 Mbit/J network EE. Equal Power yields 2.367 Mbps and 7.486 Mbit/J. Simplified FPC yields 2.098 Mbps and 0.261 Mbit/J. SAC occupies an intermediate throughput point at 2.540 Mbps while reaching 14.866 Mbit/J mean network EE. This operating point is not described as globally Pareto-optimal or unreachable by other policies; it is simply not achieved by the three considered baseline methods.

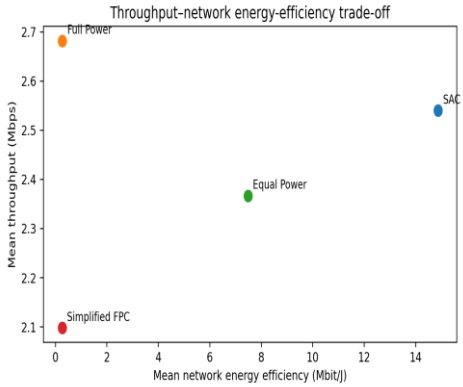


Figure 3 – Throughput versus standard network energy efficiency. Each point is the mean over 100 paired evaluation scenarios; the figure summarizes the operating points of the four considered methods

3.4. Per-UE Power Allocation

Per-UE transmit powers allocated by the SAC agent are shown in Figure 4 using 50 episodes of the seed-0 policy for visualization. The learned allocation is heterogeneous across UEs, reflecting the centralized policy's joint response to path-loss and previously observed SINR information. Because the stochastic channel is redrawn at each environment step, the policy should be interpreted as state-adaptive under the implemented observation/update timing rather than as a complete instantaneous NR scheduler.

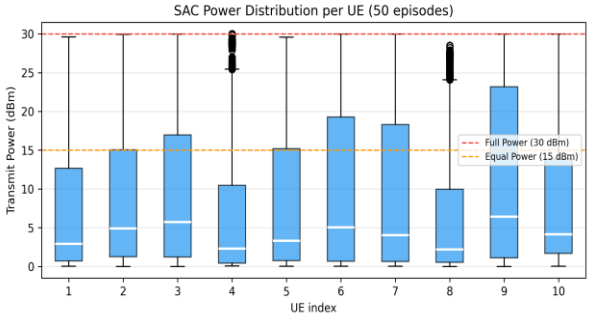


Figure 4 – Per-UE transmit-power distribution for the seed-0 SAC policy over 50 visualization episodes of 200 steps each

3.5. Reward-Weight Sensitivity

The limited sensitivity experiment confirms that the reward weights materially change the learned operating point. Configuration A (0.50/0.25/0.15/0.10) yields 2.540 Mbps throughput and 14.866 Mbit/J network EE. Increasing the throughput weight in Configuration B raises throughput to 4.836 Mbps but reduces network EE to 5.277 Mbit/J and fairness to 0.120. The energy-efficiency-oriented Configuration C reaches 19.859 Mbit/J with 1.570 Mbps throughput, while the more balanced Configuration D reaches 18.688 Mbit/J with 1.593 Mbps and fairness 0.190. No alternative dominates Configuration A across all metrics. The experiment therefore supports the interpretation that the manually selected weights encode an explicit trade-off rather than a globally optimal setting (Table 3, Figure 5).

Table 3 – Reward-weight sensitivity over 100 common evaluation scenarios.

Configuration	Weights TP/EE/SINR/Fair	TP (Mbps)	Network EE (Mbit/J)	Fairness
A Original	.50/.25/.15/.10	2.540 ± 1.169	14.866 ± 25.347	0.166
B TP-oriented	.60/.20/.10/.10	4.836 ± 1.486	5.277 ± 2.502	0.120
C EE-oriented	.40/.35/.15/.10	1.570 ± 0.298	19.859 ± 19.538	0.189
D More balanced	.40/.30/.15/.15	1.593 ± 0.332	18.688 ± 20.831	0.190

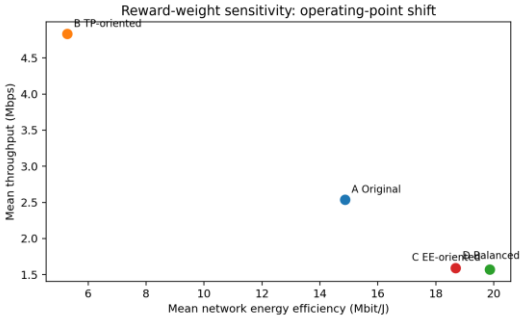


Figure 5 – Reward-weight sensitivity. Changing the reward priorities shifts the learned throughput–network-energy-efficiency operating point; no configuration dominates across all reported metrics

4. Conclusion

In this work, we investigated Soft Actor-Critic for joint uplink transmit-power control in a simplified interference-coupled 5G NR-inspired simulator using 3GPP TR 38.901 UMa NLOS path loss and stochastic channel variation. The centralized SAC policy jointly selects ten continuous transmit powers from [0, 30] dBm using a multi-objective reward that balances throughput, energy efficiency, SINR quality, and fairness.

Across 100 common evaluation scenarios per policy, SAC achieves 2.540 Mbps mean throughput, 14.866 Mbit/J standard network energy efficiency, and 9.905 dBm mean transmit power. Network EE is significantly higher than Full Power and simplified FPC after Holm correction, while its difference from Equal Power is not statistically significant. Jain fairness is not superior to all baselines; simplified FPC achieves the highest mean fairness among the considered methods. The reward-weight sensitivity experiment further shows that throughput, energy efficiency, SINR, and fairness can be shifted substantially by changing objective priorities, with no tested configuration dominating the others across all metrics.

From a practical perspective, the results indicate that continuous DRL control can provide low-power operating points that preserve competitive throughput while substantially improving network energy efficiency relative to high-power reference strategies in the considered simulator. Such behavior is relevant to adaptive uplink resource-management systems in which transmit-power decisions must balance service performance and energy consumption. The present study should be viewed as evidence for this design direction rather than as proof of superiority over all conventional or learning-based power-control algorithms.

Several limitations define the scope of these conclusions. First, the simulator uses a shared-spectrum interference abstraction and does not explicitly schedule orthogonal NR PRBs or model inter-cell interference. Second, the implemented FPC is a simplified 3GPP-inspired path-loss-compensation baseline rather than the complete TS 38.213 procedure. Third, shadowing and Rayleigh components are redrawn at each environment step, and the centralized SAC policy was trained and evaluated under the same model family. Fourth, the study intentionally compares SAC with conventional reference strategies rather than TD3, PPO, DDPG, or other DRL controllers; a carefully tuned multi-algorithm benchmark is left for future work. Finally, the reward-weight ablation demonstrates sensitivity rather than global optimality. Future research should incorporate explicit NR PRB scheduling, inter-cell interference, more realistic temporally correlated channels, complete standardized baselines, controlled DRL comparisons, and simulation-to-reality validation.

References

1. Shen Z. Adaptive resource allocation in multiuser OFDM systems with proportional rate constraints / Z. Shen, J.G. Andrews, B.L. Evans // IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2005. – Vol. 4, № 6. – P. 2726-2737. https://doi.org/10.1109/TWC.2005.858010.

2. Tse D. Fundamentals of Wireless Communication / D. Tse, P. Viswanath. – Cambridge: Cambridge University Press, 2005. – 564 p. https://doi.org/10.1017/CBO9780511807213.

3. Tombaz S. Energy- and cost-efficient ultra-high-capacity wireless access / S. Tombaz, A. Västberg, J. Zander // IEEE Wireless Communications. – 2011. – Vol. 18, № 5. – P. 18-24. https://doi.org/10.1109/MWC.2011.6056688.

4. Zander J. Performance of optimum transmitter power control in cellular radio systems / J. Zander // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 1992. – Vol. 41, № 1. – P. 57-62. https://doi.org/10.1109/25.120145.
5. 3GPP TS 38.213. NR; Physical layer procedures for control. Version 17.4.0 [Electronic resource]. – 3rd Generation Partnership Project, 2022. https://www.3gpp.org/dynareport/38213.htm.
6. Holtkamp H. Minimizing base station power consumption / H. Holtkamp, G. Auer, S. Bazzi, H. Haas // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2014. – Vol. 32, № 2. – P. 297-306. https://doi.org/10.1109/JSAC.2013.131009.
7. Applications of deep reinforcement learning in communications and networking: A survey / N.C. Luong et al // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2019. – Vol. 21, № 4. – P. 3133-3174. https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2916583.
8. Application of machine learning in wireless networks: Key techniques and open issues / Y. Sun et al // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2019. – Vol. 21, № 4. – P. 3072-3108. https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2924243.
9. Haarnoja T. Soft actor-critic: Off-policy maximum entropy deep reinforcement learning with a stochastic actor / T. Haarnoja, A. Zhou, P. Abbeel, S. Levine // Proceedings of the 35th International Conference on Machine Learning (ICML 2018). – 2018. – Vol. 80. – P. 1861-1870. https://proceedings.mlr.press/v80/haarnoja18b.html.
10. Cui W. Spatial deep learning for wireless scheduling / W. Cui, K. Shen, W. Yu // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2019. – Vol. 37, № 6. – P. 1248-1261. https://doi.org/10.1109/JSAC.2019.2904352.
11. Deep reinforcement learning for radio resource allocation and management in next generation heterogeneous wireless networks: A survey / A. Alwarafy et al // IEEE Open Journal of the Communications Society. – 2022. – Vol. 3. – P. 1967-1986. https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2022.3153226.
12. 3GPP TR 38.901. Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz. Version 17.0.0 [Electronic resource]. – 3rd Generation Partnership Project, 2022. https://www.3gpp.org/dynareport/38901.htm.
13. Naparstek O. Deep multi-user reinforcement learning for distributed dynamic spectrum access / O. Naparstek, K. Cohen // IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2019. – Vol. 18, № 1. – P. 310-323. https://doi.org/10.1109/TWC.2018.2878578.
14. Ye H. Deep reinforcement learning based resource allocation for V2V communications / H. Ye, G.Y. Li, B.-H.F. Juang // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2019. – Vol. 68, № 4. – P. 3163-3173. https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2897134.
15. Jain R. A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer systems / R. Jain, D.-M. Chiu, W.R. Hawe. – Hudson: Digital Equipment Corporation, 1984. – 38 p. – (DEC Research Report TR-301). https://arxiv.org/abs/cs/9809099.
16. Stable-Baselines3: Reliable reinforcement learning implementations / A. Raffin et al // Journal of Machine Learning Research. – 2021. – Vol. 22, № 268. – P. 1-8. https://jmlr.org/papers/v22/20-1364.html.
17. Sutton R.S. Reinforcement Learning: An Introduction / R.S. Sutton, A.G. Barto. – 2nd ed. – Cambridge, MA : MIT Press, 2018. – 552 p. http://incompleteideas.net/book/the-book-2nd.html.
18. Human-level control through deep reinforcement learning / V. Mnih et al // Nature. – 2015. – Vol. 518, № 7540. – P. 529-533. https://doi.org/10.1038/nature14236.
19. Proximal policy optimization algorithms / J. Schulman et al // arXiv. – 2017. – arXiv:1707.06347. https://doi.org/10.48550/arXiv.1707.06347.
20. Machine learning paradigms for next-generation wireless networks / C. Jiang et al // IEEE Wireless Communications. – 2017. – Vol. 24, № 2. – P. 98-105. https://doi.org/10.1109/MWC.2016.1500356WC.
21. Eskandari M. Network slicing in O-RAN-enabled cell-free massive MIMO: A DRL-based power control / M. Eskandari, M. Rahmani Ghourtani, A.G. Burr // Proceedings of the 2025 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). – Milan: IEEE, 2025. https://doi.org/10.1109/WCNC61545.2025.10978801.
22. Anbazhagan S. Adaptive power-saving mode control in NB-IoT networks using soft actor-critic reinforcement learning for optimal power management / S. Anbazhagan, R.K. Mugelan // Scientific Reports. – 2025. – Vol. 15, Art. 34618. https://doi.org/10.1038/s41598-025-18214-4.

23. Base station power control strategy in ultra-dense networks via deep reinforcement learning / Q. Chen et al // Physical Communication. – 2025. – Vol. 71, Art. 102655. https://doi.org/10.1016/j.phycom.2025.102655.

Acknowledgment

This research was funded by the Committee of Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant № BR24993211).

С. Айбагаров*, Д. Марламбеков, А. Муханбет
Казахский национальный университет имени аль-Фараби,
Республика Казахстан, г. Алматы, 050040, проспект Аль-Фараби, 71
*e-mail: awer1307dot@gmail.com

УПРАВЛЕНИЕ МОЩНОСТЬЮ ВОСХОДЯЩЕГО КАНАЛА НА ОСНОВЕ SAC В 5G NR: ГЛУБОКОЕ ОБУЧЕНИЕ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ ДЛЯ СОВМЕСТНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ

В статье исследуется применение Soft Actor-Critic (SAC) для управления мощностью восходящего канала в сетях 5G NR. Разработан совместимый с Gymnasium симулятор для 10 пользователей на основе модели 3GPP TR 38.901 UMa NLOS. Агент SAC совместно определяет непрерывные мощности передачи в диапазоне [0, 30] дБм. Три независимо обученные политики SAC оценивались на 100 общих сценариях и сравнивались с Full Power, Equal Power и упрощенным 3GPP-inspired Fractional Power Control. При использовании стандартной сетевой метрики энергоэффективности SAC достигает 14,866 Мбит/с/Дж при средней мощности 9,905 дБм и пропускной способности 2,540 Мбит/с. Энергоэффективность статистически выше, чем у Full Power и упрощенного FPC, однако отличие от Equal Power после поправки на множественные сравнения статистически незначимо. Анализ чувствительности весов функции вознаграждения показывает, что изменение приоритетов смещает компромисс между пропускной способностью и энергоэффективностью и не выявляет единственной доминирующей конфигурации.

Ключевые слова: *5G NR, управление мощностью восходящего канала, алгоритм «мягкий актер-критик», энергоэффективность, SINR, индекс справедливости Джейна, модель канала 3GPP, глубокое обучение с подкреплением.*

S. Aibagarov*, D. Marlambekov, A. Mukhanbet
Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,
Қазақстан Республикасы, Алматы, 050040, Әл-Фараби даңғылы, 71
*e-mail: awer1307dot@gmail.com

SAC НЕГІЗІНДЕГІ 5G NR ЖЕЛІЛЕРІНДЕГІ КӨТЕРІЛМЕЛІ (UPLINK) ҚУАТТЫ БАСҚАРУ: ӨТКІЗУ ҚАБІЛЕТІ МЕН ЭНЕРГИЯ ТИІМДІЛІГІН БІРЛЕСІП ОҢТАЙЛАНДЫРУҒА АРНАЛҒАН ТЕРЕҢ КҮШЕЙТІЛГЕН ОҚЫТУ

Бұл мақалада 5G NR желілеріндегі uplink тарату қуатын басқару үшін Soft Actor-Critic (SAC) әдісі зерттеледі. 3GPP TR 38.901 UMa NLOS моделіне негізделген 10 пайдаланушыға арналған Gymnasium-үйлесімді симулятор жасалды. SAC агенті [0, 30] дБм аралығындағы он пайдаланушының тарату қуатын бірлесіп басқарады. Үш тәуелсіз SAC саясаты 100 ортақ сценарийде бағаланып, Full Power, Equal Power және жеңілдетілген 3GPP-inspired Fractional Power Control әдістерімен салыстырылды. Стандартты желілік энергия тиімділігі метрикасы бойынша SAC 14,866 Мбит/с/Дж нәтижесіне, 9,905 дБм орташа қуатқа және 2,540 Мбит/с өткізу қабілетіне қол жеткізді. SAC энергия тиімділігі Full Power және жеңілдетілген FPC әдістерінен статистикалық тұрғыдан жоғары, ал Equal Power әдісімен айырмашылық көптік салыстыру түзетуінен кейін статистикалық мәнді емес. Марапат салмақтарының сезімталдық талдауы мақсат басымдықтары өзгерген кезде өткізу қабілеті мен энергия тиімділігі арасындағы жұмыс нүктесі өзгеретінін және барлық метрикалар бойынша бір ғана үстем конфигурация жоқ екенін көрсетеді.

Түйін сөздер: *5G NR, көтерілмелі қуатты басқару, soft actor-critic, энергия тиімділігі, SINR, Джейннің әділдік индексі, 3GPP арна моделі, терең күшейтілген оқыту.*

Information about the authors

Serik Aibagarov* – Bachelor student, Junior Reseacher, Computer Science department Almaty, Kazakhstan; e-mail: awer1307dot@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-4946-4926.

Duman Marlambekov – PhD student, Junior Reseacher, Computer Science department, Almaty, Kazakhstan; e-mail: marlambekov_duman@live.kaznu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-3266-2126.

Aksultan Mukhanbet – PhD student, Researcher, Computer Science department, Almaty, Kazakhstan; e-mail: mukhanbetaksultan0414@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4699-0436.

Информация об авторах

Серик Айбагаров* – студент, младший научный сотрудник, кафедра компьютерных наук Алматы, Казахстан; e-mail: awer1307dot@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-4946-4926.

Думан Марламбеков – докторант, младший научный сотрудник, кафедра компьютерных наук, Алматы, Казахстан; e-mail: marlambekov_duman@live.kaznu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-3266-2126.

Аксултан Муханбет – Студент докторантуры, научный сотрудник, кафедра компьютерных наук, Алматы, Казахстан; e-mail: mukhanbetaksultan0414@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4699-0436.

Авторлар туралы ақпарат

Серик Айбагаров* – Бакалавр студенті, кіші ғылыми қызметкер, Компьютерлік ғылымдар кафедрасы, Алматы, Қазақстан; e-mail: awer1307dot@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-4946-4926.

Думан Марламбеков – Докторантура студенті, кіші ғылыми қызметкер, Компьютерлік ғылымдар кафедрасы, Алматы, Қазақстан; e-mail: marlambekov_duman@live.kaznu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-3266-2126.

Ақсұлтан Муханбет – Докторантура студенті, ғылыми қызметкер, Компьютерлік ғылымдар кафедрасы, Алматы, Қазақстан; e-mail: mukhanbetaksultan0414@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4699-0436.

Received 09.06.2026
Revised 07.09.2026
Accepted 18.09.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-32

МРНТИ: 55.57.31

A.B. Shayakhmetov[1], T.V. Bedych[1]*, M.A. Amantayev[2], R. Gabdyssalyk[3], A. Sugirbay[4]
S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University,
010011, Republic of Kazakhstan, Astana, 62 Zhenis Avenue
[2]Akhmet Baitursynuly Kostanay Regional University,
110000, Republic of Kazakhstan, Kostanay, 47 Baitursynov Street
[3]D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University,
070004, Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk, 19 Serikbayev Street
[4]Shakarim University, 071400, Republic of Kazakhstan, Semey, 163 Shugaev Street
*e-mail: tbedych@mail.ru

COMPARATIVE ANALYSIS OF TECHNICAL AND OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF CHISEL PLOWS AND SUBSOILERS FOR ANTI-EROSION SOIL TILLAGE

Annotation: *The paper presents a comparative analysis of technical and operational characteristics of modern chisel plows and subsoilers used for non-inversion anti-erosion soil tillage. The relevance is determined by the high level of wind erosion in Northern Kazakhstan, where over 52 million hectares are subject to erosion. The aim of work is to conduct a comparative analysis of the technical and operational characteristics of modern chisel plows and sweep subsoilers for anti-erosion tillage. For comparative analysis, nine implements were selected, divided into two groups: chisel plows (PChM-4, PCh-4-5, PCh-4.5PM, KAMA TIGER 3, Dondi 813) and sweep subsoilers (RSP-5.4, Cultiplow Platinum SR Agrisem, STAVR PG-5, STAVR PG-7). The official test protocols of accredited MTS for 2014-2025 served as the information base. The comparison methodology was based on the requirements of GOST 20915-2011, GOST 33736-2016, GOST 52777-2007 and GOST 24088-88. The analysis was carried out according to qualitative and technical and operational indicators. Chisel plows provided soil crumbling of 90.6-98.6%, while for sweep subsoilers this indicator was 49.9-94.9% (RSP-5.4 – 62.3-68.4%). The best stubble retention was achieved by STAVR PG-5 (89.0%); chisel plows meet the standard of ≥60% but are inferior to sweep subsoilers, which is critical for anti-erosion technologies. Among chisel plows, PCh-4.5PM showed the highest working capacity (5.14-5.22 ha/h); among subsoilers, Dondi 813 led (5.43 ha/h). The lowest specific fuel consumption was recorded for PChM-4 (14.62 kg/ha), the highest for RSP-5.4 (21.36 kg/ha). Based on the overall set of indicators, PCh-4.5PM and PChM-4 are recommended for the conditions of Northern Kazakhstan; under the threat of wind erosion, STAVR PG-5 is preferable, and for compacted soils, RSP-5.4.*

Key words: *chisel plow, subsoiler, sweep subsoiler, non-inversion soil tillage, anti-erosion tillage, technical-operational characteristics, stubble retention.*

Introduction

Soil cover of Northern Kazakhstan is subjected to systematic wind erosion. According to the Institute of Soil Science of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, over 52 million hectares of land in the republic are affected by wind erosion, with chernozem soils occupying 25.5 million hectares of the main grain-producing belt being among the most vulnerable [1]. The use of non-inversion soil tillage with stubble retention is a key agrotechnical method for soil protection, substantiated within the soil-protective farming system developed by A.I. Barayev [2].

International studies confirm the effectiveness of this approach. Soane et al. established that non-inversion soil tillage combined with crop residue retention reduces humus loss by 15-30% in arid climates [3]. Munkholm et al. showed that subsoiling without soil inversion reduces bulk density in the 20-40 cm layer by 10-18% [4]. According to Siddique et al., stubble retention on the surface

©A.B. Shayakhmetov, T.V. Bedych, M.A. Amantayev, R. Gabdyssalyk, A. Sugirbay, 2026

reduces the rate of wind-driven soil particle transport by a factor of 2.5-3.7 [5]. Based on long-term observations, Kertész and Madarász found that no-till technologies reduce soil loss due to water erosion by 25-55% [6]. Ogbeche et al. investigated the influence of the design parameters of chisel tillage tools on draft resistance and determined optimal chisel attack angles for soils with a hardness exceeding 2.0 MPa [7]. V.V. Blednykh with co-authors developed tillage tools with a variable cutting angle, providing a reduction in draft resistance by 12-18% [8].

In Kazakhstan, both domestic and foreign implements for non-inversion soil tillage are widely used; however, an objective comparison based on official test data is practically absent in the scientific literature [9]. Some publications are promotional in nature and are not based on standardized protocols. This complicates the informed choice of machinery for specific soil and climatic conditions.

The aim of this work is to conduct a comparative analysis of the technical and operational characteristics of modern chisel plows and subsoilers with sweep tillage tools.

Objectives: 1) to systematize the studied implements by the type of tillage tools; 2) to compare the qualitative performances of the technological process; 3) to compare the energy and operational and technological performances; 4) to develop recommendations for the selection of implements for the conditions of Northern Kazakhstan.

Materials and Methods

For the research analysis, nine implements for non-inversion deep soil tillage were selected, classified into two groups [10].

Group 1 – chisel plows with chisel-type tillage tools: PChM-4 (JSC KOMZ-Export, Russia), PCh-4-5 (JSC Rubtsovsk Plant of Spare Parts, Russia), PCh-4.5PM (BDM-Agro LLC, Russia), KAMA TIGER 3 (Tekhnika-Agro LLC, Russia), Dondi 813 (Dondi S.p.A., Italy).

Group 2 – subsoilers with sweep tillage tools: RSP-5.4 (Kostanay branch of «SPC of agricultural engineering» LLP, Kazakhstan), Cultiplow Platinum SR Agrisem (Agrisem International, France), STAVR PG-5 and STAVR PG-7 (JSC Rubtsovsk Plant of Spare Parts, Russia).

PChM-4 chisel plow is a mounted implement designed for primary non-inversion soil tillage for grain and industrial crops to a depth of up to 45 cm. The frame carries symmetrically arranged chisel tillage tools (right and left legs with chisels) and a packer roller system for breaking and leveling the top layer. It is used with tractors of the 5th traction class such as K-701, K-744R3, New Holland T8040, etc.

PCh-4-5 chisel plow is a mounted implement with 11 chisel tillage tools arranged in a staggered pattern in two rows. Each tillage tool consists of a leg, a flow deflector, a chisel, and side wings. It is equipped with two toothed rollers 540 mm in diameter. Depth adjustment is carried out by means of support wheels with a fine-tuning mechanism. It is used with tractors of 300-400 hp such as the K-701.

PCh-4.5PM chisel plow is a mounted implement for tractors of traction classes 5-6. The design features an increased working speed (up to 12.0 km/h) and reinforced tillage tools for soils with a specific resistance of up to 0.1 MPa. It is equipped with rollers for surface leveling.

KAMA TIGER 3 subsoiler is a mounted subsoiler with chisel and sweep tillage tools. It is intended for loosening on moldboard and non-inverted backgrounds with deepening of the plow layer as a substitute for fallow and spring plowing, post-harvest loosening, and pre-sowing tillage on stubble backgrounds. Working width is 3.0 m, tillage depth is up to 45 cm. It is used with tractors of 110-180 hp.

Dondi 813 subsoiler is an Italian-made trailed subsoiler with 13 chisel tillage tools arranged in several rows. It is equipped with 4 toothed rollers 410 mm in diameter for breaking clods and leveling the surface. Tillage depth is up to 60 cm, working width is 6.0 m. It requires a tractor of traction classes 7-8 (Challenger MT 865C). It is hitched via a special CTR 800 mounting trolley.

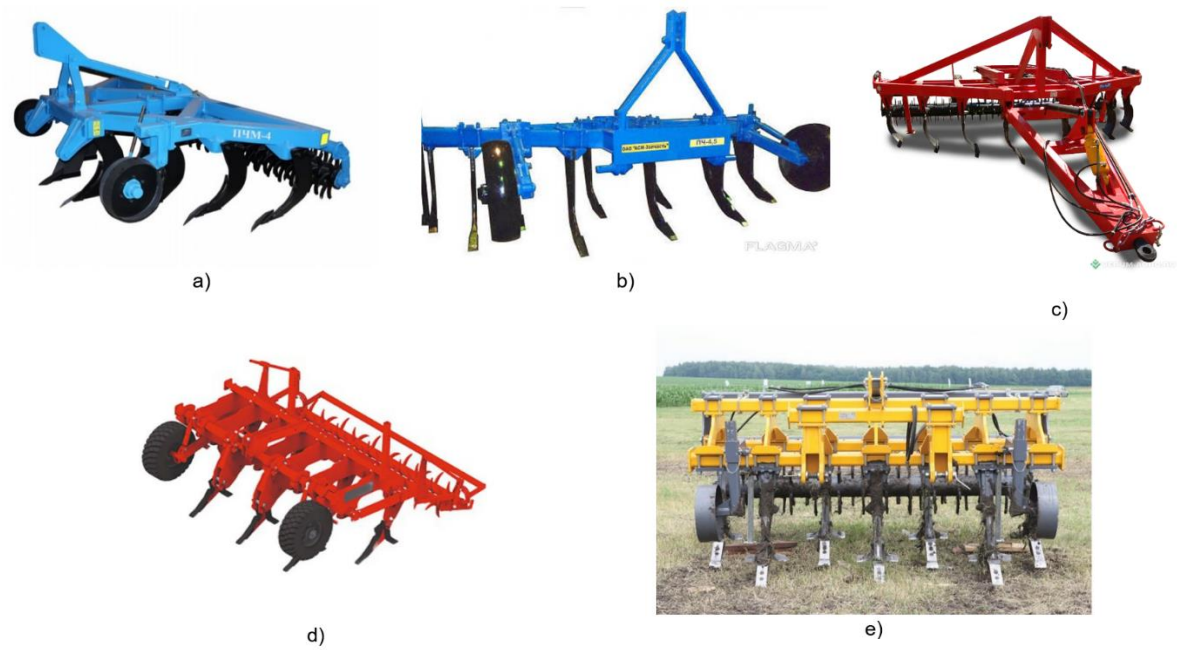
RSP-5.4 sweep subsoiler is designed for non-inversion primary tillage of fallow and stubble fields under conditions of low moisture, high hardness, and density of the plow layer. It is hitched to tractors with an engine power of 320-380 hp. The implement comprises sweep tillage tools with a working width of 0.5-0.6 m each, a central frame, folding side wings operated by a hydraulic cylinder, and bar rollers (optional).

Cultiplow Platinum SR Agrisem subsoiler is a French-made mounted subsoiler with 6 tillage tools on TCS750-Platinum stands with offset cutting elements. It is fitted with a tubular roller and a

spring protection mechanism. Tillage depth is 15-45 cm, working width is 4.0 m. It is used with tractors of at least 250 hp (Versatile 2375).

STAVR PG-5 sweep subsoiler is intended for primary fallow tillage and autumn tillage with maximum stubble retention to protect against wind erosion. The tillage tools are sweep-type tools. Specific resistance is up to 0.09 MPa. It is used with tractors of 250-350 hp.

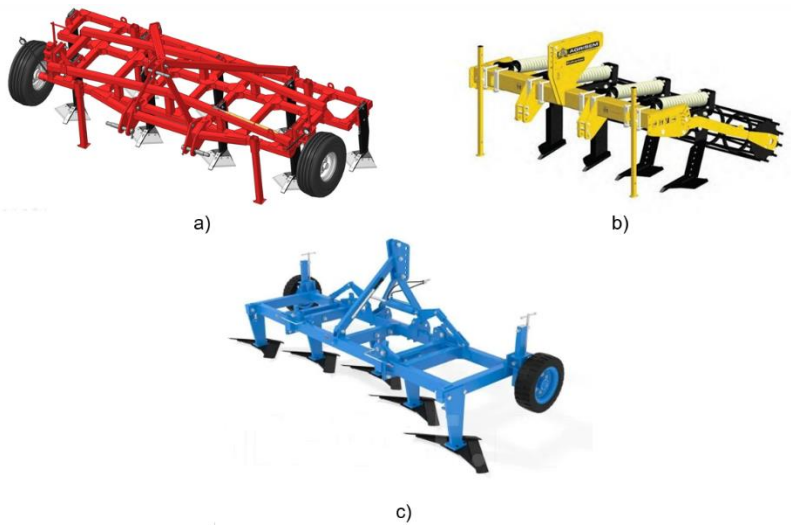
STAVR PG-7 sweep subsoiler is a semi-mounted version with an increased working width for farms with large areas. It is structurally similar to the PG-5 but designed for more powerful tractors (380-450 hp). It is intended for pre-sowing and autumn tillage (Figure 1, 2).



a) b) c) d) e)

a – PChM-4; b – PCh-4-5; c – PCh-4.5PM; d – KAMA TIGER 3; e– Dondi 813

Figure 1 – Chisel plows with vertical carriers and chisel-shaped tillage tools



a) b) c)

a – RSP-5.4; b – Cultiplow Platinum SR Agrisem; c – STAVR PG-5

Figure 2 – Subsoilers with sweep tillage tools

The data sources were official test reports of the specified implements from the accredited state zonal machine testing stations of Kostanay branch of «SPC of agricultural engineering» LLP, Kuban, Siberia, North Caucasus, and Altai for the years 2014-2025 [7; 11; 12; 13; 14; 15; 16; 17; 18; 19; 20].

The performances were determined according to GOST 20915-2011, GOST 33736-2016, GOST 52777-2007, and GOST 24088-88. The comparison was carried out according to two groups:

(1) quality of the technological process (tillage depth, soil crumbling, stubble retention, surface ridging); (2) energy and operational-technological indicators (working capacity, working speed, working width, specific fuel consumption, shift time utilization coefficient).

The technical characteristics of the studied implements are presented in Tables 1 and 2.

Table 1 – Technical characteristics of chisel plows

Indicator	PChM-4	PCh-4-5	PCh-4.5PM	KAMA TIGER 3	Dondi 813
Type of aggregation	Mounted	Mounted	Mounted	Mounted	Trailed
Working width, m	4.0	4.0	4.5	3.0	6.0
Tillage depth, cm	up to 45	up to 45	up to 45	up to 45	up to 60
Working speed, km/h	7-10	7.0-8.0	up to 12.0	up to 12	9.3–9.5
Number of tillage tools, pcs.	8	11	–	–	–
Tractor traction class	5	5	5-6	110-180	450-500

Table 2 – Technical characteristics of subsoilers with sweep tillage tools

Indicator	RSP-5.4	Cultiplow Platinum SR	STAVR PG-5	STAVR PG-7
Type of aggregation	Mounted / trailed	Mounted	Mounted	Semi-mounted
Working width, m	5.4	4.0	5.0	7.4
Tillage depth, cm	20-35	15–45	15–30	15–30
Working speed, km/h	6.0-9.0	7.9–8.0	–	–
Tractor power, hp	320-380	≥ 250	250–350	380–450

Research results

The qualitative tillage performances for the two groups of implements are presented in Table 3.

Table 3 – Qualitative performances of the soil tillage

Indicator	AR	PChM-4	PCh-4-5	PCh-4.5PM	RSP-5.4	KAMA TIGER 3	Dondi 813	Cultiplow Platinum SR	STAVR PG-5	STAVR PG-7
Soil moisture, %	≤20.0	28.0	–	12.9	18.1	19.5	21.4	41.0	22.0	22.0
Soil hardness, MPa	≤4.0	2.8	–	3.9	6.5	3.2	2.56	4.41	3.5	3.5
Tillage depth, cm	≥45	43.1–43.4	18.7*	45.4	30.0	45.1-45.5	35.1	37.0	15–30	29.5
Soil crumbling (≤50 mm), %	≥40	98.5–98.6	–	90.6–95.2	62.3-68.4	49.9-66.2	75.0	94.9	82.0	85.4
Surface ridging, cm	≤5	2.8–3.0	4.0	–	–	–	2.2	4.4	6.5**	3.8
Stubble retention, %	≥60 / ≥80***	62.3–63.7	–	65.1	46.1-62.4	65.5	–	100****	89.0	–

*Note – * PCh-4-5 has been tested for treatment after row crops;*
*** Exceeding the standard is associated with the use of large-width sweep tillage tools;*
**** Standard ≥80% – for implements with sweep tillage tools;*
***** Cultiplow Platinum SR ensures complete incorporation of plant residues, which is unacceptable in conditions of wind erosion*

The chisel plows PChM-4 and PCh-4.5PM provide the best soil crumbling: 98.5-98.6% and 90.6-95.2%, respectively. This is explained by intensive fragmentation of the soil layer by vertical chisel stands. Among the subsoilers with sweep tillage tools, the highest soil crumbling is achieved by the Cultiplow Platinum SR (94.9%) and STAVR PG-7 (85.4%). The RSP-5.4 shows soil crumbling of 62.3-68.4% at soil hardness of 6,5 MPa, which meets the agrotechnical standard (≥40%). The Dondi 813 provides a tillage depth of 35.1 cm instead of the stated 45 cm – a significant deviation from the standard. The STAVR PG-5 shows a ridging height of 6.5 cm, exceeding the standard of 5 cm. In terms of stubble retention, the STAVR PG-5 leads (89.0%), which is its main advantage in anti-erosion technologies. All chisel plows meet the standard of ≥60%, although they are inferior to the subsoilers with sweep tillage tools in this indicator.

The energy and operational and technological performances of the implements are presented in Table 4.

Table 4 – The energy and operational and technological performances

Indicator	PChM-4	PCh-4-5	PCh 4.5PM	RSP-5.4	KAMA TIGER 3	Dondi 813	Cultiplow Platinum SR	STAVR PG-5	STAVR PG-7
Working speed, km/h	9.5	7.06	11.4-11.6	6.0-9.0	10.0-11.8	9.4	7.87-7.97	–	–
Working width, m	4.05	4.4	4.5	5.4	3.0	5.8	4.0	5.0	7.4
Working capacity per 1 hour of basic time, ha	3.85	3.11	5.14–5.22	3.30-5.00	–	5.43	3.19	–	–
Working capacity per 1 hour of shift time, ha	3.05	2.43	–	2.80-4.23	–	4.01	2.56	–	–
Specific fuel consumption per shift, kg/ha	14.62	19.2	–	21.36	–	18.8	21.3	–	–
Shift time utilization coefficient	0.79	0.78	–	0.85	–	0.74	0.80	–	–
The reliability coefficient of the technological process	1.0	1.0	–	–	–	1.0	1.0	–	–
Note – "–" – this indicator was not defined in the MTS protocol									

Discussion

From Table 4, it follows that the PCh-4.5PM provides a productivity of 5.14-5.22 ha/h, exceeding that of the PCh-4-5 (3.11 ha/h) by 33-68% due to its greater working width (4.5 m) and higher working speed (11.4-11.6 km/h). The RSP-5.4 shows a working capacity of 3.3-5.0 ha/h and 2.8-4.23 ha/h for main and shift times, respectively. The Dondi 813, with a working width of 5.8 m, achieves 5.43 ha/h; however, it requires a tractor of traction classes 7-8 (450-500 hp), which is atypical for the machinery fleet of farms in Northern Kazakhstan. The STAVR PG-7 with a working width of 7.4 m potentially provides the highest area capacity provided a suitable tractor (380-450 hp) is available. In terms of specific fuel consumption, the lowest consumption is shown by the PChM-4 (14.62 kg/ha), and the highest by the RSP-5.4 (21.36 kg/ha) and Cultiplow Platinum SR (21.3 kg/ha), probably due to the high value of soil hardness. The shift time utilization coefficient for all implements for which data are available meets the standard (0.74-0.80). The technological process reliability coefficient for the PChM-4, PCh-4-5, and Dondi 813 is 1.0, with the standard being ≥0.98-0.99.

The obtained results are generally consistent with international data. The high soil crumbling achieved by chisel plows with chisel-type tillage tools (98.5–98.6%) corresponds to the findings of Ogbeche et al. [7], who established that chisel-type tillage tools with an optimal chisel attack angle provide better soil layer fragmentation compared to sweep-type analogues. The RSP-5.4 shows soil crumbling of 62.3-68.4%, which also meets the standard. The results confirm the conclusions of Munkholm et al. [4] regarding the importance of decompaction of the subsoil layer: implements with a tillage depth of 43-45 cm (PChM-4, PCh-4.5PM) meet this requirement to a greater extent than the STAVR PG-5 and PG-7 with a working depth of 15-30 cm.

The observed superiority of the STAVR PG-5 in stubble retention (89.0%) is consistent with the data of Siddique et al. [5]: it is precisely the preservation of the mulching layer that determines the effectiveness of protection against wind erosion. At the same time, the limited tillage depth of these implements (up to 30 cm) does not allow for the disruption of the plow pan. Kertész and Madarász [6] similarly point to the need to combine surface mulching with periodic deep subsoiling.

For compacted soils, the most suitable subsoiler is the RSP-5.4. The comparatively low performance of the Dondi 813 in terms of depth (35.1 cm against a standard of ≥45 cm) and the necessity of a tractor of traction classes 7-8 significantly limit its applicability under the conditions of

Northern Kazakhstan. These data agree well with the position of Malyukov S.V. et al. [10], who emphasized the need to consider tractor traction class requirements when selecting subsoilers.

The practical significance of the results lies in the fact that the presented data are derived from official state test reports of accredited machine testing stations, which ensures the objectivity of the conclusions given the scarcity of independent research in Kazakhstan [9].

Conclusion

Based on a comparative analysis of nine implements for non-inversion soil tillage, the following conclusions are formulated.

1. Chisel plows PChM-4 and PCh-4.5PM provide the best soil crumbling (90.6-98.6%) and optimal tillage depth (43-45 cm), which meets the requirements for decompaction of the plow layer. The RSP-5.4 shows soil crumbling of 62.3-68.4%, also meeting the standard.

2. In terms of stubble retention, the STAVR PG-5 leads (89.0%), making it the preferred implements when there is a risk of wind erosion. Chisel plows meet the standard of ≥60% but are inferior to sweep-type implements. For deep decompaction, it is recommended to alternate the use of STAVR PG-5 with periodic chisel tillage.

3. The chisel plow PCh-4.5PM demonstrates the highest working capacity within its class (5.14-5.22 ha/h) with tractor requirements of traction classes 5–6, which corresponds to the structure of the machine and tractor fleet of farms in Northern Kazakhstan.

4. The use of Cultiplow Platinum SR Agrisem for anti-erosion tillage is inadvisable due to the complete incorporation of plant residues. The Dondi 813 is limited in application by the need for a tractor of traction classes 7-8 (450-500 hp). The RSP-5.4 shows the highest specific fuel consumption (21.36 kg/ha) when tilling soil with a soil hardness exceeding 6.0 MPa.

5. For the conditions of Northern Kazakhstan, the use of the PCh-4.5PM and PChM-4 is recommended, as they provide an optimal balance of tillage quality, working capacity, and specific energy consumption. Under the threat of wind erosion, it is advisable to use STAVR PG-5, followed by periodic chisel tillage once every 3-4 years to disrupt the plow pan. For compacted soils, the most suitable subsoiler is the RSP-5.4.

References

1. Kashtanov A.N. Pochvozashchitnoe zemledelie / A.N. Kashtanov, M.N. Zaslavskii. – Moskva: Kolos, 2004. – 447 s. (in Russian).
2. Baraev A.I. Pochvozashchitnaya sistema zemledeliya / A.I. Baraev. – Alma-Ata: Kainar, 1975. – 304 s. (in Russian).
3. No-till in northern, western and south-western Europe: A review of problems and opportunities for crop production and the environment / B.D. Soane et al // Soil and Tillage Research, 2012. – Vol. 118. – P. 66-87. (in English).
4. Munkholm L.J. Soil pore characteristics assessed from X-ray micro-CT derived images and correlations to soil friability / L.J. Munkholm, R.J. Heck, B. Deen // Geoderma, 2012. – Vol. 181-182. – P. 22-29. (in English).
5. Innovations in agronomy for food legumes. A review / K.H.M. Siddique et al // Agronomy for Sustainable Development, 2012. – Vol. 32. – P. 45-64. (in English).
6. Kertész Á. Conservation agriculture in Europe / Á. Kertész, B. Madarász // International Soil and Water Conservation Research. – 2014. – Vol. 2(1). – P. 91-96. (in English).
7. Ogbeche O.S. Development and performance evaluation of instrumented subsoilers in breaking soil hard-pan / O.S. Ogbeche, M.S. Idowu, E. Theophilus // AgricEngInt. CIGR Journal. – 2018. – Vol. 20, № 3 – P. 85-96. (in English).
8. Blednykh V.V. Teoriya pochvoobrabatyvayushchego klina i ee prilozheniya: monografiya / V.V. Blednykh. – Chelyabinsk: CHGAA, 2013. – 90 s. (in Russian).
9. Kuvaev A.N. Obosnovanie parametrov orudiya dlya osnovnoi obrabotki uplotnennykh pochv k traktoru tyagovogo klassa 6 / A.N. Kuvaev. – Kostanai: NAO «Kostanaiskii regional'nyi universitet imeni A.Baitursynova», 2022. – 179 c. (in Russian).
10. Analiz konstruktsii i tekhnologicheskikh parametrov chizel'nykh plugov i glubokorykhlitelei / S.V. Malyukov i dr. // Izvestiya NV AUK, 2024. – № 3(75). – S. 412-422. (in Russian).
11. Protokol ispytanii № 11-41-14 (4010082). Plug chizel'nyi PCHM-4 // FGBU «Severo-Kavkazskaya MIS». – Zernograd, 2014. – 16 s. (in Russian).

12. Protokol ispytanii № 12-20-2019 (5010182). Plug chizel'nyi PCh-4-5 // FGBU «Sibirskaya MIS». – Sosnovskoe, 2019. – 4 s. (in Russian).
13. Protokol ispytanii № 07-18-2025. Plug chizel'nyi PCh-4,5PM // FGBU «Kubanskaya MIS». – Novokubansk, 2025. – 9 s. (in Russian).
14. Protokol ispytanii № 07-21-2023. Glubokorykhlitel' KAMA TIGER 3 // FGBU «Kubanskaya MIS». – Novokubansk, 2023. – 11 s. (in Russian).
15. Protokol ispytanii № 07-110-2016 (6240472). Glubokorykhlitel' Dondi 813 // FGBU «Kubanskaya MIS». – Novokubansk, 2016. – 30 s. (in Russian).
16. Protokol ispytanii № 07-95-2020 (6240722). Glubokorykhlitel' Cultiplow Platinum SR Agrisem // FGBU «Kubanskaya MIS». – Novokubansk, 2020. – 5 s. (in Russian).
17. Reshenie Komissii po protokolu 01-42-22. Ploskorez-glubokorykhlitel' STAVR PG-5 // AO «Rubtsovskii zavod zapasnykh chastei». – Altaiskaya MIS, 2022. (in Russian).
18. Reshenie Komissii po protokolu 01-42-22. Ploskorez-glubokorykhlitel' STAVR PG-7 // AO «Rubtsovskii zavod zapasnykh chastei». – Altaiskaya MIS, 2022. (in Russian).
19. Naznachenie i oblast' primeneniya kombinirovannogo orudiya-glubokorykhlitelya / S.K. Toigambaev i dr. // Agroprodovol'stvennaya ehkonomika, 2023. – № 4. – S. 23-29. (in Russian).
20. Snizhenie tyagovogo soprotivleniya chizel'nykh orudii / D.S. Gapich i dr. // Izvestiya NV AUK, 2023. – № 4(72). – S. 398-409. (in Russian).

А.Б. Шаяхметов[1], Т.В. Бедыч[1]*, М.А. Амантаев[2], Р. Ғабдысалық[3], Ә.М. Сүгірбай[4]
[1] С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті,
010011, Қазақстан Республикасы, Астана қ., Жеңіс даңғылы, 62
[2]Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті,
110000, Қазақстан Республикасы, Қостанай қ., Байтұрсынов көшесі, 47
[3]Дәулет Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті,
070004, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ., Серікбаев көшесі, 19
[4]Шәкәрім Университеті, 071400, Қазақстан Республикасы, Семей, Шоғаев көшесі, 163
*e-mail: tbedych@mail.ru

ЭРОЗИЯҒА ҚАРСЫ ТОПЫРАҚТЫ ӨҢДЕУГЕ АРНАЛҒАН ЧИЗЕЛЬДІ СОҚАЛАР МЕН ТЕРЕҢ ҚОПСЫТҚЫШТАРДЫҢ ТЕХНИКАЛЫҚ-ПАЙДАЛАНУ КӨРСЕТКІШТЕРІНІҢ САЛЫСТЫРМАЛЫ ТАЛДАУЫ

Мақалада топырақты аударусыз эрозияға қарсы өңдеуге арналған заманауи чизельді соқалар мен терең қопсытқыштардың техникалық-пайдалану көрсеткіштерін салыстырмалы талдау нәтижелері ұсынылады. Зерттеудің өзектілігі Солтүстік Қазақстандағы жел эрозиясының жоғары деңгейімен айқындалады: 52 млн га-дан астам алқап эрозияға ұшыраған. Жұмыстың мақсаты – топырақты эрозияға қарсы өңдеуге арналған заманауи чизель соқалары мен жалпақ тілгіш терең қопсытқыштардың техникалық-пайдалану көрсеткіштеріне салыстырмалы талдау жүргізу. Салыстырмалы талдау үшін екі топқа бөлінген тоғыз құрал таңдалды: чизель соқалары (ПЧМ-4, ПЧ-4-5, ПЧ-4,5ПМ, KAMA TIGER 3, Dondi 813) және жалпақ тілгіш терең қопсытқыштар (РСП-5,4, Cultiplow Platinum SR Agrisem, STAVR PG-5, STAVR PG-7). Ақпараттық база ретінде аккредиттелген МИС-дың 2014-2025 жылдардағы ресми сынақ хаттамалары алынды. Салыстыру әдістемесі ГОСТ 20915-2011, ГОСТ 33736-2016, ГОСТ 52777-2007 және ГОСТ 24088-88 талаптарына негізделген. Талдау сапалық және техникалық-пайдалану көрсеткіштері бойынша жүргізілді. Чизельді соқалар топырақтың ұсақталуын 90,6–98,6% қамтамасыз етеді, ал жалпақ тілгіш терең қопсытқыштарда бұл көрсеткіш 49,9–94,9% құрайды (РСП-5,4 – 62,3-68,4%). Сабан сақтаудың ең жақсы көрсеткіші STAVR ПГ-5 үшін (89,0%) қол жеткізілді; чизельді соқалар нормативке ≥60% сәйкес келеді, бірақ жалпақ тілгіштерден кем түседі. ПЧ-4,5ПМ чизельді соқалар арасында ең жоғары өнімділікті көрсетті (5,14-5,22 га/сағ.), терең қопсытқыштар арасында – Dondi 813 (5,43 га/сағ). Ең төменгі меншікті отын шығыны ПЧМ-4 үшін тіркелді (14,62 кг/га), ең жоғарғы – РСП-5,4 (21,36 кг/га). Көрсеткіштер жиынтығы бойынша Солтүстік Қазақстан жағдайында ПЧ-4,5ПМ және ПЧМ-4 ұсынылады, жел эрозиясы қаупі кезінде – STAVR PG-5, тығыздалған топырақтар үшін – РСП-5,4.

***Түйін сөздер*:** *чизельді соқа, терең қопсытқыш, топырақты аударусыз өңдеу, эрозияға қарсы өңдеу, техникалық-пайдалану көрсеткіштері, сабан сақтау.*

А.Б. Шаяхметов[1], Т.В. Бедыч[1*], М.А. Амантаев[2], Р. Ғабдысалық[3], А.М. Сугирбай[4]
[1]Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина,
010011, Республика Казахстан, г. Астана, пр. Женис, 62
[2]Костанайский региональный университет имени Ахмет Байтұрсынұлы,
110000, Республика Казахстан, г. Костанай, ул. Байтурсынова, 47
[3]Восточно-Казахстанский технический университет им. Серикбаева,
070004, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск, ул. Серикбаева, 19
[4]Университет Шакарима, 071400, Республика Казахстан, Семей, ул. Шогаева, 163
*e-mail: tbedych@mail.ru

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНИКО-ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЧИЗЕЛЬНЫХ ПЛУГОВ И ГЛУБОКОРЫХЛИТЕЛЕЙ ДЛЯ ПРОТИВОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ ПОЧВЫ

В статье представлены результаты сравнительного анализа технико-эксплуатационных показателей современных чизельных плугов и глубокорыхлителей для безотвальной противоэрозионной обработки почвы. Актуальность исследования обусловлена высоким уровнем ветровой эрозии на территории Северного Казахстана, где свыше 52 млн га подвержены эрозии. Цель работы – провести сравнительный анализ технико-эксплуатационных показателей современных чизельных плугов и плоскорезных глубокорыхлителей для противоэрозионной обработки почвы. Для сравнительного анализа выбраны девять орудий, разделённых на две группы: чизельные плуги (ПЧМ-4, ПЧ-4-5, ПЧ-4,5ПМ, KAMA TIGER 3, Dondi 813) и плоскорезные глубокорыхлители (РСП-5,4, Cultiplow Platinum SR Agrisem, STAVR ПГ-5, STAVR ПГ-7). Информационной базой послужили официальные протоколы испытаний аккредитованных МИС за 2014–2025 годы. Методика сравнения строилась на требованиях ГОСТ 20915-2011, ГОСТ 33736-2016, ГОСТ 52777-2007 и ГОСТ 24088-88. Анализ проводился по качественным и технико-эксплуатационным показателям. Установлено, что чизельные плуги обеспечивают крошение почвы 90,6-98,6%, тогда как у плоскорезных глубокорыхлителей этот показатель составляет 49,9-94,9% (РСП-5,4 – 62,3-68,4%). Наилучшее сохранение стерни достигается у STAVR ПГ-5 (89,0%), чизельные плуги соответствуют нормативу ≥60%, но уступают плоскорезным, что критично для противоэрозионных технологий. Наибольшую производительность среди чизельных плугов показал ПЧ-4,5ПМ (5,14-5,22 га/ч), среди глубокорыхлителей – Dondi 813 (5,43 га/ч). Наименьший удельный расход топлива зафиксирован у ПЧМ-4 (14,62 кг/га), наибольший – у РСП-5,4 (21,36 кг/га). По совокупности показателей для условий Северного Казахстана рекомендованы ПЧ-4,5ПМ и ПЧМ-4, при угрозе ветровой эрозии – STAVR ПГ-5, для переуплотненных почв – РСП-5,4.

Ключевые слова: *чизельный плуг, глубокорыхлитель, плоскорез, безотвальная обработка почвы, противоэрозионная обработка, технико-эксплуатационные показатели, сохранение стерни.*

Information about the authors

Amangeldy Bulatovich Shayakhmetov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor Department of Agro-engineering, Mechanics, and Metalworking, S.Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Republic of Kazakhstan; e-mail: Shayahmetov0501@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9610-2631.

Tatyana Vitalievna Bedych* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Energy and Mechanical Engineering, Kostanay Engineering and Economics University named after M. Dulatov, Republic of Kazakhstan; e-mail: tbedych@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3642-8917.

Maxat Amantayuly Amantayev – PhD, Associate Professor of the Department of Agricultural Machinery and Transport, Akhmet Baitursynuly Kostanay Regional University, Republic of Kazakhstan; e-mail: amantayev.ma@ksu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4838-9487.

Riza Gabdyssalyk – PhD, Associate Professor of the Postgraduate Sector, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Republic of Kazakhstan; e-mail: riza.gabdyssalyk@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9184-0897.

Adilet Sugirbay – PhD, Head of the Design Bureau, Research School of Veterinary Medicine and Agriculture, Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: Adilet_s_93@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3637-2749.

Авторлар туралы мәліметтер

Амангелді Булатұлы Шаяхметов – техника ғылымдарының кандидаты, агроинженерия, механика және металл өңдеу кафедрасының қауымдастырылған профессоры, С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: Shayahmetov0501@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9610-2631.

Татьяна Витальевна Бедыч* – техника ғылымдарының кандидаты, энергетика және машина жасау кафедрасының қауымдастырылған профессоры, М.Дулатов атындағы Қостанай инженерлік-экономикалық университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: tbedych@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3642-8917.

Максат Амантайулы Амантаев – PhD, аграрлық техника және көлік кафедрасының қауымдастырылған профессоры, «Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті» КЕАҚ, Қазақстан Республикасы; e-mail: amantayev.ma@ksu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4838-9487.

Риза Ғабдысалық – PhD, «Postgraduate» секторының қауымдастырылған профессоры, Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: riza.gabdyssalyk@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9184-0897.

Әділет Мұхитұлы Сүгірбай – PhD, конструкторлық бюро жетекшісі, Ветеринария және ауыл шаруашылығы зерттеу мектебі, Шәкәрім Университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: Adilet_s_93@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3637-2749.

Сведения об авторах

Амангелді Булатұлы Шаяхметов – кандидат технических наук, ассоциированный профессор кафедры агроинженерии, механики и металлообработки, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С.Сейфуллина, Республика Казахстан; e-mail: Shayahmetov0501@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9610-2631.

Татьяна Витальевна Бедыч* – кандидат технических наук, ассоциированный профессор кафедры энергетики и машиностроения, Костанайский инженерно-экономический университет им. М. Дулатова, Республика Казахстан; e-mail: tbedych@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3642-8917.

Максат Амантайулы Амантаев – PhD, ассоциированный профессор кафедры аграрной техники и транспорта, Костанайский региональный университет имени Ахмет Байтұрсынұлы, Республика Казахстан; e-mail: amantayev.ma@ksu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4838-9487.

Риза Ғабдысалық – PhD, ассоциированный профессор сектора «Postgraduate», Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, Республика Казахстан; e-mail: riza.gabdyssalyk@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9184-0897.

Адилет Мухитович Сугирбай – PhD, руководитель конструкторского бюро, Исследовательская школа ветеринарии и сельского хозяйства, Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: Adilet_s_93@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3637-2749.

Received 16.07.2026
Revised 04.09.2026
Accepted 07.09.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-33

IRSTI: 53.49.37

CC BY 4.0
Check for updates

A. Kusainov, G. Zhunissova*, N. Magazov, A. Kengesbekov, L. Bayatanova
D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University,
070004, Kazakhstan , Ust-Kamenogorsk, Serikbayev str. 19
*e-mail: junusova6@gmail.com

THE EFFECT OF ELECTROLYTE-PLASMA HARDENING PARAMETERS ON THE MICROSTRUCTURE, PHASE COMPOSITION, AND MECHANICAL AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF 20X STEEL

Abstract: *This article investigates the effect of electrolytic-plasma treatment (EPT) parameters–voltage (260-320 V) and dwell time (2-5 s) – on the microstructure, phase composition, microhardness, elastic modulus, and tribological properties of 20X steel. Treatment was performed in a 12 wt.% Na_2CO_3 aqueous solution. X-ray diffraction and scanning electron microscopy showed the formation of α'-martensite with a body-centered cubic (BCC) lattice without residual austenite or carbide phases. The threshold treatment mode was 260 V for 2 s, at which complete austenitization was not achieved. Increasing the dwell time to 5 s at 300 V nearly doubled the microhardness to 441.66 HV, while increasing voltage at 2 s primarily affected carbon*

©A. Kusainov, G. Zhunissova, N. Magazov, A. Kengesbekov, L. Bayatanova, 2026

supersaturation. The lowest friction coefficient (μ = 0.498) was obtained at 320 V for 2 s, indicating that maximum hardness does not necessarily correspond to the best tribological performance. The results demonstrate that EPT parameters should be selected according to the required operational properties of 20X steel.

Key words: *electrolytic plasma treatment; 20X steel; martensite; microhardness; phase composition; X-ray diffraction analysis; coefficient of friction; surface hardening.*

Introduction

Extending the service life of machine parts under severe wear, contact loads, and aggressive environments is a priority in modern mechanical engineering. A large share of component failures stems from degradation of the surface layer, which bears the brunt of mechanical and tribological stress [1], making targeted modification of its structure and properties increasingly important.

Among surface-hardening approaches, coating methods (CVD/PVD, gas-thermal spraying, chromium electroplating) are most widespread and provide high hardness and wear resistance. However, coatings are dissimilar from the base metal, producing residual interfacial stresses and reduced adhesive strength under cyclic and impact loads [2]; most coating technologies also require costly vacuum equipment, high temperatures, and toxic reagents, limiting mass-production use.

An alternative to coatings is thermal/thermochemical treatment, where hardening occurs through structural and phase transformations within the workpiece itself, without a foreign layer. Electrolytic plasma treatment (EPT) heats the surface via electrical discharges in a vapor-gas envelope formed when the part is immersed in an electrolyte under high voltage (typically 200–400 V). High power density in the discharge zone heats the surface to austenitizing temperature within a fraction of a second; cooling on removal from the electrolyte or power-off then produces a martensitic transformation. Because the hardened layer is an integral part of the workpiece, EPT avoids delamination and gives a gradient property transition to the core, while offering simple equipment, environmentally safe aqueous electrolytes, and high productivity, with processing times of seconds to tens of seconds [3, 4].

20X chromium-alloyed structural steel was selected for this study, as it is widely used for gears, shafts, bushings, and other wear- and load-bearing components [6]. Its chromium content (0.7-1.0 wt.%) provides good hardenability and a tendency toward fine-grained martensite on quenching, making it promising for EPT-based surface hardening [5, 7].

Despite growing interest in EPT of various steels and alloys [1, 3, 4, 6, 7], systematic data on how voltage and holding time affect the structural, mechanical, and tribological properties of 20X steel remain scarce. In particular, the threshold parameters for complete martensitic transformation, the relationship between XRD-determined crystal-structure parameters and service characteristics, and optimal processing conditions for chromium-containing steels are not yet established – questions with both scientific and practical significance for the technology's industrial application.

The objective of this work is to investigate the effect of stress and holding time during electrolytic plasma treatment on the phase composition, microstructure, microhardness, and elastic modulus of the surface layer of 20X steel, as well as to evaluate the tribological characteristics – specifically, the coefficient of friction and the geometric parameters of wear tracks – and to establish correlations between the structural changes identified by X-ray diffraction and scanning electron microscopy, and the mechanical properties of the treated surface layer.

Materials and Methods

Alloyed structural steel 20X was used as the test material. The chemical composition of the steel is given in Table 1. The specimens were rectangular plates measuring 30×25 mm and 20 mm thick, ground by hand sequentially on sandpaper with grit sizes ranging from P100 to P2500.

Table 1 – Chemical Composition of 20X Steel (GOST 4543-2016) [9], wt.%

C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P	Cu	Fe
0.17-0.23	0.17-0.37	0.50-0.80	0.70-1.00	≤0.30	≤0.035	≤0.035	≤0.30	base

Electrolytic plasma treatment was performed on an EPT laboratory setup equipped with a control unit capable of regulating voltage and treatment time (Fig. 1). The setup includes a conical stainless-steel electrolytic cell, an electrolyte circulation system with a pump, and an electrolyte bath. The sample (anode) was placed in the electrolyte flow at a fixed distance from the cathode; a stainless steel cell served as the cathode.

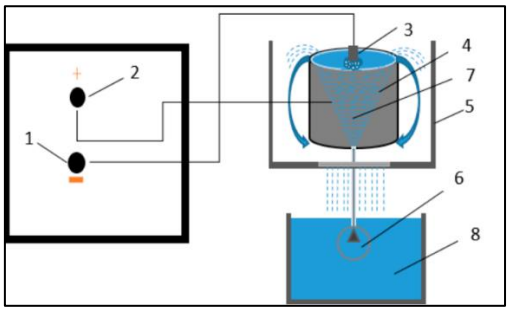


Figure 1 – Schematic of the EPT setup:
1 – anode; 2 – cathode; 3 – workpiece (sample); 4 – conical stainless steel electrolytic cell;
5 – sedimentation tank; 6 – pump; 7 – electrolyte; 8 – electrolytic bath

An aqueous solution of soda ash (Na_2CO_3) with a concentration of 12 wt.% (88 wt.% distilled water) was used as the electrolyte. The electrolyte circulated in the electrolytic cell via a pump with a flow rate of 60 L/min, ensuring uniform washing of the cathode located inside the cell. Through the upper opening of the cell, the electrolyte returns to the settling tank, passing close to the surface of the workpiece (anode). When an electrical voltage is applied between the anode and cathode, electrolyte ions such as H^+, OH^-, and CO_3^{2-} begin to move in an orderly fashion, causing the anode and the adjacent layer of electrolyte to heat up rapidly and form a vapor-gas envelope. As a result, the ionized electrolyte vapor forms an environment in which electrical discharges occur between the electrolyte and the anode, and the temperature of the sample gradually increases.

A uniform electrolyte composition (12% Na_2CO_3) was used under the voltage/time conditions listed in Table 2 to evaluate their effect on 20X steel properties.

Table 2 — Electrolyte-plasma treatment conditions for 20X steel samples

№	1	2	3	4	5	6
Voltage, V	320	300	280	260	300	300
Time, s	2	2	2	2	3	5

The microhardness of the surface layer was determined by the Vickers method on a semi-automatic HVS-1MDT-AXY tester at a load of 0.05 kgf, averaging at least five measurements per sample.

The elastic modulus was evaluated using a FISCHER-SCOPE HM 2000 system (Helmut Fischer GmbH, Sindelfingen, Germany; WIN-HCU software v7.1) in accordance with ISO 14577 [13] on sample cross-sections, with load increased to 10 mN over 20 s and a 5 s dwell time at final load.

Tribological tests were performed on an Anton Paar TRb3 tribometer (Anton-Paar, Buchs, Switzerland) in a «ball-on-disc» configuration per ASTM G133-95 and ASTM G99 [11, 12], at room temperature without lubricant, using a 100Cr6 counterbody ball (6 mm radius). Test conditions were: 6 N load, 3 cm/s linear speed, 3 mm wear radius, 40 m total distance.

X-ray diffraction (XRD) analysis of the surface layer was performed on a DW_XRD_27MINI diffractometer using Cu Kα radiation (λ = 1.5406 Å) in the angle range 2θ = 20-90°, with a scan step of 0.02°, with an exposure time of 0.5 s per step. Phase identification was performed using the PDF-2 database; crystallite size was calculated using the Scherrer equation (K = 0.9). The crystal lattice parameter was determined from the position of the (110) reflection using the relationship $a = d(110)\cdot\sqrt{2}$. The microstructure of the cross-section and the morphology of the wear tracks and wear spots on the counterbody were examined using scanning electron microscopy (SEM) on a TESCAN VEGA4 LMH microscope (TESCAN, Czech Republic) at magnifications of ×500 and ×2000 in secondary electron mode (SE) mode. To reveal structural components, cross-sections of the samples were chemically etched with Nital, a solution of nitric acid (4 wt.%) in ethyl alcohol (96 wt.%), which selectively reveals ferrite, pearlite, martensite, and grain boundaries.

Results and Discussion

The results of the microhardness measurements are presented in Figure 2. The initial hardness of 20X steel in the normalized condition was 179.8 HV, which corresponds to typical values for the ferrite-pearlite structure of this steel grade.

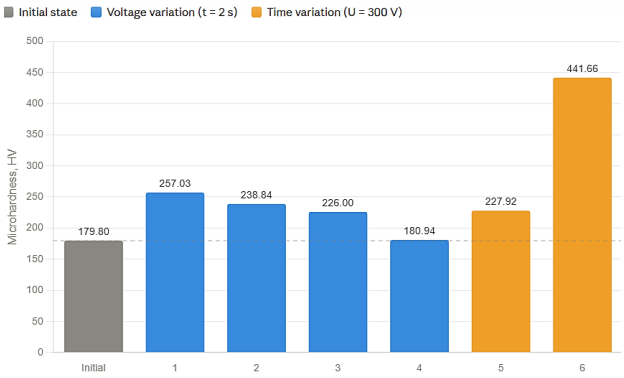


Figure 2 – Microhardness of the surface layer of 20X steel in the as-received condition and after EPT under various processing conditions

Analysis of the obtained data shows that microhardness of the 20X steel surface layer systematically increases with processing voltage at a constant holding time of 2 s. Reducing the voltage from 320 to 260 V causes an almost linear decrease in hardness from 257.03 to 180.94 HV, the latter being close to the initial value (179.8 HV), indicating insufficient process energy to form a hardened layer. Thus, 260 V at 2 s can be considered a threshold below which hardening is practically not realized.

At a constant voltage of 300 V, increasing the dwell time from 2 to 3 s causes no significant hardness change (238.84 and 227.92 HV), whereas increasing it to 5 s results in a sharp, nearly twofold increase to 441.66 HV. This nonlinear jump indicates a qualitative change in hardened layer formation in the 3-5 s range, which will be discussed based on SEM analysis.

Overall, holding time has a more pronounced effect on surface hardening of 20X steel than processing voltage, with a clear threshold and nonlinear character.

The elastic modulus results are shown in Figure 3. Except for 300 V/5 s, all EPT modes reduce the modulus from the initial 243.7 GPa. In the voltage series, it decreases to 197.5 GPa at 300 V and increases to 221.6 GPa at 260 V. With increasing hold time, it rises from 197.5 GPa (2 s) to 252.0 GPa (5 s).

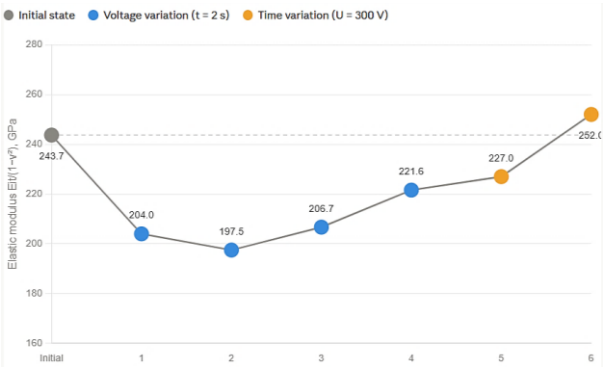


Figure 3 – Effect of electrolytic-plasma treatment conditions on the elastic modulus of the surface layer of 20X steel

The decrease is attributed to martensitic transformation, which increases hardness while moderately reducing the elastic modulus. The increase to 252.0 GPa in Mode No. 6 is associated with deeper martensitic transformation and a high-density dislocation substructure, confirmed by SEM and RSA.

Figure 4 shows the friction coefficient μ kinetics. All curves exhibit typical dry steel-on-steel sliding: a running-in stage (0-5 m), with μ increasing from zero to 0.40-0.55, followed by a quasi-steady increase. This behavior results from oxide film destruction and accumulation of tribochemical products. Average μ values for distances >5 m are given in Table 3.

At a constant exposure time of 2 s, decreasing the voltage from 320 to 260 V increases μ from 0.498 to 0.648. Only 320 V/2 s reduces μ below the untreated value (0.498 vs. 0.545), due to formation of a dense martensitic layer. At lower voltages, incomplete austenitization increases μ.

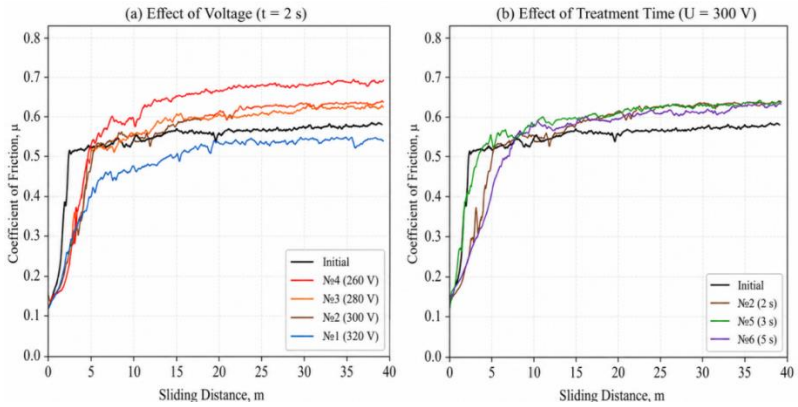


Figure 4 – Coefficient of friction of 20X steel as a function of sliding path:
a – effect of stress (t = 2 s); b – effect of holding time (U = 300 V)

Table 3 – Average values of the coefficient of friction for 20X steel in its as-received condition and after EPT

Sample	Mode	μ (average ± standard deviation)
Initial	–	0.545 ± 0.062
№ 1	320 V, 2 s	0.498 ± 0.072
№ 2	300 V, 2 s	0.588 ± 0.053
№ 3	280 V, 2 s	0.581 ± 0.075
№ 4	260 V, 2 s	0.648 ± 0.071
№ 5	300 V, 3 s	0.597 ± 0.050
№ 6	300 V, 5 s	0.580 ± 0.061

At 300 V, varying the holding time has a weaker effect, with μ ranging from 0.580-0.597. Sample No. 6, despite its maximum hardness of 441.66 HV, does not show the lowest μ, indicating no direct correlation between hardness and anti-friction properties.

Thus, Mode No. 1 (320 V, 2 s) is optimal, reducing μ from 0.545 to 0.498 and increasing microhardness from 179.8 to 257.0 HV. Wear-track morphology was further analyzed (Fig. 5) to clarify the wear mechanisms.

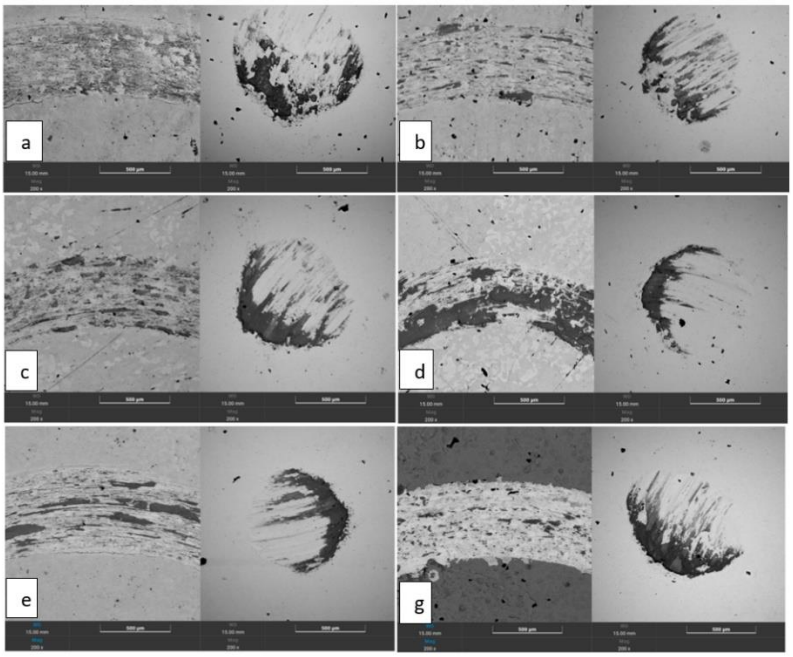


Figure 5 – Morphology of the friction surfaces of 20X steel after EPT:
a) Sample 1 (320 V, 2 s); b) Sample 2 (300 V, 2 s); c) Sample 3 (280 V, 2 s);
d) Sample 4 (260 V, 2 s); e) Sample 5 (300 V, 3 s); g) Sample 6 (300 V, 5 s)

Comparison of wear-track parameters with microhardness and friction coefficient shows no clear linear correlation between these characteristics.

Sample 4 had the narrowest wear track (458.54 μm), but hardness remained near the initial level (180.94 HV) and μ was maximum (0.648), indicating localized adhesive bonding rather than increased wear resistance. Sample No. 3 showed intermediate values: 226 HV, 501.99 μm, and μ = 0.581. Sample 6, despite maximum hardness (441.66 HV), had an intermediate track width (550.55 μm) and did not show the lowest μ, confirming that hardness does not directly determine friction. Sample 1 combined the lowest μ (0.498) with the largest wear track (561.49 μm) and ball wear spot (914.88 μm), indicating significant adhesive material transfer. The minimum counterface wear was observed for Sample 5 (607.42 μm), although its wear track was the widest (625.57 μm) (Table 4).

Table 4 – Geometric parameters of wear tracks and wear spots on the 20X steel counterbody after EPT, compared with microhardness and the coefficient of friction

Specimen	Conditions	Wear track width, μm	Ball wear spot width, μm	Microhardness, HV	Coefficient of friction, μ
Initial	–	443.77	761.01	179.8	0.545
№ 1	320 V, 2 s	561.49	914.88	257.03	0.498
№ 2	300 V, 2 s	540.48	696.07	238.84	0.588
№ 3	280 V, 2 s	501.99	696.22	226	0.581
№ 4	260 V, 2 s	458.54	723.15	180.94	0.648
№ 5	300 V, 3 s	625.57	607.42	227.92	0.597
№ 6	300 V, 5 s	550.55	756.88	441.66	0.580

Thus, friction, microhardness, and wear geometry are governed by different mechanisms and are not directly correlated. Microstructural and phase-composition analysis is therefore required. Cross-sections were metallographically examined after etching with 4 wt.% nitric acid in 96 wt.% ethyl alcohol to reveal ferrite, pearlite, martensite, and grain boundaries.

The as-received 20X steel (Fig. 6a) exhibits a homogeneous ferrite-pearlite structure without pronounced variation with depth. At ×2000 in SE mode, equiaxed ferrite grains with sharp boundaries and uniformly distributed fine pearlite colonies are observed. The uniform contrast indicates the absence of phases with significantly different atomic numbers, characteristic of normalized low-alloy structural steel.

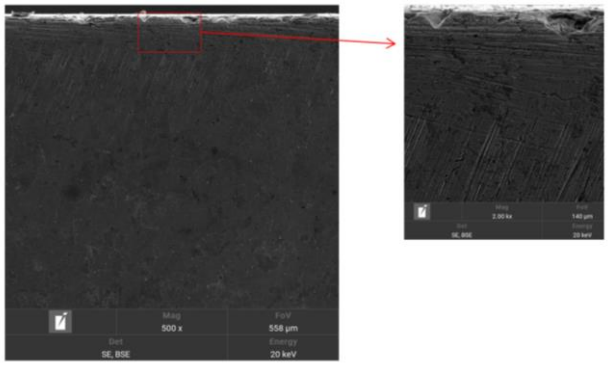


Figure 6a – Microstructure of 20X steel (initial state)

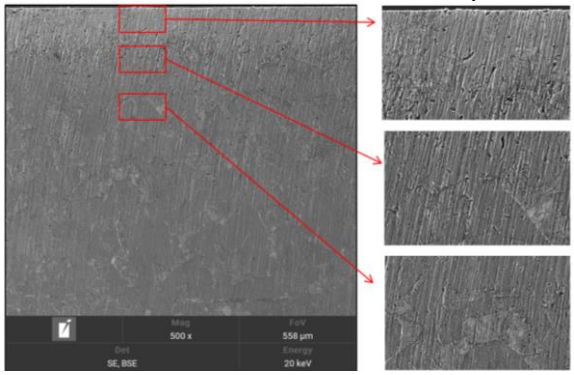


Figure 6b – Microstructure of 20X steel, sample No. 1 (320 V, 2 s)

After EPT in Mode No. 1 (320 V, 2 s), the cross-section (Fig. 6b) shows pronounced zonality. The near-surface zone (×2000, position 1) contains a fine needle-like structure oriented mainly perpendicular to the surface, characteristic of martensite formed by rapid heating to the austenitizing temperature and electrolyte quenching. The transition zone (position 2) contains martensitic regions and light-colored areas indicating incomplete austenitization. In the lower zone (position 3), the structure approaches the initial ferrite-pearlite state, confirming that EPT affects mainly the near-surface layer.

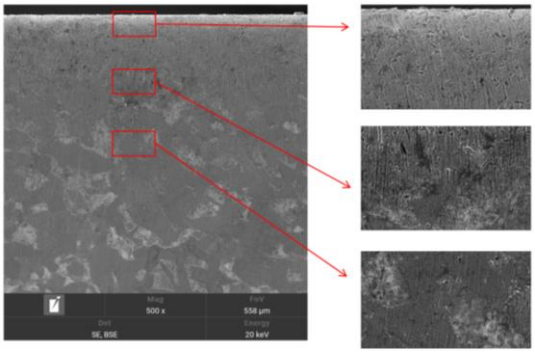


Figure 6c – Microstructure of 20X steel, specimen No. 4 (260 V, 2 s)

Specimen No. 4 (260 V, 2 s) shows no pronounced zonality at ×500 (Fig. 6c). At ×2000, the near-surface zone (position 1) exhibits a weak fine-grained relief, while positions 2 and 3 retain a ferrite-pearlite structure with partially coarsened grains. The absence of a pronounced martensitic layer agrees with the microhardness of 180.94 HV, confirming that 260 V for 2 s is insufficient for complete surface austenitization and martensitic transformation.

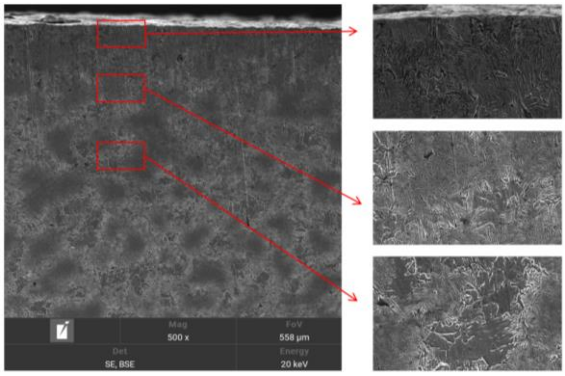


Figure 6d – Microstructure of 20X steel, sample No. 6 (300 V, 5 s)

The most significant structural changes were observed in Sample No. 6 (300 V, 5 s) (Fig. 6d). At ×500, a homogeneous fine-grained dark zone occupies the entire observed cross-section, while at ×2000, a well-developed needle- and plate-like martensitic structure extends throughout the section depth (at least 500 μm). Unlike Sample No. 1, where martensite is confined to the near-surface layer, Sample No. 6 shows deeper heating, explaining its maximum microhardness (441.66 HV). X-ray diffraction analysis was therefore performed to confirm these findings.

XRD was performed for the as-received sample and EPT Modes No. 1 (320 V, 2 s), No. 4 (260 V, 2 s), and No. 6 (300 V, 5 s). The diffractograms (Fig. 7) show (110), (200), and (211) α-Fe reflections with a BCC lattice. No residual austenite (γ-Fe) or Fe_3C reflections were detected. The absence of austenite confirms rapid electrolyte quenching and complete martensitic transformation under effective EPT conditions (Table 5).

In all treated samples, the surface layer consists exclusively of α′-martensite (BCC lattice), with (110), (200), and (211) α-Fe reflections identified; no retained austenite (γ-Fe) or Fe_3C reflections were detected, confirming a high electrolyte quenching rate. This is consistent with SEM data: Sample No. 1 shows fine-needle martensite near the surface, Sample No. 6 shows martensite throughout the section (≥500 μm), while Sample No. 4 lacks a continuous martensitic layer, matching its low hardness (180.94 HV).

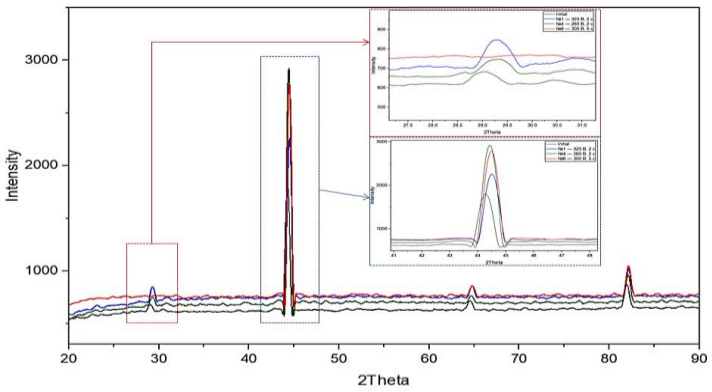


Figure 7 – Diffractograms of 20X steel in the as-received condition and after EPT:
a) full range 2θ = 20-90°; b) magnified fragment in the (110) reflection region

Table 5 – X-ray peak parameters and crystallite size determined by the Scherrer method for 20X steel

Sample	2θ, °	(hkl)	d, Å	FWHM, °	Iotn, %	D, nm
Initial	44.26	(110)	2.0464	0.1771	100	48.4
	64.69	(200)	1.4409	0.3542	4.3	26.5
	81.87	(211)	1.1767	0.1574	14.3	66.8
№ 1 (320 V, 2 s)	44.49	(110)	2.0365	0.1771	100	48.5
	64.73	(200)	1.4402	0.3936	4.9	23.9
	82.10	(211)	1.1740	0.1968	12.0	53.5
№ 4 (260 V, 2 s)	44.39	(110)	2.0406	0.1574	100	54.5
	64.68	(200)	1.4412	0.4723	1.9	19.9
	82.03	(211)	1.1747	0.1574	8.7	66.9
№ 6 (300 V, 5 s)	44.46	(110)	2.0379	0.1378	100	62.3
	64.81	(200)	1.4386	0.3149	3.1	29.9
	82.12	(211)	1.1737	0.1378	9.8	76.5

A weak oxide reflection (2θ ≈ 29.5°, presumably Fe_3O_4) appears in the initial sample and Mode No. 4, intensifies in Mode No. 1 (short 2 s exposure limits oxide removal), and disappears in Mode No. 6 (longer 5 s exposure restores the oxide layer). This oxide phase does not prevent Mode No. 1 from achieving the minimum friction coefficient (0.498), since the martensitic structure – not the oxide film – governs friction behavior.

The (110) reflection shifts to larger 2θ angles (44.26°→44.39–44.49°), corresponding to a decrease in lattice constant a from 2.894 Å to 2.880-2.886 Å. The largest shift occurs in Mode No. 1 (a = 2.880 Å), indicating maximum carbon supersaturation and explaining its best tribological performance (μ = 0.498). Mode No. 4 shows the smallest shift (a = 2.886 Å), consistent with threshold austenitization at 260 V, its highest friction coefficient (0.648), and lowest hardness.

Crystallite size D(110) increases from 48.4 nm (as-received) to 48.5 nm (No. 1), 54.5 nm (No. 4), and 62.3 nm (No. 6). Mode No. 1's minimal D(110) growth despite the largest lattice shift indicates fine-block, high-stress martensite that impedes plastic deformation and lowers μ. Mode No. 6's larger D(110) (62.3 nm) reflects coarsening from deep heating, explaining its maximum hardness (441.66 HV) but not improved friction, since coarser blocks reduce dislocation-barrier density.

Overall, RSA, SEM, microhardness, and tribological results agree: hardening and friction behavior depend jointly on martensitic transformation completeness, solid-solution supersaturation (a), and block size (D(110)). Mode No. 1 (320 V, 2 s) balances hardness (257.03 HV) and low friction (μ = 0.498) via fine-block martensite (a = 2.880 Å, D = 48.5 nm), while Mode No. 6 (300 V, 5 s) maximizes hardness (441.66 HV) through block coarsening (62.3 nm) without friction benefit – underscoring the need to select EPT modes based on the part's operational requirements.

Conclusion

A comprehensive study of the influence of electrolytic plasma treatment (EPT) parameters on the microstructure, phase composition, and mechanical and tribological properties of 20X steel revealed several patterns linking structural changes to the operational characteristics of the surface layer.

X-ray diffraction showed that, in all investigated modes, α′-martensite with a body-centered cubic (BCC) lattice forms in the surface layer with a complete absence of retained austenite and carbide phases, indicating a high electrolyte quenching rate that precludes reverse transformation and carbide precipitation. Metallographic examination confirmed the zonal nature of structural changes: at 320 V, 2 s, the martensitic zone is limited to the near-surface layer, whereas at 300 V, 5 s, it extends to a depth of at least 500 μm – directly reflected in this mode's maximum microhardness (441.66 HV). A voltage of 260 V with a 2 s hold time was established as the threshold below which complete austenitization is not achieved, evidenced by hardness at the initial-state level (180.94 HV), minimal shift of the (110) reflection (RSA data), and absence of a pronounced martensitic layer (SEM data). Increasing hold time at fixed voltage primarily governs the depth of the martensitic zone and crystallite size, while increasing voltage at fixed hold time affects carbon supersaturation of the solid solution, reflected in the lattice parameter.

The best anti-friction properties were achieved at 320 V, 2 s (μ = 0.498), due to fine-block, high-stress martensite with maximum lattice compression (a = 2.880 Å) and a high defect density that reduces adhesive interaction with the counterface. In contrast, the mode with maximum hardness (441.66 HV) did not yield a comparable friction reduction, since coarsening of martensitic blocks to 62.3 nm lowers the density of dislocation-slip barriers – confirming the absence of a direct correlation between hardness and friction behavior.

Thus, the optimal EPT regime for 20X steel depends on operational requirements: 320 V, 2 s is recommended for parts under intense sliding friction, while 300 V, 5 s suits parts subjected to high contact loads requiring maximum surface hardness.

References

1. Spectroscopic study of electrolytic-plasma discharge during hardening of 20GL steel and its effect on microstructure and mechanical properties / B. Rakhadilov et al // Crystals. – 2025. – Vol. 15, № 11. – Art. 976. https://doi.org/10.3390/cryst15110976.
2. Adhesion mechanisms, evaluation techniques and modeling strategies in PVD coatings: from fundamentals to data-driven design / S.G. Jan et al // Journal of Materials Research and Technology. – 2026. – Available online. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2026.01.234.
3. Influence of plasma electrolytic hardening modes on the structure and properties of 65G steel / B.K. Rakhadilov et al // Eurasian Journal of Physics and Functional Materials. – 2021. – Vol. 5, № 3. – P. 209-221. https://doi.org/10.32523/ejpfm.2021050306.
4. Investigation of changes in the structural-phase state and the efficiency of hardening of 30CrMnSiA steel by the method of electrolytic plasma thermocyclic surface treatment / D. Baizhan et al // Coatings. – 2022. – Vol. 12, № 11. – Art. 1696. https://doi.org/10.3390/coatings12111696.
5. Investigation of the effect of technological parameters of the electrolyte-plasma carburization method on the phase structure and mechanical properties of 20X structural steel / B. Rakhadilov et al // AIMS Materials Science. – 2023. – Vol. 10, № 5. – P. 934-947.
6. Experimental and mathematical modeling study of plasma electrolytic oxidation (PEO) for surface hardening of 20Ch steel / K. Kombayev et al // Materials. – 2024. – Vol. 17, № 24. – Art. 6043. https://doi.org/10.3390/ma17246043.
7. Effect of electrolytic-plasma hardening on the microstructure and tribological properties of low-alloy steels / B. Rakhadilov et al // Metals. – 2025. – Vol. 15, № 7. – Art. 698. https://doi.org/10.3390/met15070698.
8. The impact of technological parameters of electrolytic-plasma treatment on changes in the mechano-tribological properties of steel 45 / B. Rakhadilov et al // AIMS Materials Science. – 2024. – Vol. 11, № 4. – P. 666-683.
9. GOST 4543-2016. Metal products made of structural alloy steel. Specifications. – Moscow : Standartinform, 2017. – 31 p. (In Russian).
10. Effect of electropolishing on the microstructure and tribological properties of electrolyte-plasma borided layers on 30KhGSA steel / L. Sulyubayeva et al // Materials. – 2025. – Vol. 18, № 21. – Art. 4867. https://doi.org/10.3390/ma18214867.
11. ASTM G99-17. Standard test method for wear testing with a pin-on-disk apparatus. – West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017.

12. ASTM G133-05(2016). Standard test method for linearly reciprocating ball-on-flat sliding wear. – West Conshohocken, PA: ASTM International, 2016.
13. ISO 14577-1:2015. Metallic materials – Instrumented indentation test for hardness and materials parameters – Part 1: Test method. – Geneva : International Organization for Standardization, 2015.

Funding Information

This article was prepared as part of the MNVO research grant project BR24992864 «Development of Equipment and Technologies for the Surface Treatment of Parts for the Metalworking Industry».

А. Кусайнов, Г. Жүнісова*, Н. Магазов, А. Кеңесбеков, Л. Баятанова
Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті,
070004, Қазақстан Республикасы, Өскемен қаласы, Серікбаев көшесі, 19
*e-mail: junusova6@gmail.com

20Х БОЛАТЫНЫҢ МИКРОҚҰРЫЛЫМЫНА, ФАЗАЛЫҚ ҚҰРАМЫНА ЖӘНЕ МЕХАНИКАЛЫҚ-ТРИБОЛОГИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІНЕ ЭЛЕКТРОЛИТТІ-ПЛАЗМАЛЫҚ ШЫҢДАУ ПАРАМЕТРЛЕРІНІҢ ӘСЕР

Бұл мақалада электролит-плазмалық өңдеудің (ЭПӨ) параметрлерінің кернеу (260-320 В) және ұстау уақыты (2-5 с) – 20Х болатының микроқұрылымына, фазалық құрамына, микроқаттылығына, серпімділік модуліне және трибологиялық қасиеттеріне әсері зерттелген. Өңдеу концентрациясы 12 масс.% Na_2CO_3 сулы ерітіндісінде жүргізілді. Рентгендік дифракциялық талдау және растрлық электрондық микроскопия қалдық аустенит немесе карбидті фазалар болмаған кезде дене-центрленген текше (ДЦТ) торлы α'-мартенситтің түзілгенін көрсетті. Толық аустениттену қол жеткізілмеген шекті өңдеу режимі 260 В, 2 с болды. Ұстау уақытын 300 В кернеуде 5 с дейін ұлғайту микроқаттылықты 441,66 HV дейін екі есе дерлік арттырды, ал 2 с кезінде кернеуді арттыру негізінен көміртегінің қатты ерітіндіде қанығуына әсер етті. Ең төмен үйкеліс коэффициенті (μ = 0,498) 320 В, 2 с режимінде алынды, бұл максималды қаттылық әрдайым ең жақсы трибологиялық сипаттамаларға сәйкес келе бермейтінін көрсетеді. Алынған нәтижелер ЭПӨ параметрлерін 20Х болатының қажетті пайдалану қасиеттеріне сәйкес таңдау қажеттігін көрсетеді.

Түйін сөздер: *электролитті-плазмалық өңдеу; 20Х болаты; мартенсит; микроқаттылық; фазалық құрам; рентгендік дифракциялық талдау; үйкеліс коэффициенті; беткі қабатты шыңдау.*

А. Кусайнов, Г. Жүнісова*, Н. Магазов, А. Кеңесбеков, Л. Баятанова
Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева,
070004, Казахстан , г. Усть-Каменогорск, ул. Серикбаева, 19
*e-mail: junusova6@gmail.com

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОГО УПРОЧНЕНИЯ НА МИКРОСТРУКТУРУ, ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛИ 20Х

Данная статья исследует влияние параметров электролитно-плазменной обработки (ЭПО) напряжения (260-320 В) и времени выдержки (2-5 с) – на микроструктуру, фазовый состав, микротвёрдость, модуль упругости и трибологические свойства стали 20Х. Обработка проводилась в водном растворе Na_2CO_3 концентрацией 12 масс.%. Рентгеноструктурный анализ и растровая электронная микроскопия показали формирование α'-мартенсита с объёмно-центрированной кубической (ОЦК) решёткой без остаточного аустенита или карбидных фаз. Пороговым режимом обработки являлся режим 260 В при 2 с, при котором полная аустенитизация не достигалась. Увеличение времени выдержки до 5 с при 300 В почти удвоило микротвёрдость до 441,66 HV, тогда как повышение напряжения при 2 с преимущественно влияло на пересыщение твёрдого раствора углеродом. Минимальный коэффициент трения (μ = 0,498) был получен при 320 В в течение 2 с, что указывает на то, что максимальная твёрдость не всегда соответствует наилучшим трибологическим характеристикам. Полученные результаты демонстрируют, что параметры ЭПО должны подбираться в зависимости от требуемых эксплуатационных свойств стали 20Х.

Ключевые слова: *электролитно-плазменная обработка; сталь 20Х; мартенсит; микротвёрдость; фазовый состав; рентгенофазовый анализ; коэффициент трения; поверхностное упрочнение.*

Information about the authors

Arystanbek Kussainov – PhD doctoral student in Technical Physics, East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbaev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; e-mail: arys20055@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4623-4681.

Gulnara Zhuniskyzy Zhunissova* – Master of Technical Physics, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; e-mail: junusova6@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-2277-6666.

Nurtoleu Magazov – Researcher, Scientific Center «Protective and Functional Coatings», D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; e-mail: magazovn@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9941-9199.

Aidar Kengesbekov – PhD, Leading Researcher at the Scientific Center «Protective and Functional Coatings» at the D.Serikbaev East State Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; e-mail: kenesbekovaidar@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5630-9467.

Lyaila Bolatkanovna Bayatanova – PhD, Associate Professor at «D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University» (“Center of Physics”), Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; e mail: leila_1809@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5630-4746.

Авторлар туралы мәліметтер

Арыстанбек Ерланович Кусайнов – «Техникалық физика» мамандығы бойынша докторант, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан; e-mail: arys20055@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4623-4681.

Гүлнара Жүнісқызы Жүнісова* – «Техникалық физика» мамандығы бойынша магистр, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан; e-mail: junusova6@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-2277-6666.

Нуртолеу Магзумбекович Магазов – ғылыми қызметкер, «Қорғаныс және функционалдық жабындар» ғылыми орталығы, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан; e-mail: magazovn@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9941-9199.

Айдар Бақытбекұлы Кеңесбеков – PhD, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университетінің «Қорғаныс және функционалдық жабындар» ғылыми орталығының жетекші ғылыми қызметкері, Өскемен қ., Қазақстан; e-mail: kenesbekovaidar@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5630-9467.

Ляйла Болатхановна Баятанова – PhD, қауымдастырылған профессор «Д. Серикбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті» («Физика орталығы»), Өскемен қ., Қазақстан; e-mail: leila_1809@mail.ru. ORCID https://orcid.org/0000-0002-5630-4746.

Сведения об авторах

Арыстанбек Ерланович Кусайнов – докторант по специальности «Техническая физика», Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан; e-mail: arys20055@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4623-4681.

Гүлнара Жүнісқызы Жүнісова* – магистр по специальности «Техническая физика», Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан; e-mail: junusova6@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-2277-6666.

Нуртолеу Магзумбекович Магазов – научный сотрудник, Научный центр «Защитные и функциональные покрытия», Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан; e-mail: magazovn@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9941-9199.

Айдар Бақытбекұлы Кеңесбеков – PhD, ведущий научный сотрудник научного центра «Защитные и функциональные покрытия» в Восточно-Казахстанском техническом университете им. Д.Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан; e-mail: kenesbekovaidar@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5630-9467.

Ляйла Болатхановна Баятанова – PhD, ассоциированный профессор «Восточно-Казахстанского технического университета им. Д. Серикбаева» («Центр физики»), г. Усть-Каменогорск, Казахстан; e mail: leila_1809@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5630-4746.

Received 01.08.2026
Revised 02.09.2026
Accepted 08.09.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-34

BY 4.0
Check for updates

МРНТИ: 55.39.29

Е.Т. Абильмажинов, Е.Я. Шаяхметов, Д.К. Дукенбаев*, Р.А. Советбаев, В.Н. Коц
[1]Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А
*e-mail: Da_mir.1991@mail.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПНЕВМОДВИГАТЕЛЯ В СОСТАВЕ УСТАНОВКИ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ СЖАТОГО ВОЗДУХА

Аннотация: *В работе представлены результаты исследования нагрузочных характеристик реактивного пневмодвигателя струйного типа, работающего на энергии сжатого воздуха. Рассмотрены конструктивные особенности двухсекционного двигателя, в котором преобразование энергии осуществляется за счет реактивной силы струи и давления расширяющегося воздуха на лопасти ротора. Описан принцип работы устройства, включающий процессы подачи, распределения, расширения и выпуска рабочей среды. Для оценки эксплуатационных характеристик выполнено математическое моделирование в среде MATLAB/Simulink. Проведен анализ влияния входного давления на основные параметры работы двигателя: мощность, частоту вращения, угловую скорость и крутящий момент. Установлено, что увеличение давления приводит к устойчивому росту всех исследуемых показателей. Наиболее выраженная зависимость наблюдается для мощности и частоты вращения, что подтверждает возможность регулирования режимов работы путем изменения давления подаваемого воздуха. Рост крутящего момента обусловлен увеличением реактивной силы струи и воздействием расширяющейся среды на лопасти. Полученные результаты позволяют оценить работоспособность конструкции и характер изменения ее характеристик в широком диапазоне давлений. Они могут быть использованы при проектировании пневмодвигателей и выборе рациональных режимов их эксплуатации, а также служат основой для последующих экспериментальных исследований.*

Ключевые слова: *реактивный пневмодвигатель, сжатый воздух, энергоаккумулирование, входное давление, частота вращения, угловая скорость, крутящий момент, мощность.*

Введение

Реактивные (струйные) пневмодвигатели, работающие на сжатом воздухе, представляют собой класс устройств, в которых момент вращения рождается за счёт реактивной силы струи воздуха, истекающей из сопел, которые находятся на лопасти или вращающемся роторе. Принцип работы основан на законе сохранения импульса – при истечении воздуха из сопла возникает сила отдачи, направленная в сторону, противоположную вектору скорости истечения, что и приводит к вращению рабочего органа [1, 2]. Данный тип пневмодвигателей отличается простотой конструкции, отсутствием сложных трущихся пар, высокой работоспособностью и возможностью работы в условиях повышенной влажности и загрязненности рабочей среды [3, 4].

В отличие от поршневых и пластинчатых пневмомоторов, реактивные двигатели на сжатом воздухе не требуют сложной системы смазки, имеют минимальный износ и могут развивать высокочастотные вращения при сравнительно небольшом рабочем давлении [5, 6]. В качестве основного недостатка таких двигателей стоит отметить все-таки относительно невысокий коэффициент полезного действия, который связан с потерями кинетической энергии выходящего воздуха. Однако в системах накопления энергии сжатого воздуха, где важными требованиями являются простота конструкции, надежность, скорость запуска и возможность работы от ресивера, реактивные пневмодвигатели могут рассматриваться как довольно перспективное техническое решение [7].

В инженерной практике активно используются разные виды пневматических двигателей: среди них можно выделить пластинчатые, поршневые, шестерёнчатые,

©Е.Т. Абильмажинов, Е.Я. Шаяхметов, Д.К. Дукенбаев, Р.А. Советбаев, В.Н. Коц, 2026

турбинные и струйные модели. Наиболее популярными стали пластинчатые и редукторные пневмодвигатели. Эти устройства находят широкое применение в ручных пневматических инструментах, промышленных приводах, шлифовальных машинах, гайковёртах, конвейерных системах и специализированных технологических установках. В качестве примеров серийных решений можно привести пневмодвигатели DEPRAG серий BASIC LINE, ADVANCED LINE и POWER LINE, пневмодвигатели и мотор-редукторы Gast Air Motors/Gearmotors, а также промышленные пневмодвигатели Atlas Copco серий LZB и LZL [8-10]. Целью работы является определение нагрузочных характеристик пневмодвигателя и оценка возможности его применения при различных значениях входного давления.

Материалы и методы

Объектом настоящего изыскания является реактивный пневмодвигатель, конструкция которого изображена на рисунке 1 [11]. Двигатель состоит из двухсекционного корпуса, каждая секция которого состоит из рабочей и разделительной камер. В рабочей камере установлен ротор с лопастями и сквозными каналами, жестко закрепленный на центральном полом валу. Внутри полого вала имеется неподвижная впускная труба, имеющая окна, предназначенные для подачи рабочего тела в рабочие камеры. Конструктивная схема пневмодвигателя показана на рисунке 1.

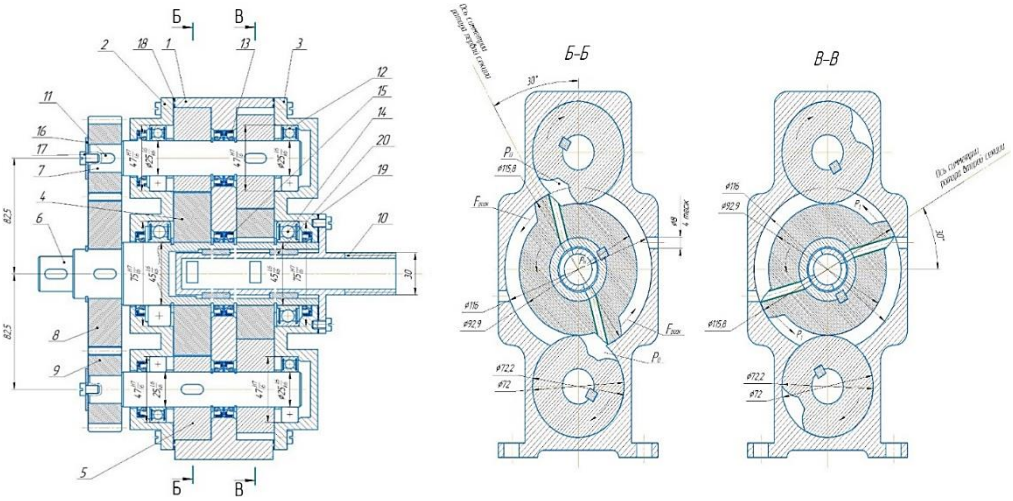


Рисунок 1 – Конструктивная схема многосекционного пневмодвигателя

Центральный полый вал вращается внутри впускной трубы. За счёт этого сжатый газ подаётся и распределяется между секциями двигателя. Рабочее тело сначала попадает в окна впускной трубы, затем проходит через сквозные отверстия полого вала и каналы ротора. Так он добирается до лопастей, где газ расширяется и создаётся вращающий момент.

Чтобы секции работали синхронно, ротор соединён зубчатой передачей с колесом-разделителем на параллельном валу. Вместе ротор и колесо-разделитель образуют рабочие камеры, объём которых меняется. Это позволяет последовательно разделять потоки рабочего тела и эффективно превращать энергию сжатого газа в механическую энергию вращения.

Когда газ совершил работу, он выходит через выпускные окна в корпусе двигателя. Секции отделены друг от друга торцевыми перегородками, но объединены общей системой подачи рабочего тела. Такая конструкция даёт каждой секции работать независимо, не нарушая целостности всего механизма.

Пневмодвигатель устроен довольно просто. Сжатая рабочая среда – это может быть пар, газ или жидкость – подаётся под давлением $P_{\text{н}}$ через прорези впускной трубы. Оттуда она попадает в ту часть корпуса, где в данный момент прорези трубы совпадают со сквозными каналами ротора.

В данном случае это будет первая секция корпуса. Проходя через сквозные каналы ротора, рабочая среда выбрасывается в полость рабочей камеры корпуса, при этом давление рабочей среды в рабочей камере падает с $P_{\text{н}}$ до P_o, а на лопасти начинает действовать

реактивная сила $F_{\text{реак}}$, создавая вращательный момент на центральном валу, на котором установлен ротор.

$$F_{\text{реак}} = M(V - V_0), \quad (1)$$

где M – секундный расход рабочей среды, кг/с;

V – скорость рабочей среды на выходе из сквозного канала ротора, м/с;

V_0 – скорость движения лопасти ротора в зоне расположения сквозного канала, м/с.

В это время во второй секции корпуса при закрытых сквозных каналах ротора, рабочая среда начинает расширяться, начиная прикладывать к лопасти давление P_1 (которое поменяется в процессе расширения на P_2, затем от P_2 на P_3), со второй секции корпуса.

$$P_1 = P \cdot S, \quad (2)$$

где P – давление рабочей среды во второй секции корпуса при расширении, Па;

S – площадь боковой поверхности лопасти, на которую действует давление рабочей среды, м^2.

При этом на лопасти действует сила давления $F_{\text{р}}$, изменяющаяся по мере расширения рабочей среды и также создающая крутящий момент по направлению вращения ротора. В результате происходит непрерывное вращение за счет чередования процессов подачи, расширения и выпуска рабочей среды в двух секциях корпуса, а отбор мощности с центрального полого вала производится через хвостовик.

$$M_{\text{кр}} = \left(F_{\text{реак}} + P_1\right) \cdot 2R + M_0, \quad (3)$$

где $F_{\text{реак}}$– реактивная сила, возникающая при истечении рабочей среды из сквозных каналов ротора;

P_1 – сила давления рабочей среды, действующая на лопасть во второй секции корпуса при расширении;

R – радиус, определяющий плечо действия сил относительно оси вращения;

M_0 – дополнительный реактивный момент, возникающий при выбросе остатков рабочей среды из сквозных каналов ротора.

$$2R + M_0 = F_0 \cdot 2R, \quad (4)$$

где F_0 – реактивная сила, возникающая при выбросе остаточной рабочей среды из сквозных каналов ротора.

Результаты и обсуждение

Для определения нагрузочных характеристик реактивного пневмодвигателя струйного типа была проведена компьютерная симуляция в среде MATLAB/Simulink. В модели была задана подача сжатого воздуха через входной канал двигателя с изменением входного давления в установленном диапазоне. В процессе моделирования фиксировались основные рабочие параметры: частота вращения вала, угловая скорость, крутящий момент и мощность. Полученные расчётные значения были использованы для построения графических зависимостей рабочих характеристик пневмодвигателя от входного давления.

В качестве исходных параметров моделирования были заданы следующие значения:

- Рабочее избыточное давление: P = 6 бар.
- Абсолютное давление до отверстий: P_0 = 7·10⁵ Па.
- Показатель адиабаты воздуха: k = 1,4.
- Газовая постоянная: R = 287 Дж/(кг·К).
- Диаметр отверстия: d = 6 мм.
- Коэффициент расхода: C_d= 0,75.

Данные, полученные в результате симуляции показаны на рисунке 2.

Применяемый метод анализа графико-численных отношений и проведенный по его результатам анализ привел к тому, что стало ясно – увеличенное входящее давление сжатого воздуха сказывается на все главные эксплуатационные параметры реактивного пневмодвигателя. Робота пневмодвигателя на выходе в вал поступает мощность, которая с увеличением входного давления увеличивается фактически в линейной зависимости.

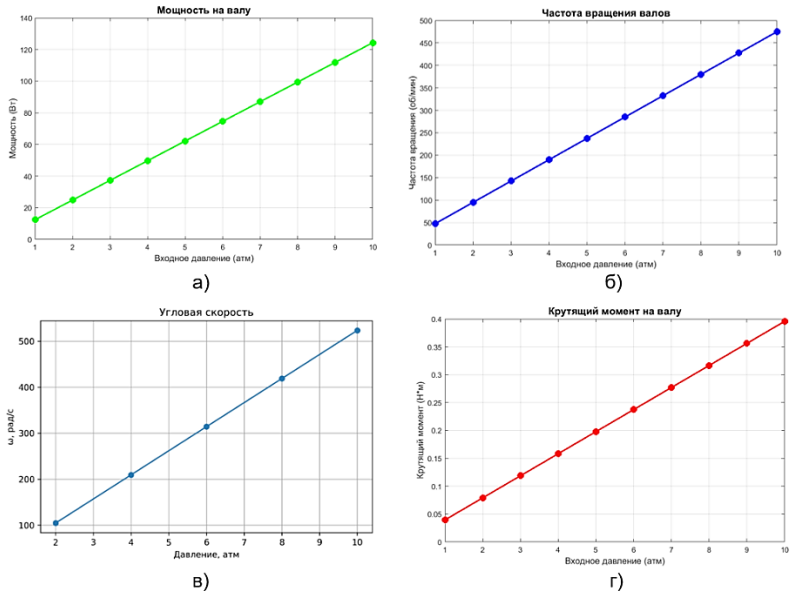


Рисунок 2 – Зависимость основных эксплуатационных характеристик реактивного пневмодвигателя от давления:
а – мощность; б – частота вращения лопасти; в – угловая скорость лопасти; г – крутящий момент

Объясняется это увеличением энергии потока рабочей среды, который уходит через сквозные каналы ротора. Иными словами, выросло давление подачи – выросла полезная мощность, развиваемая пневмодвигателем. Увеличивается и частота вращения вала при увеличении входного давления. Значит, характерная связь – взаимозависимость между скоростным режимом работы пневмодвигателя и давлением сжатого воздуха на входе, что вполне естественно. Увеличивается угловая скорость вращения ротора при увеличении давления рабочей среды. Это значит, что возросло давление, значит выросло истечение рабочей среды, возросла соответственно скорость вращения ротора. Увеличивается крутящий момент на валу пневмодвигателя при увеличении входящего давления. Увеличение крутящего момента происходит от увеличения реактивной силы струи и от увеличения воздействия рабочей среды на лопасти ротора.Наблюдается упорная зависимость всех рассматриваемых параметров от входящего давления. Мощность, частота вращения, угловая скорость, крутящий момент – все они при большом входящем давлении вырастают. Полученные в MATLAB/Simulink результаты имеют расчётно-модельный характер и позволяют предварительно оценить влияние входного давления на рабочие характеристики пневмодвигателя. Для уточнения полученных зависимостей в дальнейшем планируется изготовление опытного образца пневмодвигателя в металле и проведение экспериментальных испытаний. Это позволит получить более точные данные о мощности, частоте вращения, угловой скорости и крутящем моменте при различных режимах подачи сжатого воздуха, а также сравнить результаты компьютерного моделирования с реальными эксплуатационными показателями.

Заключение

В результате проведенного компьютерного моделирования и его реализации в среде MATLAB/Simulink были построены графические зависимости ключевых рабочих характеристик реактивного пневмодвигателя от давления входящего сжатого воздуха. Проведенный анализ кривых показал, что с ростом давления наблюдается устойчивое увеличение мощности, частоты вращения, угловой скорости и крутящего момента.

Возрастающая почти линейно мощность на валу объясняется увеличением избыточной энергии истечения сжатого воздуха через сопловые отверстия. Аналогично, частота вращения растет с увеличением давления, что позволяет осуществлять регулирование работы пневмодвигателя путем изменения дозированного давления. Угловая скорость в диапазоне давления от 2 до 10 атм возрастает с 104,6 до 523,3 рад/с, крутящий момент на валу также демонстрирует положительную связь с входным давлением.

Таким образом, результаты моделирования подтверждают то, что входное давление является определяющим параметром, который влияет на нагрузочные и скоростные характеристики пневмодвигателя, и то, что полученные зависимости подтверждают работоспособность предложенной конструкции и возможность его применении в системе накопления энергии сжатого воздуха.

Список литературы

1. Пневматический привод горных машин / А.В. Иванов и др. – Москва: ЦИНТИАМ, 1963. – 58 с.
2. Beater P. Pneumatic drives: system design, modelling and control / P. Beater. – Berlin: Springer-Verlag, 2007. – 323 p.
3. Majumdar S.R. Pneumatic systems: principles and maintenance / S.R. Majumdar. – New Delhi: Tata McGraw-Hill, 1996. – 282 p.
4. Control performance of an air motor: can air motors replace electric motors? / S.R. Pandian et al // Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation. – 1999. – Vol. 1. – P. 518-524. https://doi.org/10.1109/ROBOT.1999.770029.
5. Калиев А.К. Анализ рабочих процессов пластинчатого пневмомотора с учётом утечек рабочего тела / А.К. Калиев, Р.Т. Смагулов // Вестник машиностроения. – 2021. – № 5. – С. 34-39.
6. Modeling and analysis of a novel rotary pneumatic motor with symmetric multi-cylinder / Y. Xing et al // Chinese Journal of Mechanical Engineering. – 2019. – Vol. 32, № 1. – Art. 15.
7. Beater P. Modelling and control of pneumatic vane motors / P. Beater // International Journal of Fluid Power. – 2004. – Vol. 5, № 1. – P. 7-16.
8. DEPRAG SCHULZ GMBH & CO. KG. Air motors: product catalog [Electronic resource]. – Amberg : DEPRAG, 2024.
9. Gast Manufacturing, Inc. Air motors/gearmotors: product catalog [Electronic resource]. – Benton Harbor : Gast Manufacturing, 2018.
10. Atlas Copco. Air motors LZB/LZL: product catalogue [Electronic resource]. – Stockholm : Atlas Copco Industrial Technique, 2024.
11. Патент № 32403 Республика Казахстан, МПК не указан. Роторная машина / С.М. Анибаев, А.Ж. Акимжанов; заявитель и патентообладатель не указаны. – Заявл. 10.03.2016 ; опубл. 29.09.2017.

References

1. Pnevmaticheskii privod gornykh mashin / A.V. Ivanov i dr. – Moskva: TSINTIAM, 1963. – 58 s. (in Russian).
2. Beater P. Pneumatic drives: system design, modelling and control / P. Beater. – Berlin: Springer-Verlag, 2007. – 323 p. (in English).
3. Majumdar S.R. Pneumatic systems: principles and maintenance / S.R. Majumdar. – New Delhi: Tata McGraw-Hill, 1996. – 282 p. (in English).
4. Control performance of an air motor: can air motors replace electric motors? / S.R. Pandian et al // Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation. – 1999. – Vol. 1. – P. 518-524. https://doi.org/10.1109/ROBOT.1999.770029. (in English).
5. Kaliev A.K. Analiz rabochikh protsessov plastinchatogo pnevmomotora s uchetom utechek rabochego tela / A.K. Kaliev, R.T. Smagulov // Vestnik mashinostroeniya. – 2021. – № 5. – S. 34-39. (in Russian).
6. Modeling and analysis of a novel rotary pneumatic motor with symmetric multi-cylinder / Y. Xing et al // Chinese Journal of Mechanical Engineering. – 2019. – Vol. 32, № 1. – Art. 15. (in English).
7. Beater P. Modelling and control of pneumatic vane motors / P. Beater // International Journal of Fluid Power. – 2004. – Vol. 5, № 1. – P. 7-16. (in English).
8. DEPRAG SCHULZ GMBH & CO. KG. Air motors: product catalog [Electronic resource]. – Amberg : DEPRAG, 2024. (in English).
9. Gast Manufacturing, Inc. Air motors/gearmotors: product catalog [Electronic resource]. – Benton Harbor : Gast Manufacturing, 2018. (in English).
10. Atlas Copco. Air motors LZB/LZL: product catalogue [Electronic resource]. – Stockholm : Atlas Copco Industrial Technique, 2024. (in English).

11. Patent № 32403 Respublika Kazakhstan, MPK ne ukazan. Rotornaya mashina / S.M. Anibaev, A.Zh. Akimzhanov; zayavitel' i patentoobladatel' ne ukazany. – Zayavl. 10.03.2016 ; opubl. 29.09.2017. (in Russian).

Финансирование

Данное исследование выполнено в рамках проекта AP26197931 «Разработка и исследование ветро-солнечной установки с автоматизированным управлением для бесперебойного электро- и водоснабжения сельскохозяйственных объектов» Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан.

E.T. Abilmazhinov, E.Ya. Shayakhmetov, D.K. Dukenbaev*, R.A. Sovetbayev, V.N. Kots
Shakarim University,
20A Glinki St., Semey 071412, Republic of Kazakhstan
*e-mail: Da_mir.1991@mail.ru

DETERMINATION OF LOAD CHARACTERISTICS AND DESIGN OF A PNEUMATIC MOTOR AS PART OF A COMPRESSED AIR ENERGY STORAGE SYSTEM

This paper presents the results of a study on the load characteristics of a jet-type reaction pneumatic motor powered by compressed air. The design features of a two-stage motor are considered, in which energy conversion is achieved through the reaction force of the air jet and the pressure exerted by the expanding compressed air on the rotor blades. The operating principle of the device is described, including the processes of air supply, distribution, expansion, and exhaust of the working medium. To evaluate the operational characteristics, mathematical modeling was carried out in the MATLAB/Simulink environment. The influence of inlet pressure on the main performance parameters of the pneumatic motor, including output power, rotational speed, angular velocity, and torque, was analyzed. The results show that increasing the inlet pressure leads to a steady increase in all investigated parameters. The most pronounced dependence was observed for output power and rotational speed, confirming the possibility of controlling the operating modes by varying the supply air pressure. The increase in torque is attributed to the higher reaction force generated by the air jet and the enhanced effect of the expanding air on the rotor blades. The obtained results make it possible to evaluate the operability of the proposed design and the variation of its performance over a wide pressure range. These findings can be applied to the design of pneumatic motors, the selection of optimal operating conditions, and serve as a basis for further experimental investigations.

Key words: *reaction pneumatic motor, compressed air, compressed air energy storage, inlet pressure, rotational speed, angular velocity, torque, power.*

Е.Т. Абильмажинов, Е.Я. Шаяхметов, Д.Қ. Дүкенбаев*, Р.А. Советбаев, В.Н. Коц
Шәкәрім университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинки көш., 20А
*e-mail: Da_mir.1991@mail.ru

СЫҒЫЛҒАН АУА ЭНЕРГИЯСЫН ЖИНАҚТАУ ҚОНДЫРҒЫСЫ ҚҰРАМЫНДАҒЫ ПНЕВМАТИКАЛЫҚ ҚОЗҒАЛТҚЫШТЫҢ ЖҮКТЕМЕЛІК СИПАТТАМАЛАРЫН АНЫҚТАУ ЖӘНЕ ЖОБАЛАУ

Жұмыста сығылған ауа энергиясымен жұмыс істейтін ағынды типтегі реактивті пневматикалық қозғалтқыштың жүктемелік сипаттамаларын зерттеу нәтижелері ұсынылған. Энергияны түрлендіру ағынның реактивті күші мен кеңейетін ауаның ротор қалақшаларына түсіретін қысымы есебінен жүзеге асатын екі секциялы қозғалтқыштың конструкциялық ерекшеліктері қарастырылды. Құрылғының жұмыс істеу қағидаты, оның ішінде жұмыс ортасын беру, тарату, кеңейту және шығару процестері сипатталған. Пайдалану сипаттамаларын бағалау мақсатында MATLAB/Simulink ортасында математикалық модельдеу жүргізілді. Қозғалтқыштың негізгі жұмыс параметрлеріне, атап айтқанда қуатына, айналу жиілігіне, бұрыштық жылдамдығына және айналу моментіне кіріс қысымының әсері талданды. Зерттеу нәтижелері кіріс қысымының артуы қарастырылған барлық көрсеткіштердің тұрақты өсуіне алып келетінін көрсетті. Ең айқын тәуелділік қуат пен айналу жиілігі үшін байқалды, бұл берілетін ауаның қысымын өзгерту арқылы қозғалтқыштың жұмыс режимдерін реттеуге болатындығын дәлелдейді. Айналу моментінің артуы ағынның реактивті күшінің ұлғаюымен және кеңейетін ауаның ротор қалақшаларына әсерінің күшеюімен түсіндіріледі. Алынған нәтижелер қозғалтқыш конструкциясының жұмысқа қабілеттілігін және оның сипаттамаларының қысымның кең диапазонында өзгеру заңдылықтарын бағалауға мүмкіндік береді. Зерттеу нәтижелері пневматикалық қозғалтқыштарды жобалау

кезінде, олардың тиімді жұмыс режимдерін таңдауда, сондай-ақ кейінгі эксперименттік зерттеулерге негіз ретінде пайдаланылуы мүмкін.

Түйін сөздер: *реактивті пневматикалық қозғалтқыш, сығылған ауа, энергияны жинақтау, кіріс қысымы, айналу жиілігі, бұрыштық жылдамдық, айналу моменті, қуат.*

Авторлар туралы мәліметтер

Ермек Толегенович Абильмажинов – техника ғылымдарының докторы, Шәкәрім университетінің «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасының профессоры, Қазақстан Республикасы; e-mail: eras71@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7344-097.

Ержан Ярнарович Шаяхметов – PhD, «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар», Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: shaiakhmeterzh@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7986-0083.

Дамир Кайратович Дукенбаев* – «Биоинженерлік жүйелер» кафедрасының докторанты; Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: Da_mir.1991@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-4197-9133.

Раил Аянович Советбаев – PhD, «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар», Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: rsovetbayev@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-3605-515X.

Владислав Николаевич Коц – «Машина жасау» мамандығы бойынша техника ғылымдарының магистрі, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы, Инжиниринг орталығының ғылыми қызметкері; e-mail: kotsvladislav1@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-5312-9719.

Сведения об авторах

Ермек Толегенович Абильмажинов – доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматизация и информационные технологии», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: eras71@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7344-097.

Ержан Ярнарович Шаяхметов – PhD, старший преподаватель кафедры «Автоматизация и информационные технологии», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: shaiakhmeterzh@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7986-0083.

Дамир Кайратович Дукенбаев* – докторант кафедры «Биоинженерных систем», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: Da_mir.1991@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-4197-9133.

Раил Аянович Советбаев – PhD, заведующий кафедры «Автоматизация и информационные технологии», Шәкәрім университет, Республики Казахстан; e-mail: rsovetbayev@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-3605-515X.

Владислав Николаевич Коц – магистр технических наук по специальности «Машиностроение», Шәкәрім университет, Республика Казахстан, научный сотрудник Инжинирингового центра; e-mail: kotsvladislav1@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-5312-9719.

Information about the authors

Yermek Tolegenovich Abilmazhinov – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Automation and Information Technologies, Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: eras71@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7344-097.

Yerzhan Shayakhmetov – PhD, «Automation and Information Technologies», Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: shaiakhmeterzh@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7986-0083.

Damir Kairatovich Dukenbaev* – doctoral student of the Department of Bioengineering Systems; Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: Da_mir.1991@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-4197-9133.

Rail Ayanovich Sovetbayev – PhD, «Automation and Information Technologies», Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: rsovetbayev@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-3605-515X.

Vladislav Nikolaevich Kots – Master of Technical Sciences in Mechanical Engineering, Shakarim University, Republic of Kazakhstan; Researcher at the Engineering Center; e-mail: kotsvladislav1@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-5312-9719.

Поступила в редакцию 17.07.2026
Принята к публикации 08.09.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-35

IRSTI: 14.37.31

O.N. Sadu*, G.D. Bazil[1], A. Ainul[2]
[1]Almaty University of Power Engineering and Telecommunications,
050013, Almaty, Kazakhstan, st. Baitursynuly, 126/1
[2]Universiti Teknologi PETRONAS,
32610 Seri Iskandar, Perak Darul Ridzuam, Malaysia
*e-mail: o.sadu@aues.kz

AUTOMATED SYSTEM FOR PREDICTING FAILURES OF LOW-VOLTAGE ELECTRIC MOTORS IN ELECTRIC POWER PLANTS

Annotation: *In industrial systems or in electric-power plants, such as pumps, compressors and fans, induction motors are used in a wide variety of applications, and electrical or mechanical problems can lead to unexpected shutdowns, loss of productivity, and thermal stress or vibration. In this study, an automated fault-diagnosis framework is presented, which is tested on a 14-file subset of the University of Ottawa Electric Motor Dataset (UOEMD-VAFCVS), consisting of synchronized measurements of vibration, acoustics and temperature, acquired during both constant speed and ramp speed operations. This pipeline features multi-sensor signal processing (such as FFT, Welch PSD, STFT, and discrete wavelet transform, and hilbert-envelope analysis) and classification using Random Forest (RF), convolutional neural network (CNN) and hybrid CNN-Transformer classifiers. The CNN-Transformer outperformed the CNN and RF in terms of the best observed performance (91.4% accuracy; macro F1 = 0.91) in the held-out test set. When subjected to 20 dB AWGN, it was not only less accurate with a loss of 1.9 percentage points, but it also incurred a CPU inference latency of 8.7 ms per one second window. The results confirm the feasibility of multi-sensor fusion and attention-based temporal modelling for predictive maintenance, and the small number of sensors in the subset limits the statistical and industrial validation of the technique.*

Key words: *induction motor fault diagnosis, predictive maintenance, multi-sensor fusion, signal processing, machine learning, CNN-Transformer, variable-speed operation and bearing diagnosis.*

Introduction

The most common types of electrical machines in power-generation and industrial settings are induction motors (IMs). Their excellent construction, efficiency and cheapness have seen them become the standard prime mover in the manufacturing, oil and gas, mining and electric power plants. When operating under an inverter-fed, variable-speed, operation – which is becoming increasingly popular in modern plants – IMs have dynamic load profiles that produce non-stationary vibration and acoustic signatures, thus making fault detection more challenging.

IMs have a weakness of gradual degradation even though they are structurally consistent. Some electrical faults are broken rotor bars (BRBs), stator inter-turn short circuits (ITSCs), insulation breakdown and supply voltage anomalies; mechanical faults comprise bearing wear, shaft misalignment, rotor eccentricity, and rotor imbalance [1]. A lot of initial faults do not have any outward symptoms and thus are hard to detect. Reactive maintenance results in unplanned downtime and expensive repairs; and scheduled preventive maintenance results in unnecessary replacement of parts. Industry 4.0 thus requires the presence of data-driven predictive maintenance systems that can identify new faults prior to failure [2].

The UOEMD-VAFCVS dataset provides synchronized multi-sensor recordings under both fixed-speed and ramp-speed regimes, making it a suitable benchmark for assessing fault-diagnosis methods under the non-stationary operating conditions that motivate this study. Detailed sensor, sampling and recording specifications are therefore reported once in the Materials and methods section.

Research Gap and Contributions

Most published diagnostic systems have been tested in constant-speed cases, with little or no investigation in variable-speed (ramp) cases, where signal non-stationarity is a problem for traditional spectral analysis. Moreover, the multi-sensor fusion of vibration, acoustic, and temperature channels

©O.N. Sadu, G.D. Bazil, A. Ainul, 2026

are not usually performed in a synchronized manner; most of the studies do not use more than one modality, and they do not utilize the complementary data offered by co-located sensors [3, 4]. The existing models hardly incorporate fault classification and prognostic factors such as degradation monitoring and thermal trend analysis [5].

The current system fills these gaps by:

1. Multi-sensor predictive model on UOEMD-VAFCVS.
2. A hybrid CNN–Transformer model in non-stationary ramp-speed conditions.
3. Multi-domain signal processing and synchronized fusion of vibration, acoustic and temperature information.
4. The classification results will be compared and contrasted to determine actual deployment capabilities, per-class behaviour, noise robustness, and CPU inference time.

Literature review

Motor Current Signature Analysis (MCSA) have been extensively studied for the purpose of Broken rotor bar (BRB) diagnosis, especially by studying the harmonic sidebands of the supply frequency [6, 7]. These techniques have shown good performance at constant speed and rated load, but often become unreliable when operating at light loads or variable speeds. Chisedzi and Muteba [8] presented the results of their research that decision-tree classification can compete in terms of accuracy and efficiency for load-invariant BRB detection, while Elhaija and Al-Haija [9] proved to be lightweight neural diagnosis with very low inference time. Antonello et al. [10] also argued experimentally the importance of variable selection in the machine learning-based BRB detection. All of these studies confirm the ability to data diagnose, but also illustrate that reported accuracy is highly data dependent and is strongly affected by the operating regime and benchmark design.

When fault signatures vary in speed, time-frequency representations and deep learning can be of interest. It is also difficult to detect ITSC faults at an early stage, as normal and fault current patterns can be similar. Chen et al. [11] obtained a noticeable no-load detection accuracy by using the start-up current envelope energy and support vector machines, while Kawady et al. [12] demonstrated that deep neural models can enhance the robustness of the no-load detection under supply-side interference. These findings are a motivation for representations that are not exclusively stationary spectra but can represent non-stationary and transient structure.

Traditionally, diagnosis of mechanical faults is performed using the vibration data, but complementary measurements such as acoustic and other indirect measurements can be used in combination with the casing-mounted accelerometers [14]. CNN-based spectrogram analysis has been successfully applied to rotor and bearing classification [15], and transformer-based methods have produced very high accuracy under controlled constant-load conditions [5]. More recent multi-modal work indicates that combining complementary sensing channels can improve multi-class discrimination; for example, Xu et al. [16] fused current, vibration and acoustic time series using an ensemble Transformer. However, direct numerical comparison across studies is limited by differences in motors, fault severity, load, speed regimes and train/test protocols.

Another challenge is domain shift under varying operating conditions and across disparate motors. Single machine or tightly controlled models may lose accuracy if mounting of the sensor, load or speed or the characteristics of the machine change. Cross domain adaptation with limited labelled data was demonstrated to enhance the target domain recognition by Chen and Chen [17]. This generalisation issue is particularly relevant for the current study, as the UOEMD-VAFCVS benchmark includes separate, physically distinct motors and several different speed regimes; therefore, it is important to make a distinction between source recordings to avoid misinterpretation of a limited hold-out result as the universal industrial performance.

Materials and methods

Dataset and Sensing Infrastructure

The UOEMD-VAFCVS data are used in all experiments. The entire benchmark includes recordings of eight three-phase Marathon Electric D396 motors having artificial faults. 420,000 samples per channel (SPC) at 42 kHz (10 s file) per channel, and five synchronized channels: three accelerometer channels (1, 3 and 4), an acoustic channel (2; PCB 130F20 microphone) and a temperature channel (5; integrated with PCB 603C01). The dataset includes four ramp profiles (15→45, 30→60, 45→15 and 60→30 Hz) and four fixed frequencies (15, 30, 45 and 60 Hz), giving 128 recording configurations across load conditions. The present proof-of-concept analysis uses 14 files representing the five evaluated fault classes—stator winding (S_W), bearing (B_R), voltage

unbalance (V_U), rotor unbalance (R_U) and bent shaft (K_A) – under fixed- and ramp-speed conditions. The restricted subset is treated as a study limitation rather than as a complete validation of the full benchmark.

A Programmable Logic Controller (PLC) manages the acquisition and preprocessing of the vibration sensor signals in a real-life implementation of the proposed automated system. The PLC constantly gathers the raw analog signals recorded by vibration accelerometers on the motor housing, uses threshold-based filtering to repress low amplitude noise, and transforms the conditioned signals into digital data streams at the requested rate. These digital outputs are subsequently sent to the diagnostic pipeline, where signal processing (FFT/Welch PSD, STFT, and DWT) are used to extract features that are fault related. PLC-processed vibration data is transformed into feature vectors that are then directly used as inputs to the machine learning models: Random Forest, CNN, and CNN-Transformer, which allows the automated system to produce real-time failure predictions. The system achieves this by combining signal conditioning in the PLC level with the upper machine learning layer to make sure that only high quality and noise-suppressed vibration data is used to generate the prognostic output leading to higher reliability and stability of predictions of failures in operational electric power plants.

Signal Processing and Characteristic Extraction

The processing pipeline includes 3 steps: (1) preprocessing/segmentation, (2) multi-domain feature extraction/sensor fusion and (3) model training/evaluation, which follow the pre-established multi-sensor monitoring structures [18, 19]. All channels are high-pass filtered at 0.5 Hz to remove DC drift and are z-score normalised based on statistics from the training data only, so that information from the validation or test partitions is not used to affect the preprocessing.

For principal classification analysis, signals are cut into 1.0 s windows (42,000 samples) with 50% overlap between the windows. Shorter 0.1-0.2 s windows are additionally used when analysing impulsive bearing behaviour. For ramp-speed recordings, STFT-based time-frequency representations preserve the evolution of frequency components as rotational speed changes [4].

For fixed-speed data, FFT and Welch power spectral density estimates are used to derive fundamental and harmonic amplitudes, spectral kurtosis and spectral centroid [6]. STFT spectrograms represent transient sidebands in ramp-speed data [4]. Discrete Wavelet Transform (DWT; Daubechies Db4/Db8) features include sub-band energy and kurtosis for impulsive behaviour [20], while Hilbert-envelope analysis is applied to band-pass-filtered resonance regions before spectral analysis of the demodulated signal [11]. Time-domain features comprise RMS, peak-to-peak amplitude, variance, skewness, kurtosis and crest factor. Features from the three accelerometers, microphone and temperature channel are combined with inter-channel correlation and coherence measures to represent mechanical-acoustic-thermal coupling.

Machine Learning Models, Training and Hyperparameter Selection

Three model families are compared to separate the contribution of handcrafted features, local spectro-temporal representation learning and long-range temporal attention. (1) Random Forest (RF) operates on the handcrafted multi-domain feature vector and provides a computationally inexpensive baseline [8]. (2) The CNN receives STFT spectrograms as two-dimensional inputs and learns local frequency-pattern representations through convolution and pooling [15]. (3) The CNN–Transformer first extracts local spectro-temporal features with CNN layers and then passes the resulting representation to a multi-head self-attention Transformer encoder. This hybrid architecture was selected for investigation because the central diagnostic problem involves non-stationary ramp-speed signals, for which temporally separated features may remain diagnostically related [4]. The three architectures therefore form a deliberate progression from fixed handcrafted features to local learned features and finally to local-plus-long-range temporal modelling.

The experiment description only defines a train/validation/test split for grouped source files as 9/2/3, which is about 171/38/57 one-second windows, with a 50% overlap between the groups. The idea behind grouping by source recording/motor is to avoid highly correlated overlapping windows being split between the training and test sets. The test set should not be used for hyperparameter tuning, and only be used for final reporting. For complete reproducibility, the final manuscript must state the exact RF tree/depth settings and, for the CNN and CNN-Transformer, the optimizer, learning rate, batch size, epoch limit, early-stopping rule, convolutional filter/kernel configuration,

Transformer encoder depth, number of attention heads and dropout used in the reported runs.
Statistical Validation and Evaluation Protocol

Performance is evaluated on the held-out test subset using overall accuracy together with macro-averaged precision, recall and F1 score. Macro averaging gives each of the five fault classes equal weight and is therefore reported alongside accuracy to reduce the influence of differences in class frequency. Furthermore, per-class precision, recall and F1 are analyzed to pinpoint class-specific confusion. To assess robustness, 20 dB additive white Gaussian noise (AWGN) is added to the system and then the absolute change in accuracy in percentage points is reported, and to assess computational feasibility, the measured CPU inference time per one-second window is reported. As only 14 files and three test files are used in the present analysis, these metrics are used descriptively as hold-out estimates, and are not used for making inferences or claims of inferential significance. As such, this difference in accuracy (91.4% vs. 87.6%) between the CNN–Transformer and CNN is not interpreted as evidence for the superiority of the CNN–Transformer across the population, but rather as evidence for its performance on this split. A better statistical validation of the full dataset is obtained using repeated grouped cross-validation or leave-one-motor-out cross-validation, and reporting the uncertainty intervals (e.g., bootstrap 95% confidence interval for accuracy and macro F1).

Results

The performance of the three models in multi-class classification is given in table 1 for the five consistently-defined fault classes: stator winding fault (S_W), bearing fault (B_R), voltage unbalance (V_U), rotor unbalance (R_U), bent shaft (K_A). The higher accuracy and macro F1 scores for RF compared to CNN and CNN–Transformer suggest that learned spectro-temporal representations and attention are good for this hold-out split, but this is not enough to conclude statistical superiority.

Table 1 – Multi-Class Classification Performance

Model	Accuracy (%)	Macro Precision	Macro Recall	Macro F1
Random Forest	81.2	0.81	0.80	0.80
CNN (Spectrogram)	87.6	0.88	0.87	0.87
CNN–Transformer	91.4	0.92	0.91	0.91

The RF baseline is able to reach the accuracy of 81.2% and macro F1 = 0.80 which is a good score for the usefulness of the decision-tree methods in case of availability of structured handcrafted features [8]. CNN achieves 87.6% accuracy (macro F1 = 0.87) which is seen as a 6.4% improvement over RF. The CNN-Transformer has the accuracy of 91.4% (macro F1 = 0.91), which is 10.2 and 3.8 percentage points higher than RF and CNN, respectively. This is in line with the hypothesis of self-attention being able to model long-range dependencies in non-stationary recordings of ramp speeds [4] but the amount of the benefit must be validated with repeated grouped validation for a larger sample.

The performance of the CNN-Transformer is presented in per-class performance in Table 2. The most frequent fault type with the highest F1 score (0.95) is stator winding (S_W) faults, which likely correspond to the thermal and acoustic information that comes from the heating and electromechanical changes when dealing with ITSC. Bearing (B_R) and voltage unbalance (V_U) faults each have F1 = 0.91; and bent shaft (K_A) and rotor unbalance (R_U) are the most challenging classes with F1 = 0.87 for each. Their lower separabilities are consistent with the presence of overlapping low-frequency vibration near 1× and 2× rotational frequency, and the coupling between the electric and vibrating parts of the mechanism, which might have an impact on V_U/R_U separability.

Table 2 – Per-Class F1 Scores (CNN–Transformer)

Fault Class	Precision	Recall	F1-Score
S_W (Stator Winding)	0.96	0.94	0.95
B_R (Bearing)	0.93	0.90	0.91
V_U (Voltage Unbalance)	0.92	0.90	0.91
R_U (Rotor Unbalance)	0.89	0.86	0.87
K_A (Bent Shaft)	0.88	0.87	0.87

Table 3 evaluates robustness at 20 dB additive white Gaussian noise (AWGN). RF accuracy decreases by 6.8 percentage points and CNN accuracy by 3.4 percentage points, whereas CNN–Transformer accuracy decreases by 1.9 percentage points (91.4% to 89.5%). The smaller observed degradation suggests greater robustness of the hybrid representation on this perturbation test. It should not, however, be attributed solely to the attention mechanism without ablation testing, and AWGN is only a simplified approximation of the coloured, non-stationary and source-specific noise encountered in operating plants.

Table 3 – Noise Robustness (20 dB AWGN)

Model	Baseline Acc. (%)	Noisy Acc. (%)	Drop (pp)
Random Forest	81.2	74.4	−6.8
CNN	87.6	84.2	−3.4
CNN–Transformer	91.4	89.5	−1.9

Table 4 reports measured CPU inference latency. RF (1.3 ms), CNN (4.9 ms) and CNN–Transformer (8.7 ms) all remain below the study target of 10 ms per one-second window. These measurements demonstrate real-time feasibility on the tested CPU configuration, but they do not guarantee identical latency on a specific PLC, industrial PC or edge processor. Deployment studies should therefore repeat latency, memory-use and throughput measurements on the target hardware while the full sensor-acquisition and preprocessing pipeline is running.

Table 4 – Inference Latency (CPU)

Model	Inference Time (ms/window)	Real-Time Compatible
Random Forest	1.3	Yes
CNN	4.9	Yes
CNN–Transformer	8.7	Yes

Overall, the obtained results demonstrate that the proposed multi-sensor fault diagnosis framework provides a consistent improvement in classification performance, robustness, and real-time applicability. Across all evaluated metrics, the CNN**-**Transformer model shows the best balance between accuracy, generalization capability, and noise resistance, confirming the effectiveness of combining convolutional feature extraction with attention-based temporal modeling.

The comparative analysis indicates that classical machine learning approaches, such as Random Forest, remain effective for structured feature sets but are limited under non-stationary conditions. In contrast, deep learning models, particularly those incorporating attention mechanisms, are better suited for capturing complex temporal dependencies in variable-speed regimes.

Furthermore, the stability of the CNN**-**Transformer under noisy conditions and its low inference latency highlight its suitability for deployment in industrial environments, where both accuracy and computational efficiency are critical. These results collectively confirm that multi-sensor data fusion combined with advanced deep learning architectures significantly enhances fault detection performance in modern predictive maintenance systems.

Discussion

The results indicate that synchronized vibration, acoustic and temperature information can support multi-class induction-motor fault diagnosis under both fixed- and variable-speed conditions. The main empirical finding is the observed advantage of the CNN–Transformer on the reported hold-out split, together with comparatively small degradation under the 20 dB noise test and sub-10 ms inference. The interpretation below therefore focuses on what these results support, while distinguishing those findings from claims that require broader statistical or industrial validation.

Comparison to Previous Work

The CNN–Transformer is able to reach an accuracy of 91.4% for the five fault classes in a multi-motor, multi-speed benchmark. Other research has been reported with accuracies better than 99% [5, 9] but such results are not directly comparable in terms of operating regime, data sets and validation methodology. The RF result (81.2%) is similar to the results of structured features [8] that demonstrate good performance with tree based methods. The current multi-sensor result also matched with the result provided by Xu et al. [16] that revealed high performance of multimodal

Transformer-based fusion. The current contribution is to analyse a correlated fusion principle in a benchmark with ramp-speed non-stationarity; however, the number of files (14) is too small to include generalisation across the whole UOEMD-VAFCVS benchmark or to industrial motor fleets.

Practical Implications

The measured inference times indicate that the proposed pipeline has a realistic path to online condition monitoring, but practical implementation requires more than classifier execution alone. A deployable architecture would acquire casing vibration from the three accelerometers together with acoustic and temperature channels, perform basic signal conditioning and buffering at PLC or edge level, generate the same normalised windows and time-frequency features used during training, and pass them to the selected classifier on an industrial PC or edge processor. The model output should then be integrated with a SCADA or computerised maintenance management system (CMMS) using a confidence threshold and alarm logic rather than triggering maintenance from a single isolated prediction. The sensor calibration, baseline (health) measurement of the sensors, channel synchronisation and verification, latency and memory tests for the target hardware, and agreement on the alarm confirmation procedure should be included in site commissioning [2].

The degradation from 1.9% for CNN in 20 dB AWGN is promising for noisy environments, and the F1 result of 0.95 for S_W class suggests that the vibration–acoustic–temperature configuration is useful to discriminate the stator-winding even without using a direct current channel in this dataset. This is to be taken as a hypothesis for deployment, not as proof that current sensing isn't always needed. In addition to classification accuracy, false-alarm rate, missed-detection rate, sensor failure behaviour, computational load and maintenance lead time should be also monitored in an industrial pilot. When the inverter setting, loads, mounting conditions or motors change, then periodic model review or retraining would be necessary as well.

Limitations and Future Work

The main drawback is that merely 14 files of the 128 recording configurations are used from the benchmark. Three of the files in the reported test subset are used to make performance estimates, which may lack statistical precision, and do not characterise the full range of motor, speed, load and fault severities in UOEMD-VAFCVS. The present results therefore do not justify the use of inference for the superiority of the models, and the still existing confusion between rotor unbalance (R_U) and bent shaft (K_A) that both have strong 1×/2× rotational components demonstrates that the current feature space is not sufficiently discriminating for mechanically similar faults. Evaluation should be done using group-aware repeated cross-validation or leave-one-motor-out testing, with confidence intervals and confusion matrix for each fold, and compare if the improvements are similar in the fixed-speed and individual ramp-speed regimes.

Second, the external validity of the study. Controlled benchmarking with induced faults (UOEMD-VAFCVS) compares results, while operating power plants cause domain shifts due to different load conditions, inverter harmonics, difference in foundation, sensor mounting, structural resonances, ambient acoustic sources, temperature drift, sensor ageing and maintenance interventions. The 20 dB AWGN experiment is a convenient stress test on a controlled basis but it does not capture this entire noise structure. Factors may also be simultaneous, changing, or new faults in real systems that aren't part of any of the five classes that were predefined. Future validation should be conducted during extended durations of operation on multiple industrial motors with synchronized multi-sensor data, should include machine identity in the design of the validation, involve comparison of predictions with maintenance inspections, and measures false alarms and missed detections under real-life disturbances.

Finally, future research is needed to explore the cross-axis vibration coherence, acoustic information of higher frequency and optionally a pathway of stator current to minimize R_U/K_A and V_U/R_U ambiguity. Additionally, to discrete fault classification, degradation modelling and remaining-useful-life estimation would add value to maintenance, as they would help in making decisions about maintenance timing. A sequence of the activities (full-dataset validation, hardware-in-the-loop edge testing, and a monitored industrial pilot) would create a defensible path from the current proof of concept to deployment.

Conclusion

A synchronized multi-sensor framework for the induction motor diagnosis by vibration, acoustic and temperature measurements technique from UOEMD-VAFCVS is developed and evaluated. Within the 14-file subset of the dataset for which data was reported, the CNN–Transformer obtained

the best result when it came to classification (91.4% accuracy; macro F1 = 0.91) compared with CNN (+3.8 percentage points) and RF (+10.2 percentage points). It also demonstrated the lowest drop in accuracy with 20 dB AWGN test (1.9 percentage points) and the CPU inference time of 8.7ms per 1s window. By its scientific significance, these results confirm that the benefits of using convolutional filters to extract local spectro-temporal patterns and attention-based modelling for longer-range dependencies are still present for the non-stationary variable-speed diagnosis of these variables, and that, per-class, the separation of R_U and K_A is still a challenge.

The practical value is that the proposed sensing and inference chain is computationally compatible with a real time edge-monitoring concept, and can be combined with the PLC/SCADA/CMMS workflows in a post-site specific validation process. However, the ability to generalise is limited by the special subclass, control for induced faults and the lack of repeated group-aware validation. The next research stage involves the evaluation of all 128 UOEMD-VAFCVS configurations with uncertainties, leave-one-motor-out or leave-one-grouped-out validation, validation using coloured noise as well as noise obtained from operating motors and the extension of the method to multiple fault recognition and remaining useful life prediction in real industrial motors. These steps are required in order to achieve statistical reliability and operational benefit prior to scale up trials on plant.

References

1. Advancements in induction motor diagnosis and condition monitoring: A comprehensive review / S. Kirschner et al // Sensors. – 2025. – Vol. 25, № 19. – Art. 5942. https://doi.org/10.3390/s25195942.
2. Integrating AI and IoT for predictive maintenance in Industry 4.0 manufacturing environments: A practical approach / R. Rakholia et al // Information. – 2025. – Vol. 16, № 9. – Art. 737. https://doi.org/10.3390/info16090737.
3. Bo L. Enhanced CNN for induction motor fault diagnosis via multi-source data fusion / L. Bo, M. Li, H. Tan // PLoS ONE. – 2025. – Vol. 20, № 8. – Art. e0330761. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0330761.
4. One-dimensional time-frequency dual channel visual transformer for fault diagnosis under strong noise and limited data conditions / S. Cai et al // Scientific Reports. – 2025. – Vol. 15, № 1. – Art. 26361. https://doi.org/10.1038/s41598-025-12533-2.
5. Ren S. Rolling bearing fault diagnosis method based on SWT and improved vision transformer / S. Ren, X. Lou // Sensors. – 2025. – Vol. 25, № 7. – Art. 2090. https://doi.org/10.3390/s25072090.
6. Allal A. Diagnosis of induction motor faults using the motor current normalized residual harmonic analysis method / A. Allal, A. Khechekhouche // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. – 2022. – Vol. 141. – Art. 108219. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108219.
7. An autoregressive-based motor current signature analysis approach for fault diagnosis of electric motor-driven mechanisms / R. Diversi et al // Sensors. – 2025. – Vol. 25, № 4. – Art. 1130. https://doi.org/10.3390/s25041130.
8. Chisedzi L.P. Broken rotor bar detection in cage induction motors using machine learning methods / L.P. Chisedzi, M. Muteba // Sensors. – 2023. – Vol. 23, № 22. – Art. 9079. https://doi.org/10.3390/s23229079.
9. Elhaija W.A. A novel dataset and lightweight detection system for broken bars in induction motors using optimizable neural networks / W.A. Elhaija, Q.A. Al-Haija // Intelligent Systems with Applications. – 2023. – Vol. 17. – Art. 200167. https://doi.org/10.1016/j.iswa.2022.200167.
10. Antonello R. Machine learning-based detection of broken bars in dual three-phase induction motors: methodology and experimental validation / R. Antonello, M. Pastura, M. Zigliotto // IET Electric Power Applications. – 2025. – Vol. 19, № 1. – Art. e70069. https://doi.org/10.1049/elp2.70069.
11. Chen L. et al. Inter-turn short circuit fault detection in induction motor stator windings using start-up current envelope energy / L. Chen et al. // Sensors. – 2023. – Vol. 23, № 20. – Art. 8581. https://doi.org/10.3390/s23208581
12. AI-driven fault diagnosis approach for stator turn-to-turn faults in induction motors / T.A. Kawady et al. // Scientific Reports. – 2025. – Vol. 15, № 1. – Art. 20125. https://doi.org/10.1038/s41598-025-04462-x.

13. Comprehensive fault diagnosis of three-phase induction motors using synchronized multi-sensor data collection / K. Thomas et al // Scientific Data. – 2025. – Vol. 12, № 1. – Art. 1468. https://doi.org/10.1038/s41597-025-05437-3.
14. Toma R.N. Bearing fault diagnosis of induction motors using a genetic algorithm and machine learning classifiers / R.N. Toma, A.E. Prosvirin, J.M. Kim // Sensors. – 2020. – Vol. 20, № 7. – Art. 1884. https://doi.org/10.3390/s20071884.
15. Lee J.H. Fault diagnosis of induction motor using convolutional neural network / J.H. Lee, J.H. Pack, I.S. Lee // Applied Sciences. – 2019. – Vol. 9, № 15. – Art. 2950. https://doi.org/10.3390/app9152950.
16. Fault diagnosis of electric motors based on multi-modal network of time series and ensemble transformers / B. Xu et al // Scientific Reports. – 2025. – Vol. 15. – Art. 7834. https://doi.org/10.1038/s41598-025-89695-6.
17. Chen X. Cross-domain fault diagnosis of induction motor based on GAN and fine-tuning with limited labeled data / X. Chen, Z. Chen // Measurement. – 2025. – Vol. 249. – Art. 116988. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.116988.
18. Rapid diagnosis of induction motor electrical faults using convolutional autoencoder feature extraction / A.B. Husebo et al // PHM Society European Conference. – 2020. – Vol. 5, № 1. – P. 27-31. https://doi.org/10.36001/phme.2020.v5i1.1247.
19. Unsupervised electric motor fault detection by using deep autoencoders / E. Principi et al // IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica. – 2019. – Vol. 6, № 2. – P. 441-451. https://doi.org/10.1109/JAS.2019.1911393.
20. Stator fault diagnosis of induction motor based on discrete wavelet analysis and neural network technique / A. Almounajjed et al // Chinese Journal of Electrical Engineering. – 2023. – Vol. 9, № 1. – P. 142-157. https://doi.org/10.23919/CJEE.2023.000003.

О.Н. Сәду*, Г.Д. Бәзіл[1], А. Акмар[2]
[1]Алматы энергетика және байланыс университеті,
050013, Алматы, Қазақстан Республикасы, Байтұрсынұлы көшесі,126/1
[2]Петронас Технологиялық Университеті, 32610 Сери Искандар, Перак, Малайзия
*e-mail: o.sadu@aues.kz

ЭЛЕКТР СТАНЦИЯЛАРЫНДАҒЫ ТӨМЕН КЕРНЕУЛІ ЭЛЕКТР ҚОЗҒАЛТҚЫШТАРЫНЫҢ ІСТЕН ШЫҒУЫН БОЛЖАЙТЫН АВТОМАТТАНДЫРЫЛҒАН ЖҮЙЕ

Индукциялық қозғалтқыштар өнеркәсіпте сорғыларды, желдеткіштерді және компрессорларды басқару үшін кеңінен қолданылады. Бұл қозғалтқыштарда ротор шыбықтарының жарықтары мен статордың қысқа тұйықталуын қоса алғанда, электр ақаулары, сондай-ақ ротордың эксцентриситеті, тураланбау және мойынтіректердің тозуы сияқты механикалық ақаулар кездеседі. Бұл механикалық және электрлік ақаулар шамадан тыс діріл мен температураға байланысты жабдықтың мерзімінен бұрын өшірілуіне әкеледі. Ақаулықтар мен істен шығуларды ерте анықтау болжамды техникалық қызмет көрсетудің негізгі мақсаты болып табылады. Бұл мақалада Онтарио университетінің электр қозғалтқыштарының деректер жиынтығы (UOEMD-VAFCVS) үшін автоматтандырылған ақауларды анықтау жүйесі ұсынылады, ол сегіз қозғалтқыш үшін тұрақты және ортогоналды жылдамдықта жиналған синхрондалған діріл, акустикалық және температуралық деректерді қамтиды, олардың үшеуі деректер жиынтығында бар. Диагностикалық мүмкіндіктерді алу үшін FFT/Welch PSD, STFT, дискретті толқындық түрлендірулер және Гильберт элементтері бойынша қабықша талдауы сияқты бірнеше сигналды талдау әдістері қолданылады. Барлық осы әдістер иерархиялық машиналық оқыту моделіне біріктірілген, оған кездейсоқ ормандар (RF), конволюциялық нейрондық желілер (CNN) және гибридті CNN-трансформатор моделі кіреді. CNN-Transformer моделі дәлірек, 91,4 пайызға жетеді және ең жоғары макро F1 көрсеткішіне ие. Барлық модельдер CPU-да әрбір терезе үшін 10 мс-тан аз уақытта нақты уақыт режимінде қорытынды жасау талабына сай келеді, бұл жеке CNN (87,6 пайыз) және RF (81,2 пайыз) модельдерінен асып түседі. Бұл зерттеулер көп сенсорлы біріктіру мен назар аударуға негізделген уақытша модельдеудің Industry 4.0 болжамды техникалық қызмет көрсету үшін пайдалылығын растайды.

Түйін сөздер: *Индукциялық қозғалтқыштың ақауларын диагностикалау; болжамды техникалық қызмет көрсету; көп сенсорлы біріктіру; сигналды өңдеу; машиналық оқыту; CNN-трансформатор; айнымалы жылдамдықты жұмыс; мойынтіректерді диагностикалау.*

О.Н. Сәду*, Г.Д. Бәзіл[1], А. Акмар[2]
[1]Алматинский университет энергетики и связи,
050013, Алматы, Республика Казахстан, ул. Байтурсынулы,126/1
[2]Технологический Университет Петронас, 32610 Сери Искандар, Перак, Малайзия
*e-mail: o.sadu@aues.kz

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОТКАЗОВ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ НА ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ

Асинхронные двигатели широко используются в промышленности для привода насосов, вентиляторов и компрессоров. Эти двигатели подвержены электрическим неисправностям, включая трещины в валу ротора и короткие замыкания статора, а также механическим неисправностям, таким как эксцентриситет ротора, несоосность и износ подшипников. Эти механические и электрические неисправности приводят к преждевременному отключению оборудования из-за чрезмерной вибрации и температуры. Раннее обнаружение неисправностей и отказов является ключевой задачей превентивного технического обслуживания. В данной статье представлена автоматизированная система обнаружения неисправностей для набора данных электродвигателей Университета Онтарио (UOEMD-VAFCVS), который включает синхронизированные данные о вибрации, акустике и температуре, собранные при постоянных и ортогональных скоростях для восьми двигателей, три из которых присутствуют в наборе данных. Для получения диагностических возможностей используются несколько методов анализа сигналов, таких как БПФ/спектроскопия спектральной плотности мощности Уэлча, кратковременное преобразование Фурье, дискретные вейвлет-преобразования и анализ огибающей по элементам Гильберта. Все эти методы объединены в иерархическую модель машинного обучения, которая включает случайные леса (RF), сверточные нейронные сети (CNN) и гибридную модель CNN-Transformer. Модель CNN-Transformer более точна, достигая 91,4%, и имеет самый высокий показатель макро-F1. Все модели соответствуют требованию вывода в реальном времени менее чем за 10 мс на окно на ЦП, что превосходит отдельные модели CNN (87,6%) и RF (81,2%). Эти исследования подтверждают полезность многосенсорного слияния и временного моделирования на основе механизма внимания для прогнозирующего технического обслуживания в рамках концепции Industry 4.0.

Ключевые слова: *диагностика неисправностей асинхронного двигателя; прогнозирующее техническое обслуживание; объединение данных с нескольких датчиков; обработка сигналов; машинное обучение; CNN-Transformer; работа с переменной скоростью; диагностика подшипников.*

Information about the authors

Orazbek Nurzhanuly Sadu* – 2nd year doctoral student, Almaty University Power Engineering and Telecommunications, Republic of Kazakhstan; e-mail: o.sadu@aues.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-1644-7294.

Gulmira Duysenbekkyzy Bazil – PhD, professor, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications, Republic of Kazakhstan; e-mail: g.bazil@aues.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9563-0352.

Ainul Akmar – PhD, Professor, Universiti Teknologi PETRONAS, Malaysia; e-mail: ainulakmar_mokhtar@utp.edu.my. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3522-1113.

Авторлар туралы мәліметтер

Оразбек Нұржанұлы Сәду* – 2-курс докторанты, Алматы энергетика және байланыс университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: o.sadu@aues.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-1644-7294.

Гүлмира Дүйсенбекқызы Бәзіл – PhD, профессор, Алматы энергетика және байланыс университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: g.bazil@aues.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9563-0352.

Айнул Акмар – PhD, профессор, Петронас Технологиялық Университеті, Малайзия; e-mail: ainulakmar_mokhtar@utp.edu.my. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3522-1113.

Сведения об авторах

Оразбек Нұржанұлы Сәду* – докторант 2-го курса, Алматинский университет энергетики и связи, Республика Казахстан; e-mail: o.sadu@aues.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-1644-7294.

Гүлмира Дүйсенбекқызы Бәзіл – PhD, профессор, Алматинский университет энергетики и связи, Республика Казахстан; e-mail: g.bazil@aues.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9563-0352.

Айнул Акмар – PhD, профессор, Технологический Университет Петронас, Малайзия; e-mail: ainulakmar_mokhtar@utp.edu.my. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3522-1113.

Received 02.06.2026
Revised 08.09.2026
Accepted 09.09.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-36

МРНТИ 55.21.99

К.К. Комбаев, Ж.М. Мұхаметбек, Б.Н. Азаматов, Д.И. Қалиев, Р. Ғабдысалық*
Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті
070000, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ., Д.Серікбаев көшесі, 19
*e-mail: rgabdysalyk@edu.ektu.kz

TI-6AL-4V ҚОРЫТПАСЫНАН ЖАСАЛҒАН КОРТИКАЛДЫ СҮЙЕК БҰРАНДАЛАРЫН СББ БІЛДЕКТЕРІНДЕ ӨНДІРУ КЕЗІНДЕ КЕСКІШ ҚҰРАЛ ТОЗУЫН БЕЙІМДЕЛМЕЛІ ӨТЕМДЕУ

Аңдатпа: *Мақалада сандық бағдарламалық басқаруы бар білдектерде Ti-6Al-4V титан қорытпасынан дайындалатын кортикальды сүйек бұрандаларының геометриялық параметрлерінің дәлдігін қамтамасыз ету мәселесі қарастырылған. Зерттеудің өзектілігі медициналық имплантаттардың сапасына қойылатын жоғары талаптармен және кескіш құралдың жинақталған тозуы жағдайында бұранда қалыптастыру процесінің тұрақтылығын сақтау қажеттілігімен негізделген. Жұмыстың мақсаты – СББ жүйесінің құралдары арқылы бұрандакескіш бастиектің тозуын бейімделмелі өтемдеу әдісін әзірлеу және оны эксперименттік тұрғыдан растау. Зерттеулер Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университетінің «Smart Engineering» құзыреттілік орталығының базасында орындалды. Тәжірибелік үлгілер MANURHIN K'MX 726 EVO бойлық жону автоматында дайындалды, ал бұранда геометриялық параметрлерін бақылау Mahr MarSurf CD 140 контурографы арқылы жүргізілді. Эксперименттік бағдарлама құралдың пайдаланылу кезеңдерін қамтитын тоғыз өңдеу режимін, сондай-ақ ең жоғары 57 м жинақталған өңдеу ұзындығын қамтыды. Зерттеу нәтижелері құралдың жинақталған жұмыс ұзындығы артқан сайын бұранда қадамының, профиль тереңдігінің және бүйір беттер бұрыштарының жүйелі өзгерістері байқалатынын көрсетті. Жинақталған өңдеу ұзындығына байланысты құралдың түзету ығысу шамасын анықтайтын эмпирикалық модель әзірленді. Ең жоғары зерттелген өңдеу ұзындығы үшін ΔZ = 0,0509 мм мәні алынды, бұл басқару бағдарламасында енгізілген 0,050 мм өтемдеумен іс жүзінде сәйкес келді. Есептік түзетуді енгізгеннен кейін бұранда қадамының ауытқуы номиналды 1,25 мм мәнінен 1,28 % құрап, құралды ауыстырмай-ақ бұранда профилінің тұрақты геометриясын сақтауға мүмкіндік берді. Жұмыстың практикалық маңыздылығы медициналық имплантаттарды дайындау дәлдігін арттырумен, бұрандакескіш бастиектің тиімді пайдалану мерзімін ұлғайтумен және өндірістік шығындарды төмендетумен сипатталады. Болашақ зерттеулер кескіш құралдың тозуын автоматты бақылау жүйелерін әзірлеуге және бейімделмелі өтемдеу алгоритмдерін интеллектуалды цифрлық өндірістік жүйелерге енгізуге бағытталған.*

Түйін сөздер: *кортикальды сүйек бұрандасы, Ti-6Al-4V, кескіш құралдың тозуы, бейімделмелі өтемдеу, эмпирикалық модель, СББ білдектері, бұранда профилін қалыптастыру, медициналық имплантаттар.*

Кіріспе

Отандық медициналық бұйымдар өндірісін дамыту Қазақстан Республикасының денсаулық сақтау жүйесін жаңғыртудың басым бағыттарының бірі болып табылады.

Саланың дамуындағы стратегиялық бағыттарына сәйкес медициналық құралдар мен бұйымдарды жобалау және өндіру үшін заманауи технологияларды енгізу арқылы денсаулық сақтау қызметтерінің қолжетімділігі мен сапасын арттыруға ерекше назар аударылуда.

Кортикалды сүйек бұрандалары травматология мен ортопедияда ең кеңінен таралған өнімдерігің бірі болып табылады, олар сынықтарды емдеу кезінде, реконструктивтік хирургияда және басқа да остеосинтез әдістерінде сүйек сынықтарын бекітуге арналған.

©К.К. Комбаев, Ж.М. Мұхаметбек, Б.Н. Азаматов, Д.И. Қалиев, Р. Ғабдысалық, 2026

Ортопедиялық имплантаттарды жасау кезінде жоғары механикалық беріктігі, биоүлесімділігі бар, тат баспайтын және сенімді остеоинтеграцияны қамтамасыз ететін кең таралған титан және оның қорытпалары қолданылады.

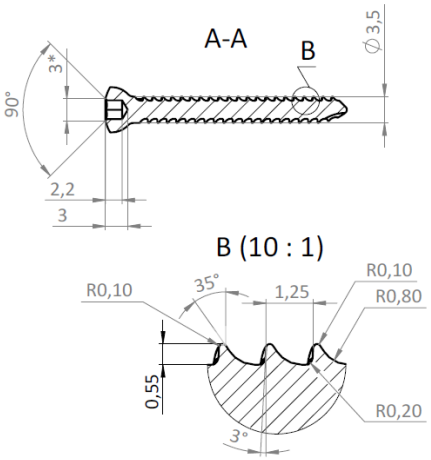
Титан қорытпалары сүйекті бекіту және алмастыру жүйелерінде кеңінен қолданылады, себебі олар ағзада әсер ететін елеулі механикалық жүктемелерге төтеп бере алады және сүйек тінімен қолайлы өзара әрекеттесуді қамтамасыз етеді (Al-Shalawi et al., 2023; Yang et al., 2022). Қазіргі уақытта медициналық имплантаттар мен мамандандырылған құралдардың басым бөлігі шетелден әкелінеді, бұл халықаралық сапа, беріктік, биоүйлесімділік және функционалдық талаптарға сәйкес келетін отандық медициналық бұйымдарды әзірлеу қажеттілігін көрсетеді.

Аталған мәселені шешу шетелдік жеткізушілерге тәуелділікті төмендетуге, өндірістегі жергілікті қамту деңгейін арттырып, ішкі және халықаралық нарықтарға бағытталған бәсекеге қабілетті өнімдерді өндірудің іргетасын қалайды. Медициналық имплантаттарды өндіру үшін ең перспективті материалдардың бірі Ti-6Al-4V титан қорытпасы болып табылады. Аталған материал жоғары үлесімді беріктікке, тат басуға төзімділікке, биоүйлесімділікке және ұзақтылыққа ие (Geetha et al., 2009; Yang et al., 2022). Пайдалану сипаттамаларының үйлесімінің арқасында аталған материал травматология және ортопедияда сүйек бұрандаларын, пластиналарды және басқа да өнімдерді өңдеуге кеңінен қолданылады (Kengesbekov et al., 2025; Yang et al., 2022). Сонымен қатар Ti-6Al-4V қорытпасы өңделуі қиын материалдар тобына кіреді, себебі бұл материал төменгі жылуөткізгіш, жоғарғы беріктікке және кесу аймағында жылудың шоғырлануына ие. Аталған қасиеттер кескіш материалдың жылдам тозуына және өңдеу дәлдігінің төмендеуіне әкеледі (Bamford, 2016).

Титан қорытпаларын өңдеу сұрақтарына көптеген зерттеулер арналған. Ғылыми әдебиеттерде кескіш құралдардың беріктігін арттыру, кесу параметрлерін оңтайландыру, өңделетін аймақтағы жылу жүктемесін азайту және титан қорытпаларынан жасалған өнімдердің сапасын жақсарту үшін заманауи технологиялық шешімдерді қолдану мәселелері қарастырылады (Doudkin et al., 2020). Механикалық өңдеу технологияларын жақсарту мен қарат титан қорытпаларынан жасалған медициналық құрылғылардың өнімділік сипаттамаларын жақсарту мақсатында, соның ішінде имплантардың биологиялық үйлесімділігі мен беріктігін арттыруға арналған функционалдық жабындар мен беткі модификациялау әдістерін әзірлеу бойынша зерттеулер белсенді түрде жүргізілуде (Kombayev et al., 2025). Соңғы жылдары заманауи өндіріс және сапаны бақылау технологияларын интеграциялауға ерекше назар аударуда, бұл медициналық құрылғыларды өндіруде жоғары дәлдік деңгейін қамтамасыз етеді. Бірақ, бұранданың күрделі пішіні бар медициналық бұйымдардың геометриялық параметрлерін тұрақтандыру мәселелері және кесу құралдардың тозуы бұранданы салу дәлдігіне әліде қажетті зерттелмеген. Осы зерттеу аясында хирургиялық сүйек бұрандаларына қойылатын халықаралық талаптарды талдау және қазіргі остеосинтез жүйелерінде қолданылатын конструкциялық шешімдер негізінде диаметрі 3,5 мм кортикалды сүйек бұрандасының жобасы әзірленді (International Organization for Standardization, 1991; DePuy Synthes, 2021).

1 суретте әзірленген бұйымның геометриялық параметрлері көрсетілген. Бұл бұранданың конструкциясы 1,25 мм қадамды, 35° профиль бұрышы және 0,55 мм орама биіктігі бар арнайы сүйек орама профилін қамтиды, бұл картикалды сүйекте сенімді бекітуді қамтамасыз етіп, осы кластың құрылғыларына қойылатын қазіргі талаптарға сәйкес келеді.

Бұйымды әзірлеген кезде 29 мм ұзындықта қажетті механикалық беріктік талаптары, бекіту тұрақтылығы және титан қорытпаларынан жасалған медициналық имплантарды өңдеускезінде қойылатын талаптар ескерілді (Geetha et al., 2009; Yang et al., 2022).



Сурет 1 – Ti-6Al-4V қорытпасынан жасалған кортикалды сүйек бұрандасының құрылымы және бұранда профилінің геометриялық параметрлері
(Ескерту: авторлармен құрастырылды)

Кортикалды сүйекке арналған бұранданың геометриялық дәлдігіне қойылатын қатаң талаптар өндірістің барлық кезеңдерінде процестің тұрақтылығын қамтамасыз етуді қажет етеді. Соңғы зерттеулер көрсеткендей, геометриялық ауытқуды болжауға және өңдеу қателіктерін бейімді түрде түзетуге арналған интеллектуалды әдістерді қолдану СББ білдектерінда бөлшектерді өңдеудің дәлдігін айтарлықтай жақсартып, дайын өнімнің сапасына құрал тозуының әсерін азайтуға мүмкіндік береді (Kumar & Vasu, 2025; Sun et al., 2025).

Осы тұрғыда, басты міндет – сандық басқару жүйесінің мүмкіндіктерін пайдалана отырып, құралдың тозуын тікелей өтеу әдістерін әзірлеу.

Зерттеудің мақсаты – Ti-6Al-4V қорытпасынан жасалған кортикалды сүйек бұрандаларын СББ білдектерінде өндіру кезінде кескіш құрал тозуын бейімделмелі өтемдеу әдісін әзірлеу.

Қойылған мақсаттарға жету үшін келесі тапсырмалар жасалған: медициналық имплanttарға қойылатын халықаралық талаптарға сәйкес кортикалды сүйек бұрандасын жобалау; кесу құралының тозуы бұранданың геометриялық параметрлеріне әсерін зерттеу; құралдың тозу деңгейін ескере отырып басқару бағдарламасын реттеу алгоритмін әзірлеу; ұсынылған әдістің эксперименттік тексерілуі және оның дайын өнімнің өңдеу дәлдігіне әсерін бағалау.

Материалдары мен зерттеу әдістері

Зерттеулер Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университетінің «Smart Engineering» құзыреттілік орталығының базасында орындалды (Өскемен, Қазақстан).

Зерттеу объектісі ретінде Ti-6Al-4V ELI (Grade 23) қорытпасынан дайындалған, диаметрі 3,5 мм кортикалды сүйек бұрандасы таңдалды. Бұранданың конструкциясы остеосинтезге арналған медициналық имплантаттарға қойылатын талаптар негізінде әзірленді. 1-кестеде зерттелген дайындаманың нақты химиялық талдауы емес, Ti-6Al-4V ELI қорытпасына ASTM F136-26 стандартымен белгіленген химиялық құрамның рұқсат етілген шектері берілген.

Кесте 1 – ASTM F136-26 стандарты бойынша Ti-6Al-4V ELI (Grade 23) қорытпасының химиялық құрамына қойылатын талаптар

Элемент	Al	V	Fe	O	C	N	H	Ti
Рұқсат етілген мөлшері, масс. %	5,50-6,50	3,50-4,50	≤0,25	≤0,13	≤0,08	≤0,05	≤0,012	қалғаны

Ескерту: ASTM F136-26 «Standard Specification for Wrought Titanium-6Aluminum-4Vanadium ELI (Extra Low Interstitial) Alloy for Surgical Implant Applications (UNS R56401)» стандарты негізінде авторлар құрастырған.

Дайындамалар Fanuc (Fanuc Corporation, Japan) сандық басқару бағдарламасымен қамтамасыз етілген MANURHIN K'MX 726 EVO (Manurhin K'MX, France) бойлық жону автоматында жасалған (2 сурет).



Сурет 2 – MANURHIN K'MX 726 EVO бойлық жону автоматы
(Ескертулер – авторлармен құрастырылған)

Негізгі техникалық сипаттамалары: өңделетін шыбықтың ең үлкен диаметрі – 26 мм, шпиндельдің ең жоғары айналу жиілігі – 8000 айн/мин, алдыңғы суппорттың жүрісі – 380 мм, электршпиндельдің қуаты – 7,5/10,5 кВт.

Бұранданың сыртқы профилі Landis SX-6T (Landis Tool Company, АҚШ) бұрандакескіш бастиегіне орнатылған алты ауыспалы профильді кескіш пластинамен қалыптастырылды (3-сурет). Осы құралдың ерекшелігі – бұранда профилі бірнеше кескіш элементтің синхрондалған жұмысы арқылы қалыптасады, бұл жоғары өңдеу өнімділігін қамтамасыз етеді, бірақ сонымен бірге үдерісті кескіш жиектердің жинақталатын тозуына сезімтал етеді. Сондықтан, кесу жиектерінің геометриясындағы кез келген өзгеріс қалыптасатын бұранда параметрлеріне тікелей әсер етіп, СББ жүйесі арқылы қателерді түзету әдістерін қолдануды талап етеді.



Сурет 3 – Landis SX-6T бұрандакескіш бастиегі және оған орнатылған алты ауыспалы профильді кескіш пластина
(Ескертулер – авторлармен құрастырылған)

Механикалық өңдеуден кейін бөлшектердің бетіне Senfeng SF200F (Jinan Senfeng Technology Co., Ltd., Қытай) талшықты лазерлік таңбалау жүйесімен белгі салынды. Белгілеу 1064 нм толқын ұзындығындағы лазер сәулесімен жүргізілді. Жабдықтың орналастыру дәлдігі ±0,001 мм, ал ең аз белгілеу сызығының ені – 0,01 мм болды. Өңделген бұрандалардың геометриялық параметрлері MarSurf CD 140 (Mahr GmbH, Göttingen, Германия) контурографының көмегімен өлшенді. Өлшеу бұранданың бойлық профилі бойынша жүргізіліп, контурограммада белгіленген профиль элементтері бойынша бұранда қадамы, профиль тереңдігі және сол және оң жақ бүйір беттердің бұрыштары анықталды. Әр үлгі үшін бір контурограмма алынды. Аспаптың паспорттық ажыратымдылығы 6 нм, өлшеу жылдамдығы 0,02-10 мм/с, ал өлшеу диапазоны қолданылған зонд конфигурациясына байланысты 140 мм-ге дейін құрайды. Өлшеу белгісіздігіне жеке есептеу жүргізілген жоқ.

Бұрандакескіш бастиек жұмысының бұранда геометриялық параметрлеріне әсерін бағалау мақсатында тоғыз өңдеу режимінен тұратын эксперименттік бағдарлама әзірленді. Әр режимде бір бұранда дайындалып, оның профилі MarSurf CD 140 контурографында бір рет өлшенді. Барлық режимдерде бір бұрандакескіш бастиек пен бір кескіш пластиналар жиынтығы қолданылды. Эксперименттік жоспар мен зерттелген режимдердің негізгі параметрлері 2-кестеде көрсетілген.

Барлық эксперименттерде бір кесу параметрлері қолданылды: кесу жылдамдығы Vc = 80 м/мин, берілу жылдамдығы f = 0,05 мм/айн және кесу тереңдігі ap = 0,15 мм. ΔZ шамасы кескіш жиектің тікелей өлшенген физикалық тозуын емес, құралдың жинақталған жұмыс

ұзындығына байланысты бұранда профилінің геометриялық ауытқуын өтеу үшін қажетті технологиялық ығысуды сипаттайды.

Кесте 2 – Кортикалды бұрандаларды өңдеу кезіндегі эксперименттік зерттеулердің режимдері

Режим	Бағдарлама	Vc, м/мин	f, мм/айн	ap, мм	Бағдарлама бойынша өңдеу ұзындығы, м	ΔZ, мм	Өтем (Компенсация)
№ 1	PROT12	80	0,05	0,15	12,0	0,000	Жоқ
№ 2	PROT22	80	0,05	0,15	22,0	0,000	Жоқ
№ 3	PROT32	80	0,05	0,15	32,5	0,000	Жоқ
№ 4	PROT22	80	0,05	0,15	22,0	0,010-0,020	Жоқ
№ 5	PROT32	80	0,05	0,15	32,5	0,020-0,035	Жоқ
№ 6	PROT49.3	80	0,05	0,15	49,3	0,035-0,050	Жоқ
№ 7	PROT49.3	80	0,05	0,15	49,3	0,050-0,070	Жоқ
№ 8	PROT57	80	0,05	0,15	57,0	0,070-0,090	Жоқ
№ 9	PROT57	80	0,05	0,15	57,0	0,050	G1 G91 Z−0.05

Ескертулер: авторлармен құрастырылған. ΔZ бұранда кесу басындағы кескіш тістердің жинақталған тозуын туындайтын пішіндеу жолының эквивалентті ығысуын сипаттайды.

ΔZ диапазондары қайталама өлшеулердің статистикалық шашырауын емес, тиісті өңдеу режимдерінде қарастырылған технологиялық ығысу аралығын көрсетеді. №1-№3 режимдері бұранданың негізгі геометриялық параметрлерін анықтау үшін қолданылды. №4-№6 режимдері бұранда кескіш басының тозудың әртүрлі кезеңдеріне сәйкес келеді. №9 режимінде басқару бағдарламасы қалыптасатын профильдің геометриясына тозудың әсерін өтеу үшін Z осі бойымен қосымша салыстырмалы құрал қозғалысын (G1 G91 Z-0.05) еңгізу арқылы реттелді.

Ұсынылған тәсілдің тиімділігі СББ басқару бағдарламасына түзету еңгізгенге дейін және кейін алынған бұранда параметрлерінің салыстырмалы талдауы негізінде бағаланады. Контур өлшеулерінің нәтижелері бұранда қадамы, профиль тереңдігі, бүйірлік бұрыштар және пішін ауытқуларын анықтау үшін қолданылды, одан кейін алынған мәндер жұмыс бөлшегінің жобалық параметрлерімен салыстырылды. Материал партиясының нөмірі, жеткізілу күйі және сертификатта көрсетілген нақты химиялық құрамы осы зерттеуде тіркелмеген, бұл нәтижелерді материалдың нақты партиясына қатысты түсіндіру кезінде ескерілуі тиіс.

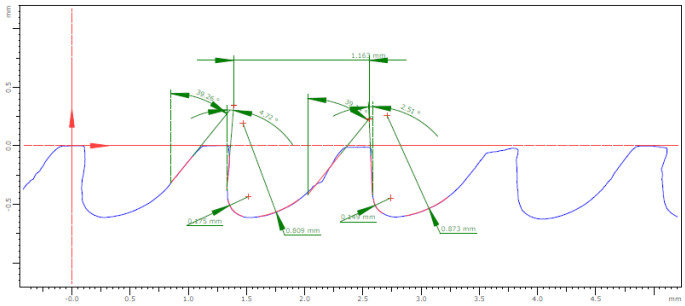
Нәтижелер және оларды талқылау

Контурографиялық өлшеулерді салыстыру кезінде әрбір эксперименттік топтағы көршілес режимдердің бұранда профильдері арасында айқын геометриялық айырмашылықтар байқалмады. Сондықтан салыстырмалы талдау үшін өңдеу процесінің үш негізгі күйін сипаттайтын №3, №6 және №9 режимдер таңдалды: құралдың бастапқы күйі, жинақталған жұмыс кезеңі және бейімделмелі өтемдеу енгізілгеннен кейінгі күй.

Жаңа құралмен өңдеу кезінде (№ 3 режим) алынған бұранда профилі 4 суретте көрсетілген. Өлшеу нәтижелері бойынша нақты бұранда қадамы 1,163 мм болып, номиналды 1,25 мм-ге қарағанда номиналды 1,25 мм мәнінен ауытқу 6,96% құрады. Профиль тереңдігі 0,809-0,873 мм аралығында өзгеріп, бүйірлік бұрыштар 39,25-42,72° аралығында болды. Пішіннің номиналды мәнінен ауытқуына қарамастан, бұранда профилі таңдалатын бөліктің бүкіл ұзындығы бойына біркелкі геометриямен және жергілікті қалыптау ақауларының болмауымен сипатталады.

Алынған нәтижелер өңдеу жүйесінің бастапқы күйін көрсетеді және кесу қырларының тозуының әртүрлі кезеңдерінде қалыптасқан бұранда профильдерімен кейінгі салыстыру үшін бастапқы нүкте ретінде пайдаланылды. Орнатылған қадам, профиль тереңдігі және бүйірлік бұрыштар параметрлері құралдың тозуының әсері мен бақылау бағдарламасының бейімделмелі түзету тиімділігін бағалауда эталондық параметрлер ретінде алынды.

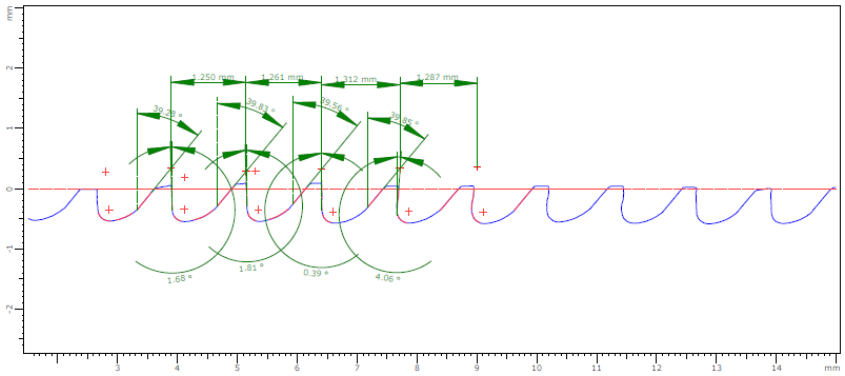
5 суретте № 6 өңдеу режимінде алынған бұранда профилінің контурлық талдау нәтижелері көрсетілген. Өлшенген бұранда қадамы 1,250-1,312 мм аралығында болып, бұл минималды ауытқулармен 1,25 мм номиналды мәнге сәйкес келеді. Бүйірлік беттер бұрыштары 38,68-39,82°-ге дейін өзгеріп, №3 өңдеу режимімен салыстырғанда айтарлықтай аз ауытқу көрсетті.



Сурет 4 – Машиналық № 3 өңдеу режим (Vc = 80 м/мин, f = 0,05 мм/айн, ap = 0,15 мм, жаңа құрал) қолданылып жасалған кортикалды сүйек бұрандасының профилі

(Ескертулер – авторлармен құрастырылған)

4-ші және 5-ші суретте көрсетілген нәтижелерді салыстыру көрсеткендей, үйкелген (приработка) кезеңінен кейін кескіш тістердің бұранда профилі анағұрлым тұрақты болады. Жана құралда номиналды мәнінен бұранда қадамының ауытқуы және бүйірлік бет бұрыштарының ауытқуының ұлғаюы байқалғанымен, №6 жұмыс режимінде профильдің геометриялық параметрлері біркелкіленіп, жобалық мәндерге жақындады. Ең айтарлықтай, өзгерістер бұранда қадамында байқалады, ол өлшенген бөлімдердің көпшілігінде іс жүзінде номиналды мәнге сәйкес келеді.



Сурет 5 – № 6 өңдеу режимінде (Vc = 80 м/мин, f = 0,05 мм/айн, ap = 0,15 мм, құрал тұрақты күйінде) өндірілген кортикалды сүйек бұрандасының профилінің контурлық талдау нәтижелері

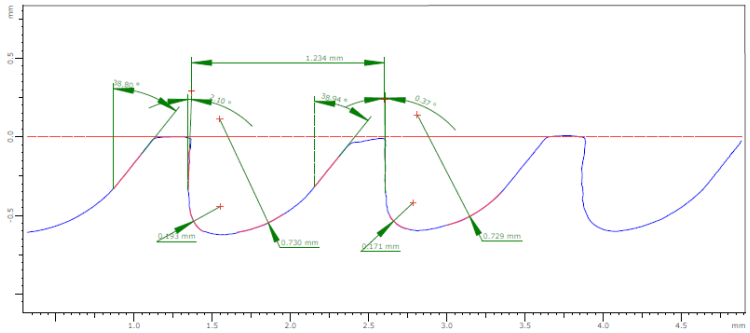
(Ескертулер – авторлармен құрастырылған)

Алынған нәтижелер № 6 режимнің құралдың тұрақталған тозу кезеңіне сәйкес келетінін көрсетеді, осы кезеңде бұранданы қалыптастырудың ең жоғары сапасы қамтамасыз етіледі. Бұл күйде бұранданың геометриялық параметрлерінің ауытқуы минималданады және нақты профиль жобалық геометрияға ең жақын сәйкес келеді.

Сонымен қатар, бақылау бағдарламасын реттемей –ақ бұранда кескіш басын үздіксіз пайдалану кескіш тістердің геометриясының өзгеруіне байланысты жүйелі қателіктердің жиналуына әкеледі. Нәтижесінде бұранда қадамы, профиль тереңдігі және бүйірлік бұрыштар жобалық мәндерінен ауытқу ықтималдығы артады, бұл бейімделмелі құрал тозуын өтеу әдістерін қолдануды қажет етеді.

Ұсынылған бейімделмелі өтемдеу әдісінің тиімділігін бағалау үшін № 9 режимде кескіш қырлардың жинақталған тозу мөлшерін ескере отырып, басқару бағдарламасына түзету енгізілді. 6 суретте көрсетілген контурографиялық өлшеулердің нәтижелері түзету әсерлерін еңгізгеннен кейін бұрандалы профильдің тұрақты геометриясының сақталуын көрсетеді.

Өлшенген бұранда қадамы 1,234 мм болды, бұл 1,25 мм номиналды мәнге қатысты 1,28% ауытқуға сәйкес келеді. Бүйірлік беттердің бұрыштары 38,84-39,10° диапазонында болды, ал профиль тереңдігі 0,729-0,730 мм болды. № 6 режиммен салыстырғанда геометриялық параметрлердің таралуының төмендеуі байқалады, бұл құралдың қозғалыс траекториясын реттегеннен кейін қалыптау процесінің тұрақтанғанын көрсетеді.



Сурет 6 – Құрал жұмысына байланысты геометриялық ауытқуды бейімделмелі өтемдеуден кейінгі кортикалды сүйек бұрандасы профилінің контурографиялық талдауы
(№9 режим, Vc = 80 м/мин, f = 0,05 мм/айн, ap = 0,15 мм)
(Ескертулер – авторлармен құрастырылған)

Бұранданы кескіш бастың одан ары қолдануынақарамастан, бейімделмелі өтемдеуді қолдану профиль параметрлерін жобалық мәндерге жақын деңгейге сақтауға мүмкіндік береді. Ең айқын әсер бүйірлік беттердің бұрыштары мен профиль тереңдігінің өзгеруінің төмендеуінде байқалады, бұл кескіш қырлардың жинақталған тозуының қалыптасқан бұранданың геометриясына әсерінің төмендеуін көрсетеді.

Алынған нәтижелер кескіш құралды ауыстырмай СББ жүйесінің көмегімен қалыптау қателіктерін өтеу мүмкіндігін растайды. Осылайша, ұсынылған тәсіл кортикалды сүйек бұрандаларын өндірудің қажетті дәлдігін сақтауға және бұрандакескіш бастиектың тиімді ресурсын арттыруға мүмкіндік береді.

Құрал жұмысына байланысты қалыптау ауытқуын сандық бағалау үшін өңдеу ұзындығы L мен қажетті өтемдеу ығысуы ΔZ арасындағы эксперименттік тәуелділік талданды. Зерттеу қайталама үлгілерге негізделген статистикалық эксперимент емес, салыстырмалы технологиялық зерттеу ретінде жүргізілгендіктен, алынған деректер зерттелген диапазон шегінде сызықтық функциямен аппроксимацияланды:

$$\Delta Z = 0{,}0011 \cdot L - 0{,}0118, \qquad (1)$$

мұндағы ΔZ – құралдың Z осі бойынша өтемдеу ығысуы, мм; L – жинақталған өңдеу ұзындығы, м.

Алынған эмпирикалық тәуелділік зерттелген технологиялық жүйе мен L = 12–57 м диапазонында бұранда профилінің ауытқуын өтемдеу үшін қажетті ΔZ шамасын бағалауға мүмкіндік береді. (1) теңдеуге сәйкес өңдеу ұзындығының әрбір 10 м-ге ұлғаюы Z осі бойынша шамамен 0,011 мм қосымша түзетуді қажет етеді.

Жинақталған өңдеудің ең үлкен ұзындығы L = 57 м болатын PROT57 режимі үшін түзетудің есептік мәні:

$$\Delta Z = 0{,}0011 \cdot 57 - 0{,}0118 = 0{,}0509 \text{ мм}, \qquad (2)$$

бұл G1 G91 Z−0.05 командасы арқылы №9 режимде жүзеге асырылған өтемақы мөлшерімен іс жүзінде сәйкес келеді.

Ұсынылған бейімделмелі өтемдеу алгоритмінің практикалық іске асырылуы 7-суретте көрсетілген. №3 және №6 режимдер үшін басқару бағдарламасында түзету әсерлері болмайды, өйткені өңдеу жаңа құралмен немесе тұрақтандырылған тозу сатысында тұрған құралмен жүзеге асырылды. Құралдың жинақталған жұмыс кезеңіне сәйкес келетін №9 режим үшін бағдарламаға (1) теңдеуімен есептелген G1 G91 Z-0.05 құралының салыстырмалы орын ауыстыруының қосымша командасы еңгізілді. Осылайша, түзету әсері эмпирикалық түрде берілмеді, бірақ жинақталған өңдеу ұзындығы мен өтемақы мөлшері арасындағы эксперименттік белгіленген тәуелділік негізінде анықталды.

Нәтижелер нақты бұранда геометриясының жобалық параметрлерге ең жақын сәйкестігі кесу қырларының тұрақтандырылған күйінің сатысына сәйкес келетін №6 режимде байқалғанын көрсетеді. Алайда, басқару бағдарламасын түзетпестен өңдеу ұзындығының одан әрі ұлғаюы жүйелі қалыптау қателігінің жинақталуына бұранданың геометриялық параметлерінің номиналды мәндерден біртіндеп ауытқуына әкеледі.

G97 M3 S2000 G95 G1 X5 U6.5 F0.05 G96 S80 G92 S4000 M15 X1 G95 G1 Z-12.0 F0.05 G1 X10 A135 G90 G1 X15 G40 M16	G97 M3 S3000 G95 G1 X5 U6.5 F0.05 G96 S80 G92 S4000 M15 X1 G95 G1 Z-22.0 F0.05 G1 X10 A135 G90 G1 X15 G40 M16	G97 M3 S4000 G95 G1 X5 U6.5 F0.05 G96 S80 G92 S4000 M15 X1 G95 G1 Z-49.30 F0.05 G1 X10 A135 G1 G91 Z-0.05 G90 G1 X15 G40 M16
№ 3 – эталон (жаңа құрал).	№ 6 – жұмыс күйіндеге оңтайлы геометрия	№ 9 – құралдың тозуы кәзірдің өзінде жоғарылаған

Сурет 7 – № 3, № 6 және № 9 режимдер үшін СББ басқару бағдарламасында тозуды бейімделмелі өтемдеу алгоритмін енгізу

(Ескертулер – авторлармен құрастырылған)

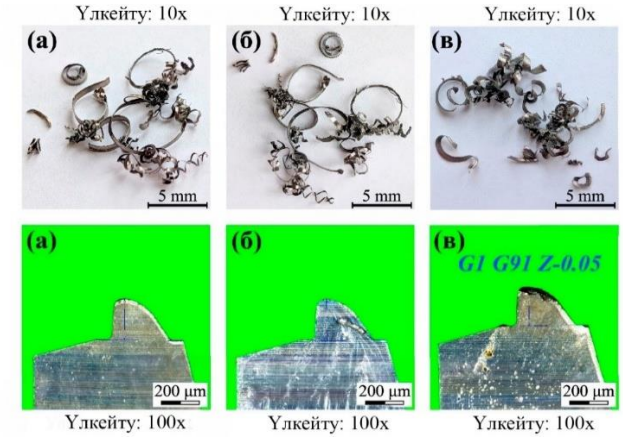
Бейімделмелі өтемдеуді № 9 режимде қолдану құралды одан әрі пайдалануға қарамастан, бұрандалы профиль параметрлерін №6 режиммен салыстыруға болатын деңгейде сақтауға мүмкіндік береді. Бұл түзету әсерлерін есептеу және бұрандакескіш бастиекын ауыстырмай қажетті өңдеу дәлдігін сақтау үшін эмпирикалық тәуелділікті (1) пайдалану мүмкіндігін растайды.

Осылайша, ұсынылған бейімделмелі өтемдеу алгоритмі кескіш қырлардың тозуының қалыптасқан бұранданың параметрлеріне әсерін азайтады және кортикалды сүйек бұрандаларын өндірудің қажетті дәлдігін сақтай отырып, құралды тиімді пайдалану мерзімін ұзартуға мүмкіндік береді.

Ұсынылған әдістің тиімділігін сандық бағалау үшін жаңа құралмен өңдеу кезінде алынған бұрандалы профильдің геометриялық параметрлерін салыстырмалы бағалау жүргізілді (№ 3 режим), кескіш қырлардың тұрақтандырылған күйі жағдайында (№ 6 режим) және тозудың бейімделмелі өтемдеуді қолданғаннан кейін (№ 9 режим).

Өлшеу нәтижелері өтемақы алгоритмін қолданғаннан кейін бұранданың номиналды мәннен минималды ауытқуы байқалғанын көрсетті. Бұрандакескіш бастиектың одан әрі жұмысына қарамастан, түзету әсерін қолдану профиль параметрлерін тұрақтандырылған құралдың күйімен салыстыруға болатын деңгейде сақтауға мүмкіндік берді. Бұл СББ жүйесінің көмегімен қалыптау қателіктерін өтеуге ұсынылған тәсілдің тиімділігін растайды.

Бұрандакескіш бастиектің әртүрлі жұмыс кезеңдеріндегі кесу процесін сапалық бағалау үшін жоңқаның сыртқы көрінісі мен кескіш жиектердің оптикалық кескіндері салыстырылды (8-сурет). №3 режимде қысқа және сегменттелген жоңқа байқалды. Құралдың жинақталған жұмыс ұзындығы артқан №6 режимде жоңқа ұзындығының ұлғаюы және кескіш жиек пішінінің өзгеруі байқалды. №9 режимде 0,05 мм өтемдеу түзетуі енгізілгеннен кейін жоңқа түзілуінің айқын бұзылу белгілері анықталмады. Бұл кескіндер сапалық салыстыру үшін берілген және өтемдеу алгоритмінің тиімділігін тікелей сандық дәлелдемейді.



Сурет 8 – Әртүрлі өңдеу режимдеріндегі жоңқа (10×, масштаб 5 мм) және кескіш жиек (100×, масштаб 200 мкм): а – №3 режим; б – №6 режим; в – №9 режим, ΔZ = 0,05 мм өтемдеуден кейін

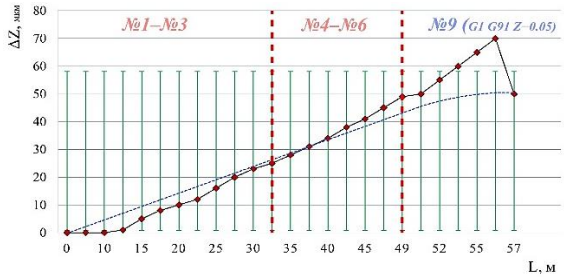
(Ескертулер – авторлармен құрастырылған)

Жоңқа мен кескіш жиектердің кескіндері қосымша сапалық сипатқа ие. 0,05 мм түзету құралдың нақты физикалық тозуын азайтпайды, тек оның бұранда профилінің геометриясына ықпалын өтемдеуді. Сондықтан алгоритмнің тиімділігі жоңқаның сыртқы көрінісімен емес, түзетуге дейінгі және кейінгі контурографиялық өлшеу нәтижелерін салыстыру арқылы бағаланды. Құралды ауыстыру сыни тозуға қол жеткізгеннен кейін орындалатын дәстүрлі тәжірибеден айырмашылығы, ұсынылған тәсілде түзету әсерінің мәні жинақталған өңдеу ұзындығы мен құралдың тозу мөлшері арасындағы эксперименттік белгіленген тәуелділік негізінде есептеу әдісімен анықталады.

Зерттелген максималды жұмыс үшін L = 57 м (9 сурет) эмпирикалық модель қажетті түзету ΔZ = 0,0509 мм жылжуды анықтады, бұл іс жүзінде басқару бағдарламасында іске асырылған 0,050 мм жылжумен сәйкес келеді (ауытқу 1,8 % кем). Есептелген өтемақы еңгізілгеннен кейін бұранда қадамының ауытқуы 1,25 мм номиналды мәнге қатысты 1,28 % құрады, ал бүйір беттер бұрыштарының өзгеру диапазоны 38,84–39,10° аралығында сақталды, бұл құрал ұзақ уақыт істегеннен кейін де қалыптау процесінің тұрақтануын растайды.

Айта кету керек, түзету жылжуы небәрі 0,05 мм, бірақ оның әсері ұзындығы 29 мм кортикалды сүйек бұрандасының бүкіл бұрандалы бөлігінің қалыптасуына таралады. Осылайша құралдың қозғалыс траекториясының шамалы өзгеруі кесу режимдерін өзгертпестен және технологиялық жабдықтың дизайнына араласпай, функционалды бұранданың бүкіл ұзындығы бойынша жинақталған жүйелік қатені өтеуге мүмкіндік береді.

9 суретте көрсетілген тәуелділікті талдау жинақталған өңдеу ұзындығының ұлғаюы қажетті өтемақы мөлшерінің табиғи өсуімен қатар жүретінін көрсетеді.



Сурет 9 – ΔZ өтемдеу ығысуының өңдеу ұзындығына L байланысты эксперименттік және аппроксимациялық тәуелділігі

(Ескертулер – авторлармен құрастырылған)

Эксперименттік мәндер сызықтық аппроксимация нәтижесімен салыстырылды. Өлшеу белгісіздігіне жеке есептеу жүргізілмегендіктен, графиктегі мәндер статистикалық сенімділік интервалдары ретінде қарастырылмайды. Алынған тәуелділік тек зерттелген L = 12-57 м диапазонында өтемдеу ығысуды инженерлік бағалау үшін ұсынылады.

Технологиялық тұрғыдан алғанда, ұсынылған алгоритм кесу режимдерін өзгертпестен және бұранда кесу басын ауыстыру үшін технологиялық процесті тоқтатпай, бұранданың геометриялық параметрлерінің қажетті дәлдігін қамтамасыз етеді. Өндірістік - экономикалық тұрғыдан есептелген өтемдеуді пайдалану құралдың тиімді ресурсын ұлғайтуға, жабдықты қайта реттеу санын қысқартуға және олардың геометриясының дәлдігіне қойылатын талаптарды сақтай отырып, медициналық имплланттарды өндіру құнын төмендетуге мүмкіндік береді. Бұл зерттеуде кескіш жиектің VB тозуы, кратер тереңдігі және жиек радиусы тікелей өлшенген жоқ. Сондықтан ΔZ физикалық тозу көрсеткіші емес, бұранда профилінің геометриялық ауытқуын өтеуге арналған эмпирикалық технологиялық параметр ретінде қарастырылды. Температуралық деформацияның, құралды орнату қатесінің, соғудың және білдек дәлдігінің әсері жеке бағаланбады және зерттеу нәтижелерінің шектеуі болып табылады.

Қорытынды

Зерттеу нәтижесінде сандық бағдарламалық басқарылатын білдектерде Ti-6Al-4V қорытпасынан кортикалды сүйек бұрандаларын дайындау кезінде құрал жұмысына байланысты геометриялық ауытқуларды бейімделмелі өтемдеу тәсілі әзірленіп, эксперименттік түрде тексерілді. Алынған нәтижелер төмендегідей қорытынды жасауға

мүмкіндік береді. Құралдың жинақталған жұмыс ұзындығы артқан сайын бұранда қадамының, профиль тереңдігінің және бүйір беттер бұрыштарының өзгеретіні анықталды. Тозу параметрлері тікелей өлшенбегендіктен, байқалған геометриялық ауытқулар құралдың физикалық тозуының сандық көрсеткіші ретінде емес, зерттелген технологиялық жүйенің жинақталған жұмысына байланысты өзгерістер ретінде бағаланды.

Өңдеу ұзындығы мен қажетті өтемдеу ығысуы арасындағы эксперименттік деректердің сызықтық аппроксимациясы алынды. Зерттелген максималды жұмыс үшін L = 57 м түзету жылжуының есептік мәні ΔZ = 0,0509 мм болды, бұл G1 G91 Z−0.05 командасы арқылы СББ басқару бағдарламасында жүзеге асырылған 0,050 мм өтемақы мөлшерімен сәйкес келді.

Есептік бейімделмелі өтемдеуді қолдану кесу режимдерін өзгертпестен және бұрандакескіш бастиекын мерзімінен бұрын ауыстырмай қалыптау процесін тұрақтандыруды қамтамасыз ететіні эксперименталды түрде расталды. Түзету енгізілгеннен кейін бұранда қадамының номиналды 1,25 мм мәнінен ауытқуы 1,28% құрады, ал бүйір беттер бұрыштары 38,84-39,10° аралығында сақталды, бұл құралды ұзақ уақыт пайдалану кезінде бұранда профилінің қажетті геометриясының сақталуын көрсетеді.

Жоңқа мен кескіш жиектердің оптикалық кескіндерін салыстыру қосымша сапалық бағалау ретінде қолданылды. Өтемдеу алгоритмінің тиімділігі түзетуге дейінгі және кейінгі бұранда профилінің контурографиялық өлшеу нәтижелерімен бағаланды.

Зерттеудің практикалық маңыздылығы бұрандалардың қажетті дәлдігін сақтай отырып, бұрандакескіш бастиектің тиімді пайдалану мерзімін ұзарту, жабдықты қайта баптау санын және технологиялық тоқтап қалу уақытын қысқарту мүмкіндігімен сипатталады. Ұсынылған алгоритм қолданыстағы СББ жүйелерінде жабдықтың дизайнын өзгертпестен жүзеге асырылуы мүмкін және Ti-6Al-4V қорытпасынан жасалған кортикалды сүйек бұрандаларын жаппай өндіруде қолданылады.

Әрі қарай зерттеулердің болашағы кескіш құралдың тозуын автоматты бақылау жүйелерін әзірлеуге, бейімделмелі өтемақы алгоритмдерін цифрлық өндіріс жүйелеріне біріктіруге және медициналық имплanttармен өңдеу қиын материалдардың басқа түрлерін өңдеуге ұсынылған тәсілді кеңейтуге байланысты.

Әдебиеттер тізімі

1. Biomaterials as implants in the orthopedic field for regenerative medicine: Metal versus synthetic polymers / F.D. Al-Shalawi et al // Polymers. – 2023. – № 15(12). – P. 2601. https://doi.org/10.3390/polym15122601.
2. Bamford E. Tool wear in turning of titanium alloy Ti–6Al–4V: Challenges and potential solutions for crater wear, diffusion and chip formation / E. Bamford // Master's thesis, Uppsala University. – 2016.
3. Research of cutting temperature reducing of titanium alloy grade 5 below polymorphic transformation depending on calculation of cutting modes / M. Doudkin et al // International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development. – 2020. – № 10(2). – P. 747-758. https://doi.org/10.24247/ijmperdapr202074.
4. Ti based biomaterials, the ultimate choice for orthopaedic implants – A review / M. Geetha et al // Progress in Materials Science. – 2009. – № 54(3). – P. 397-425. https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2008.06.004.
5. Development of biocompatible coatings for orthopedic joint implants / A.B. Kengesbekov et al // Physical Sciences and Technology. – 2025. – № 12(1-2). – P. 84-94. https://doi.org/10.26577/phst20251218.
6. Microplasma sprayed tantalum coatings on Ti Grade 5 extra-low interstitials: Investigation of thickness and porosity control / K. Kombayev et al // Coatings. – 2025. – № 15(4). – P. 464. https://doi.org/10.3390/coatings15040464.
7. The progress in titanium alloys used as biomedical implants: From the view of reactive oxygen species / J. Yang et al // Frontiers in Bioengineering and Biotechnology. – 2022. – № 10. – P. 1092916. https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.1092916.
8. DePuy Synthes. (2021). Small Fragment System: Surgical Technique. DePuy Synthes Companies.

9. International Organization for Standardization. (1991). ISO 5835:1991. Implants for surgery – Metal bone screws with hexagonal drive connection, spherical under-surface of head, asymmetrical thread – Dimensions. ISO.
10. Kumar A. Tool wear prediction using multi-sensor data fusion and attention-based deep learning / A. Kumar, V. Vasu // Production Engineering. – 2025. – № 19. – P. 455-471. https://doi.org/10.1007/s11740-024-01319-6.
11. Machining accuracy prediction and adaptive compensation method of CNC machine tool under absence of machining process sensing / J. Sun et al // Journal of Intelligent Manufacturing. – 2025. – № 36. – P. 3923-3940. https://doi.org/10.1007/s10845-024-02403-5.
12. ASTM International. (2026). *ASTM F136-26:* Standard specification for wrought titanium-6aluminum-4vanadium ELI (extra low interstitial) alloy for surgical implant applications (UNS R56401). ASTM International. https://doi.org/10.1520/F0136-26.

Қаржыландыру: *Бұл зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитетімен BR24992786 «Отандық медициналық құралдар мен медициналық мақсаттағы бұйымдардың үлгілерін дайындау технологиясын әзірлеу» бағдарламасын іске асыру шеңберінде қаржыландырылады.*

Алғыс білдіру: *Авторлар медициналық құрал-сайман бойынша пікірлер ұсынғаны, сондай-ақ сарапшылық кеңестері мен практикалық ұсынымдары үшін академик Н.Ж. Батпенов атындағы Ұлттық травматология және ортопедия ғылыми орталығына алғыс білдіреді.*

К.К. Комбаев, Ж.М. Мұхаметбек, Б.Н. Азаматов, Д.И. Қалиев, Р. Ғабдысалық [5]
Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті
070000, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ., Д.Серікбаев көшесі, 19
*e-mail: rgabdysalyk@edu.ektu.kz

АДАПТИВНАЯ КОМПЕНСАЦИЯ ИЗНОСА РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ КОРТИКАЛЬНЫХ КОСТНЫХ ВИНТОВ ИЗ СПЛАВА TI-6AL-4V НА СТАНКАХ С ЧПУ

Рассмотрена проблема обеспечения точности геометрических параметров кортикальных костных винтов из титанового сплава Ti-6Al-4V, изготавливаемых на станках с числовым программным управлением. Актуальность исследования обусловлена высокими требованиями к качеству медицинских имплантатов и необходимостью поддержания стабильности процесса образования резьбы в условиях накопленного износа режущего инструмента. Целью работы является разработка и экспериментальная проверка метода адаптивной компенсации износа резьбонарезной головки средствами системы ЧПУ. Исследования выполнены на базе Центра компетенций «Smart Engineering» Восточно-Казахстанского технического университета имени Д. Серикбаева. Образцы изготавливались на автомате продольного точения MANURHIN K'MX 726 EVO, а контроль геометрических параметров резьбы осуществлялся с использованием контурографа Mahr MarSurf CD 140. Экспериментальная программа включала девять режимов обработки с максимальной накопленной длиной резания 57 м. Установлено, что с увеличением накопленной длины обработки наблюдаются систематические изменения шага резьбы, глубины профиля и углов боковых поверхностей. Разработана эмпирическая зависимость, определяющая величину корректирующего смещения инструмента в зависимости от накопленной длины обработки. Для максимальной исследованной наработки получено значение ΔZ = 0,0509 мм, практически совпадающее с реализованной компенсацией 0,050 мм. После введения расчётной коррекции отклонение шага резьбы составило 1,28 % относительно номинального значения 1,25 мм, что обеспечило сохранение стабильной геометрии резьбового профиля без замены инструмента. Практическая значимость работы заключается в повышении точности изготовления медицинских имплантатов, увеличении ресурса резьбонарезной головки и снижении производственных затрат. Перспективы дальнейших исследований связаны с созданием систем автоматического мониторинга износа инструмента и внедрением алгоритмов адаптивной компенсации в интеллектуальные цифровые производственные системы.

Ключевые слова: *кортикальный костный винт, Ti-6Al-4V, износ режущего инструмента, адаптивная компенсация, эмпирическая зависимость, станки с ЧПУ, формообразование резьбы, медицинские имплантаты.*

К.К. Комбаев, Ж.М. Мұхаметбек, Б.Н. Азаматов, Д.И. Қалиев, Р. Ғабдысалық
Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті
070000, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ., Д.Серікбаев көшесі, 19
*e-mail: rgabdysalyk@edu.ektu.kz

ADAPTIVE CUTTING TOOL WEAR COMPENSATION IN CNC MANUFACTURING OF TI-6AL-4V CORTICAL BONE SCREWS

This study addresses the problem of ensuring the dimensional accuracy of cortical bone screws manufactured from Ti-6Al-4V titanium alloy using computer numerical control (CNC) machine tools. The relevance of the research is determined by the stringent quality requirements for medical implants and the need to maintain stable thread-forming conditions under progressive cutting tool wear. The aim of the study is to develop and experimentally validate a method for adaptive compensation of thread-cutting head wear using CNC system capabilities. The research was conducted at the Smart Engineering Competence Center of D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University. Experimental specimens were manufactured on a MANURHIN K'MX 726 EVO Swiss-type CNC lathe, while the thread geometry was evaluated using a Mahr MarSurf CD 140 contour measuring system. The experimental program comprised nine machining modes with a maximum accumulated cutting length of 57 m. The results showed that increasing accumulated machining length was associated with systematic changes in thread pitch, profile depth, and flank angles. An empirical linear relationship was obtained to estimate the required compensation offset within the investigated machining-length range. For the maximum investigated operating length, the calculated compensation value reached ΔZ = 0.0509 mm, which closely matched the implemented CNC compensation of 0.050 mm. After applying the calculated correction, the thread pitch deviation was limited to 1.28% relative to the nominal value of 1.25 mm, ensuring stable thread profile geometry without tool replacement. The practical significance of the proposed approach lies in improving the dimensional accuracy of medical implants, extending the effective service life of the thread-cutting head, and reducing manufacturing costs. Future research will focus on automated tool wear monitoring systems and the integration of adaptive compensation algorithms into intelligent digital manufacturing environments.

Key words: *cortical bone screw, Ti-6Al-4V, cutting tool wear, adaptive compensation, empirical model, CNC machining, thread profile generation, medical implants.*

Сведения об авторах

Куат Курганович Комбаев – кандидат технических наук, ассоциированный профессор, Международная школа инженерии, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан; e-mail: kkombaev@edu.ektu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6929-2748.

Жақсылық Мұхаметбекұлы Мұхаметбек – докторант ОП - 8D07102 «Машиностроение», инженер-исследователь Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан; e-mail: ZhMukhametbek@edu.ektu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2196-010X.

Багдат Нурланович Азаматов – PhD, Генеральный директор ТОО «SciMed», Усть-Каменогорск, Казахстан; e-mail: BAzamatov@edu.ektu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6381-5846.

Данияр Исатайулы Калиев – PhD, руководитель ЦК «Smart Engineering», Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан; e-mail: dkaliyev@ektu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7281-2022.

Риза Ғабдысалық* – PhD, ассоциированный профессор, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан; e-mail: riza.gabdyssalyk@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9184-0897.

Авторлар туралы мәліметтер

Куат Курганович Комбаев – техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, Халықаралық инженерия мектебі, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: kkombaev@edu.ektu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6929-2748.

Жақсылық Мұхаметбекұлы Мұхаметбек – Докторант ББ – 8D07102 «Машина жасау» Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті зерттеуші-инженер, Өскемен, Қазақстан; e-mail: ZhMukhametbek@edu.ektu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2196-010X.

Багдат Нурланович Азаматов – PhD, «SciMed» ЖШС бас директоры, Өскемен, Қазақстан; e-mail: BAzamatov@edu.ektu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6381-5846.

Данияр Исатайұлы Қалиев – PhD докторы, «Smart Engineering» ҚО жетекшісі, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан; e-mail: dkaliyev@ektu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7281-2022.

Риза Ғабдысалық* – PhD, қауымдастырылған профессор, Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан; e-mail: riza.gabdyssalyk@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/ 0000-0001-9184-0897.

Information about the authors

Kuat Kombayev – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, International School of Engineering, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan; e-mail: kkombaev@edu.ektu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6929-2748.

Zhaksylyk Mukhametbek – Doctoral student of the Educational Program 8D07102 «Mechanical Engineering» research engineer D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; e-mail: ZhMukhametbek@edu.ektu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2196-010X.

Bagdat Nurlanovich Azamatov – PhD, CEO of the «SciMed», Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; e-mail: BAzamatov@edu.ektu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6381-5846.

Daniyar Kaliyev – PhD, Head of Competence Center «Smart Engineering», D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; e-mail: dkaliyev@ektu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7281-2022.

Riza Gabdyssalyk* – PhD, Associate Professor, East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbaev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; e-mail: riza.gabdyssalyk@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/ 0000-0001-9184-0897.

Редакцияға енуі 17.07.2026
Өңдеуден кейін түсуі 11.09.2026
Жариялауға қабылданды 14.09.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-37

IRSTI: 62.13.99

BY 4.0
Check for updates

F.G. Sagymbek[1], Z.A. Kozhakhmetova[1], T.B. Abdigaliyeva[2]*
[1]Kazakh National Agrarian Research University,
050010, Republic of Kazakhstan, Almaty, Abay ave., 8
[2]Almaty Technological University,
050012, Republic of Kazakhstan, Almaty, Tole bi st.,100
*e-mail: tolkyn_07.1987@mail.ru

DEVELOPMENT OF A TECHNOLOGY FOR PRODUCING DRY BIOPRODUCTS FOR THE FOOD INDUSTRY WITH PRESERVATION OF STRAIN FUNCTIONAL ACTIVITY

Annotation: *The article presents a technology for creating a dry probiotic bioproduct using Lactobacillus paracasei-010K and Torulopsis sphaerica-105k strains, ensuring the preservation of their survival and functional characteristics. The main object of the study was the probiotic strain Lactobacillus paracasei-010K, obtained from koumiss and having a pronounced inhibitory effect. Two formulations have been developed for this method: a monoculture and a bacterial-fungal mixture using hydrolyzed milk as a substrate for cultivation. Freeze drying was carried out according to a programmed sequence, including freezing, freeze drying, and subsequent drying steps. Survival was estimated by counting the number of colony-forming units on the plates.*

After freeze-drying, the viability of Lactobacillus paracasei-010K cells was 88.6% in the monoculture and 91.9% in the bacterial-fungal population; for yeast element T. sphaerica – 105K reached 91.3%. The overall viability of the strains remained at 88-92%, while their inhibitory effect on the test cultures of Escherichia coli, Salmonella Dublin and Bacillus subtilis decreased by no more than 10-12%. The aggregate demonstrated a slightly more pronounced inhibitory effect compared to the monoculture, which indicates the synergistic effect of the yeast component.

The developed technology makes it possible to obtain homogeneous dry biological products with high functional characteristics and potential storage stability, demonstrating their prospects for use in the food industry.

Key words: *probiotics, lyophilization, dry bioproduct, Lactobacillus paracasei, Thorulopsis, viability, functional activity, microbes.*

Introduction

In the context of the rapid development of the food industry and the functional food market, there is a growing demand for stable probiotic cultures capable of maintaining their viability and functional activity during storage and transportation [1]. Dry bacterial preparations are widely used in the production of fermented milk drinks, starter cultures, biologically active additives and other functional food products. Their effectiveness depends on maintaining a high concentration of viable cells, antagonistic activity, and technological stability [2].

Lyophilization is considered to be the most effective method of obtaining dry probiotic preparations. This method is based on removing moisture from a frozen product by sublimation under vacuum conditions [3]. Lyophilization minimizes damage to cell membranes and enzymatic systems, ensuring the preservation of the metabolic activity of microorganisms [4]. Unlike spray drying, which involves exposure to high temperatures, lyophilization provides milder conditions for dehydration and allows you to obtain drugs with an extended shelf life.

Despite its high efficiency, the lyophilization process is technologically complex and energy-intensive, requiring optimization of the parameters of freezing, vacuuming and secondary drying [5].

©F.G. Sagymbek, Z.A. Kozhakhmetova, T.B. Abdigaliyeva, 2026

The composition and concentration of the protective environment (lyoprotectors) have a significant effect on cell survival, as they can form a stabilizing matrix around cellular structures and reduce the damaging effect of ice crystals [6]. Commonly used ingredients include skimmed milk, sugar, peptone hydrolysates, and other stabilizers.

Thus, the development of a technically optimized protocol for the lyophilization of probiotic cultures, including the selection of an effective protective environment, remains an urgent task in modern food engineering and biotechnology. Of particular interest is the creation of dry probiotic compositions based on a consortium of lactic acid bacteria and yeast intended for use in the production of functional foods.

The purpose of this study was to develop a technology for the production of dry bioproducts based on *Lactobacillus paracasei – 010K* and *Torulopsis sphaerica – 105k* using lyophilization while maintaining their viability and functional activity.

Unlike existing approaches, the proposed technology is aimed at optimizing both the lyophilization parameters and the composition of the protective medium for the bacterial-yeast consortium. While traditional methods often use monocultures and standard cryoprotectors, the present study presents a combined system that increases cell survival and maintains functional activity. Compared to previously presented technologies, the developed method provides higher viability (up to 91-92%) and improved antagonistic properties after drying.

The scientific novelty of the study lies in the development of an integrated lyophilization technology combining optimized temperature-vacuum drying parameters with a bacterial-yeast consortium based on Lactobacillus paracasei-010K and Torulopsis sphaerica-105k cultivated in hydrolyzed milk. Unlike conventional approaches focused on bacterial monocultures, the proposed system demonstrated enhanced cell survival (88-92%) and better preservation of antagonistic activity after drying. The study also provides experimental evidence of the synergistic effect of the yeast component on the stability of probiotic cultures during lyophilization. The available literature contains limited information regarding the application of this specific bacterial-yeast consortium under optimized lyophilization conditions.

Materials and methods

The probiotic strain *Lactobacillus paracasei-010K* isolated from koumiss was used as the main object of the study. The strain was characterized by stable cultural properties and pronounced antagonistic activity. *Lactobacillus paracasei-010K* was deposited and stored in the RSE at the Republican Collection of Microorganisms of the Science Committee of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan under the number B-RKM 1009.

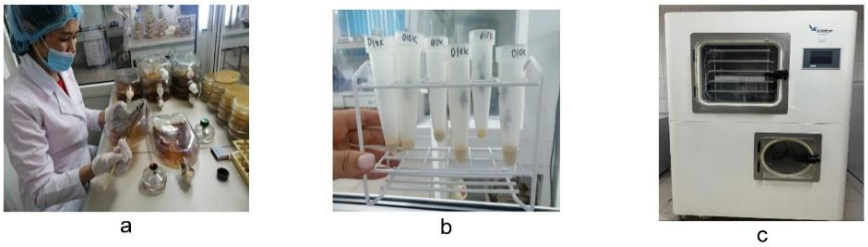
Two variants of the composition were prepared for the development of the dry bioproduct technology. Sample № 1 consisted of a monoculture of *L. paracasei-010K* with the addition of skimmed milk in a ratio of 1:1. Sample № 2 included a consortium of *L. paracasei-010K* and *T. sphaerica-105k* in a ratio of 1:0.5, with the addition of skimmed milk in a ratio of 1:1 relative to the volume of the cell suspension.

Skimmed milk has been used as a protective medium due to its well-proven cryo- and lyoprotective properties. It contains proteins (mainly casein) and lactose, which form a stabilizing matrix around microbial cells during freezing and subsequent drying. This matrix reduces mechanical damage caused by the formation of ice crystals and protects cell membranes from dehydration. The choice of skimmed milk is also confirmed by previous studies demonstrating its effectiveness in maintaining the viability of probiotic microorganisms during lyophilization. Hydrolyzed skimmed milk is generally characterized by the presence of milk proteins (mainly casein-derived peptides), lactose and mineral components. The selection of this medium was based on its availability, food-grade safety, and previously reported effectiveness in preserving probiotic microorganisms during freeze-drying.

For lyophilization, 24-hour cultures of microorganisms were grown in an enriched nutrient medium at a temperature of 37±2 °C until a concentration of 10^8-10^{10} CFU/ml was reached (Fig. 1a). The culture liquid was centrifuged at 2000 rpm for 10 minutes to concentrate the cellular biomass (Fig. 1b). The resulting precipitate was resuspended in a protective medium until a homogeneous suspension was obtained. The ratio of biomass to the protective environment was 1:1.

Lyophilization was performed in a Lyobeta-4 PS chamber apparatus using standard 2R vials (Fig. 1b). The sample volume in each vial was 0.5 ml. The technological cycle included the stages of freezing, primary (sublimation) and secondary (desorption) drying. The process was carried out

in automatic mode with programmatically adjustable temperature and vacuum parameters. The lyophilization parameters are shown in Table 1.



a b c

Figure 1 – Inoculation of Lactobacillus paracasei 010K into liquid medium (a), biomass obtained after centrifugation (b), and the LyoBeta lyophilizer used for biomass drying (c)

Table 1 – Lyophilization Parameters

Process Stage	Temperature, °C	Pressure, Pa	Duration
Freezing	–50	–	7 h
Primary drying	–30	300	7 h
Primary drying	–30	500	3 h
Secondary drying	40	–	7 h
Secondary drying	37	–	6,5 h

The parameters were monitored at all stages of the technological cycle. This lyophilization regime was chosen as a compromise between the intensity of moisture removal and minimizing damage to cellular structures. The number of viable cells before and after lyophilization was determined by seeding on nutrient media. Under sterile conditions, 0.1 ml of suspension of the appropriate dilution was applied to the surface of the solid nutrient medium and incubated at a temperature of 37±2 °C. After incubation, colony-forming units were counted.

All experiments were carried out in triplicate (n=3). The results are presented as averages ± standard deviation (SD). Statistical analysis was performed using the Student's t-test. The differences were considered statistically significant at p≤0.05.

The effectiveness of the developed lyophilization regimen was evaluated based on the survival rate calculated according to the formula (1):

$$S = \frac{N_1}{N_0} \times 100\% \quad (1)$$

where, N0 is the concentration of viable cells before lyophilization, N1 is the concentration of cells after the completion of the process.

Results and Discussion

In the first stage of the study, cell viability was assessed after the completion of the sublimation drying process. Based on the obtained data, the survival rate was calculated. The results of the quantitative evaluation are presented in Table 2.

Table 2 – Effect of lyophilization on the viability and functional activity of the strains

Sample	Parameter	Before Lyophilization	After Lyophilization
№ 1 (monoculture)	*L. paracasei,* CFU/ml	3.5±0.2	3.1±0.1
Inhibition zone, mm	*Salmonella dublin*	12.2±0.1	11.0±0.2
	Escherichia coli	15.3±0.1	13.8±0.2*
	Bacillus subtilis	11.2±0.1	10.0±0.2
	Contamination	not detected	not detected
№ 2 (bacterial-yeast consortium)	*L. paracasei,* CFU/ml	3.8±0.1	3.4±0.1
	T. sphaerica, CFU/ml	4.7±0,2	4.2±0.2
Inhibition zone, mm	*Salmonella dublin*	12.8±0.2	11.5±0.2*
	Escherichia coli	16.0±0.2*	14.2±0.2*
	Bacillus subtilis	12.0±0.2	10.7±0.2*
	Contamination	not detected	not detected
*-p≤0,05			

For the L. paracasei-010K strain, the number of cells in the monoculture decreased from 3.5 to 3.1×10 CFU/ml. A similar decrease was observed in the consortium, from 3.7 to 3.4×10 CFU/ml. For the yeast component *T. sphaerica-105k* concentration decreased from 4.6 to 4.2×10 CFU/ml. This decrease can be explained by the physiological stress resulting from water crystallization, osmotic fluctuations, and cell dehydration. However, the magnitude of these losses is within acceptable technological limits and does not significantly affect the functional properties of crops.

An important indicator of the effectiveness of the developed technology is the preservation of the antagonistic activity of the strains after lyophilization [7]. The antagonistic activity of *Lactobacillus paracasei-010K* was evaluated before and after lyophilization against test cultures of *Escherichia coli, Salmonella Dublin* and *Bacillus subtilis*. Pronounced inhibition zones were observed in the monoculture: 15.3±0,1 mm before and 13.8±0,2 mm after for *E. coli* ($p<0,05$), 12.2±0.1 mm before and 11.0±0.2 mm after for *S. dublin* and 11.2±0.1 mm before and 10.0±0.2 mm after for *B. subtilis*. Bacterial-yeast Consortium (*L. paracasei-010K* and *T. sphaerica-105k*) showed slightly higher antagonistic activity after lyophilization (14.2±0.2 mm for E. coli, 11.5±0.2 mm for *S. dublin*, and 10.7±0.2 mm for *B. subtilis* ($p<0,05$), indicating a synergistic effect of the yeast components. After lyophilization, the viability of the strains remained at the level of 88-92% (Fig. 2), while the inhibition zones decreased by no more than 10-12%, which confirmed the preservation of the functional potential of probiotic cultures. The absence of polluting microorganisms in all series of experiments confirms the microbiological purity of the preparations obtained and the correct organization of the technological process.

In sample № 1, the absolute death of *L. paracasei-010K* was 0.4×10 CFU/ml, which led to an estimated survival rate of 88.6%. In sample №2 for the same strain, the decrease in the number of cells was 0.3×10 CFU/ml, which corresponds to a survival rate of 91.9%. For the yeast component *T. sphaerica-105K* in the consortium lost 0.4×10 CFU/ml with a survival rate of 91.3%.

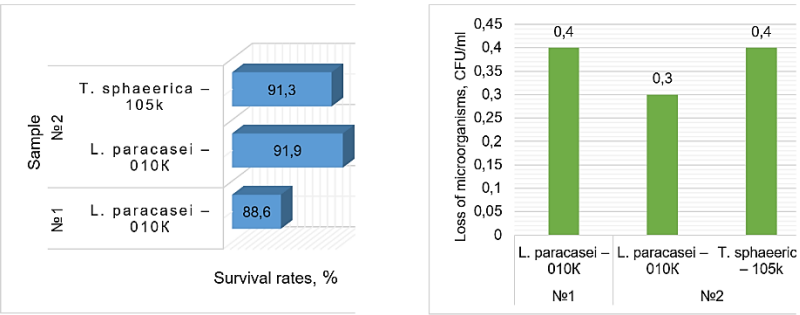


Figure 2 – Survival rates and cell loss of microorganisms after lyophilization

The scheme of the lyophilization process is shown in Figure 3. In all variants, the decrease in the number of cells after freeze drying did not exceed 12%, which indicates the high resistance of the studied cultures to low-temperature exposure and dehydration stress.

The developed technological scheme for the production of a dry biological product is based on the principles of gentle stabilization of cellular structures and is aimed at maximizing the viability and functional activity of *Lactobacillus paracasei-010K* and *Torulopsis sphaerica-105k* strains. The results of this study demonstrate that the proposed lyophilization regimen provides a high level of preservation of the viability of probiotic strains. According to Ge et al. (2024) lyophilization is one of the most effective strategies for stabilizing probiotics by minimizing thermal stress compared to other drying methods [8].

Other authors also note that the effectiveness of maintaining cell viability largely depends on the use of protective agents capable of forming a vitreous matrix and limiting the formation of intracellular ice. In particular, studies on the lyophilization of *L. casei* have shown that choosing a culture medium with an optimal ratio of components can increase cell survival to 80-90% or higher. At the same time, a higher concentration of protective substances in the environment does not always correlate with a higher survival rate, which emphasizes the importance of optimizing the composition of the lyoprotector [9].



Figure 3 – Schematic representation of the technological process for obtaining lyophilized biopreparations and the final dry bioproducts

Similar conclusions have been drawn in studies on the freezing and lyophilization of lactic acid cultures for the production of starter culture, where the preservation of cells in a dry state depends not only on the parameters of the thermal regime, but also on factors such as the rate of freezing, the concentration of solute and the structure of the protective environment [10]. It should also be noted that the preservation of the antagonistic activity of microbial cultures after lyophilization indicates the preservation of the functional ability of probiotics, which is an important criterion for the effectiveness of their use. For example, studies on the storage of cultures of lactococci and lactobacilli have shown that microbiological and biochemical properties, including the ability to suppress pathogenic microorganisms, can be maintained for a long time under appropriate drying and storage conditions [11].

A comparison of the results obtained with the literature data indicates that the developed lyophilization regime has good technological representativeness and can be adapted for the industrial production of dry probiotic preparations. At the same time, optimization of the protective medium and temperature-vacuum parameters may significantly influence the survival rate of different strains. These differences are associated with the specific characteristics of microbial cells, including cell surface structure, metabolic activity, and the ability to synthesize exopolysaccharides, which together determine resistance to dehydration stress. Similar observations have been reported in studies on probiotic lyophilization [12].

Compared with previously published studies, where the survival rate of probiotic microorganisms after lyophilization typically ranges from 70% to 85%, the results obtained in this work demonstrate a higher level of cell preservation. This improvement can be attributed to the combined optimization of temperature-vacuum parameters and the selected protective medium.

In addition, the use of a bacterial-yeast consortium contributed to enhanced stability of the system. The presence of the yeast component likely provided additional protection to bacterial cells during dehydration, resulting in higher survival rates and better preservation of antagonistic activity. This suggests the existence of synergistic interactions between the components of the consortium. These findings indicate that the proposed technology has advantages over conventional approaches and can be considered a promising method for the production of stable dry probiotic preparations for the food industry.

One limitation of the present study is the absence of residual moisture determination in the obtained lyophilized preparations. Residual moisture is an important quality parameter affecting storage stability and viability of probiotic products. Therefore, future studies will include residual moisture analysis together with long-term storage stability assessment to provide a more comprehensive characterization of the developed bioproducts.

However, further studies are required to evaluate the long-term stability (shelf-life) of the developed bioproducts under different storage conditions. This will allow a more complete assessment of their practical applicability in the food industry.

Conclusion

The study showed that the proposed lyophilization regimen provides high viability and functional activity of *Lactobacillus paracasei-010K* and *Torulopsis sphaerica-105k* strains. The decrease in the number of viable cells after lyophilization ranged from 8 to 12%, which confirms the

effectiveness of the selected temperature and vacuum parameters and the protective environment. The preservation of activity after lyophilization indicates the stability of the functional properties of probiotic cultures. The results of this study confirm that the developed technology can be applied to the production of stable dry biological products with high viability and preserved functional activity. Evaluation of long-term storage stability requires additional studies under different storage conditions.

References

1. The International Scientific Association of Probiotics and Prebiotics (ISAPP) consensus statement on the definition and scope of postbiotics / S. Salminen et al // Nat. Rev. Gastroenterol. Hepatol. – 2021. – Vol. 18. – P. 649-667. https://doi.org/10.1038/s41575-021-00440-6.
2. Lactic acid bacteria in Asian fermented foods and their beneficial roles in human health / H. Doo et al // Food Sci. Biotechnol. – 2024. – Vol. 33. – P. 2021-2033. https://doi.org/10.1007/s10068-024-01634-9.
3. Polysaccharides as carriers of polyphenols: Comparison of freeze-drying and spray-drying as encapsulation techniques / I. Buljeta et al // Molecules. – 2022. – Vol. 27. – Art. 5069. https://doi.org/10.3390/molecules27165069.
4. Preservation of biomaterials and cells by freeze-drying: Change of paradigm / A. Merivaara et al // J. Control. Release. – 2021. – Vol. 336. – P. 480-498. https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2021.06.042.
5. Blynskaya E.V. Technological approaches to improving the process lyophilization of protein and peptide drugs / E.V. Blynskaya, S.V. Tishkov, K.V. Alekseev // Russian journal of biotherapy. – 2017. – Vol. 16. – №. 1. – P. 6-11. https://doi.org/10.17650/1726-9784-2017-16-1-6-11. (In Russian).
6. Yavnikov N.V. The effect of various cryoprotective components on the survival of probiotic microorganisms after freeze drying / N.V. Yavnikov // International Bulletin of Veterinary Medicine. – 2022. - № 1. – P. 69-73. https://doi.org/10.52419/issn2072-2419.2022.1.69. (In Russian).
7. Development of stable freeze-dried functional ingredients containing wild-type probiotic strains / P. Prapa et al. // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13, № 1. – Art. 630. https://doi.org/10.3390/app13010630.
8. Research progress on improving the freeze-drying resistance of probiotics: A review / S. Ge et al // Trends in Food Science & Technology. – 2024. – Vol. 147. – Art. 104425. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104425.
9. Improvement of the lyophilization survival rate of Lactobacillus casei via regulation of its surface substances / S. Cui et al // Foods. – 2022. – Vol. 11, № 21. – Art. 3468. https://doi.org/10.3390/foods11213468.
10. Sitnikova P.B. Prospects for the production of whipped frozen fruit desserts with natural sugars / P.B. Sitnikova, A.A. Tvorogova, V.A. Naumov // Food Processing Industry. – 2025. – № 5. – P. 8-12.
11. Ovcharova E.S. Freeze-drying, storage time and conditions influence on the adhesive activity and biochemical properties of lactobacilli / E.S. Ovcharova, A.F. Novikova, D.V. Maslov // Proceedings of the Kuban State Agrarian University. – 2025. – № 117. – P. 314-319. https://doi.org/10.21515/1999-1703-117-314-319. (In Russian).
12. Sadguruprasad LT. Statistical modelling for optimized lyophilization of Lactobacillus acidophilus strains for improved viability and stability using response surface methodology / LT. Sadguruprasad, M. Basavaraj // AMB Express. – 2018. – Vol. 8. – Art. 129. https://doi.org/10.1186/s13568-018-0659-3.

Acknowledgment

The authors express their sincere gratitude to the Research Laboratory «Microbiocenosis and Probiotic Engineering» of the Kazakh National Agrarian Research University for their support in conducting experiments, providing equipment, and assisting with microbiological analyses.

Ф.Ғ. Сағымбек[1], З.А. Кожахметова[1], Т.Б. Абдигалиева[2]*

[1]Казахский национальный аграрный исследовательский университет,
050010, Республика Казахстан, г. Алматы, пр. Абая, 8

[2]Алматинский технологический университет, 050012, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Толе би, 100

*e-mail: tolkyn_07.1987@mail.ru

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ СУХОГО БИОПРЕПАРАТА ДЛЯ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ С СОХРАНЕНИЕМ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ ШТАММОВ

В статье представлена технология получения сухого пробиотического биопрепарата на основе штаммов Lactobacillus paracasei-010K и Torulopsis sphaerica-105k с сохранением их жизнеспособности и функциональной активности. В качестве основного объекта исследования использовали пробиотический штамм Lactobacillus paracasei-010K, выделенный из кумыса и обладающий выраженной антагонистической активностью. Для разработки технологии были сформированы два варианта композиций: монокультура и бактериально-дрожжевой консорциум; в качестве питательной среды применялось гидролизованное молоко. Лиофилизацию проводили по запрограммированному циклу, включающему стадии замораживания, сублимационной сушки и вторичного высушивания. Оценку жизнеспособности осуществляли методом посева с подсчётом колониеобразующих единиц.

После лиофилизации сохранность клеток Lactobacillus paracasei-010K составила 88.6 % в монокультуре и 91.9 % в составе бактериально-дрожжевого консорциума; для дрожжевого компонента T. Sphaerica-105k показатель достиг 91.3 %. Жизнеспособность штаммов сохранялась на уровне 88-92 %, а антагонистическая активность в отношении тест-культур Escherichia coli, Salmonella Dublin и Bacillus subtilis уменьшилась не более чем на 10-12 %, при этом консорциум демонстрировал несколько более высокие показатели по сравнению с монокультурой, что свидетельствует о синергетическом эффекте дрожжевого компонента.

Разработанная технология обеспечивает получение стабильных сухих биопрепаратов с высокой функциональной активностью и потенциалом к длительному хранению, что определяет перспективность их применения в пищевой промышленности.

***Ключевые слова:** пробиотики, лиофилизация, сухой биопрепарат, Lactobacillus paracasei, Torulopsis, жизнеспособность, функциональная активность, микроорганизмы.*

Ф.Ғ. Сағымбек[1], З.А. Кожахметова[1], Т.Б. Абдигалиева[2]*
[1]Қазақ ұлттық аграрлық зерттеу университеті,
050010, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Абай даңғ., 8
[2]Алматы технологиялық университеті,
050012, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Төле би к., 100
*e-mail: tolkyn_07.1987@mail.ru

ШТАММДАРДЫҢ ФУНКЦИОНАЛДЫҚ БЕЛСЕНДІЛІГІН САҚТАЙ ОТЫРЫП ТАМАҚ ӨНЕРКӘСІБІНЕ АРНАЛҒАН БИОПРЕПАРАТ АЛУ ТЕХНОЛОГИЯСЫН ӘЗІРЛЕУ

Мақалада Lactobacillus paracasei-010K және Torulopsis sphaerica-105K штамдары негізінде олардың тіршілік қабілеті мен функционалдық белсенділігін сақтай отырып құрғақ пробиотикалық биопрепарат алу технологиясы ұсынылған. Зерттеудің негізгі нысаны Lactobacillus paracasei-010K штаммы қымыздан бөлініп алынған және айқын антагонистік белсенділікке ие. Технологияны әзірлеу үшін екі композициялық нұсқа жасалды: монокультура және бактерия-саңырауқұлақ консорциумы және қоректік орта ретінде гидролизделген сүт қолданылды. Лиофилизация алдын ала бағдарламаланған жүйе бойынша жүргізілді, оған мұздату, сублимациялық кептіру және екінші (десорбциялық) кептіру кезеңдері кірді. Тіршілік қабілетін бағалау колония түзетін бірліктерді санау әдісімен жасалды.

Лиофилизациядан кейін Lactobacillus paracasei-010K клеткаларының сақталу деңгейі монокультурада 88.6 %, ал бактерия-саңырауқұлақ консорциумында 91.9 % болды; T. sphaerica-105K ашытқы компонентінде көрсеткіш 91.3 % жетті. Штаммдардың тіршілік қабілеті 88-92 % деңгейінде сақталды, ал Escherichia coli, Salmonella Dublin және Bacillus subtilis тест-дақылдарына қарсы антагонистік белсенділіктің төмендеуі 10-12 %-дан аспады. Сонымен бірге, консорциум монокультураға қарағанда сәл жоғары көрсеткіштер көрсетті, бұл ашытқылық компоненттің синергетикалық әсерін көрсетеді.

Дайындалған технология жоғары функционалдық белсенділікке ие тұрақты құрғақ биопрепараттарды алуға мүмкіндік береді және олардың ұзақ мерзімді сақтауға әлеуеті бар және бұл олардың азық-түлік өнеркәсібінде қолдану болашағын айқындайды.

***Түйін сөздер:** пробиотиктер, лиофилизация, құрғақ биопрепарат, Lactobacillus paracasei, Torulopsis, тіршілік қабілеті, функционалдық белсенділік, микроағзалар.*

Information about the authors

Fatima Sagymbek – PhD, Senior Lecturer of the Department of «Zooengineering and Biotechnology», Kazakh National Agrarian Research University, Republic of Kazakhstan, Almaty; e-mail: fakosya.ru@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9925-8527.

Zubaira Kozhakhmetova – Candidate of Biological Sciences, Senior Lecturer at the Department of «Microbiology, Virology and Immunology», Kazakh National Agrarian Research University, Republic of Kazakhstan, Almaty; e-mail: zubajra043@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-0103-0247.

Tolkyn Abdigaliyeva* – PhD, associate professor of the Department «Applied Biotechnology»; Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan, Republic of Kazakhstan, Almaty; e-mail: tolkyn_07.1987@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1404-8852.

Сведения об авторах

Фатима Сағымбек – PhD, старший преподаватель кафедры «Зооинженерия и биотехнология», Казахский национальный аграрный исследовательский университет, Республика Казахстан, г. Алматы; e-mail: fakosya.ru@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9925-8527.

Зубайра Қожахметова – кандидат биологических наук, старший преподаватель кафедры «Микробиология, вирусология и иммунология», Казахский национальный аграрный исследовательский университет, Республика Казахстан, г. Алматы; e-mail: zubajra043@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-0103-0247.

Толкын Абдигалиева* – PhD, ассоциированный профессор кафедры «Прикладная биотехнология»; Алматинский технологический университет, Алматы, Казахстан; e-mail: tolkyn_07.1987@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1404-8852.

Авторлар туралы мәліметтер

Фатима Сағымбек – PhD, Қазақ ұлттық аграрлық зерттеу университеті, «Зооинженерия және биотехнология» кафедрасының аға оқытушысы, Қазақстан Республикасы, Алматы қаласы; e-mail: fakosya.ru@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9925-8527.

Зубайра Қожахметова – б.ғ.к., Қазақ ұлттық аграрлық зерттеу университеті, «Микробиология, вирусология және иммунология» кафедрасының аға оқытушысы, Қазақстан Республикасы, Алматы қаласы; e-mail: zubajra043@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-0103-0247.

Толкын Абдигалиева* – PhD, Алматы технологиялық университеті, «Қолданбалы биотехнология» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Алматы, Қазақстан; e-mail: tolkyn_07.1987@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1404-8852.

Received 30.03.2026
Revised 13.05.2026
Accepted 11.06.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-38

ҒТАХР: 65.35.33

CC BY 4.0
Check for updates

Ж.С. Набиева, А.Н. Жаханова, А.А. Кулаипбекова*, Э.К. Асембаева, Ш.А. Абжанова
Алматы технологиялық университеті
050012, Қазақстан Республикасы, Алматы қаласы, Төле би көшесі, 100
*e-mail: ak04erke22@mail.ru

ДОЛАНА ЖАПЫРАҒЫ СЫҒЫНДЫСЫМЕН БАЙЫТЫЛҒАН ЖЕМІС-КӨКӨНІС ПАСТИЛАСЫНЫҢ САПАЛЫҚ КӨРСЕТКІШТЕРІН БАҒАЛАУ

Аңдатпа: *Бұл мақалада алма, асқабақ және қызылшадан жасалған пастилаларға долана жапырағының сығындысын (Crataegus almaatensis) қосудың өнім сапасына әсерін кешенді бағалауға талдау жүргізілді. Тәжірибе барысында сығындымен байытылған пастила үлгілерінің органолептикалық сипаттамалары, дәрумендер мөлшері, антиоксиданттық белсенділігі және микробиологиялық қауіпсіздігі анықталды.*

Дегустациялық талдау нәтижесі 3% долана жапырағының сығындысы бар пастилалар дәмі, жағымды хош иісі және сыртқы түрі бойынша ең жоғары бағаға ие болды. Сонымен қатар, бұл үлгілерде аскорбин қышқылының мөлшерінің жоғарылауы байқалды: алма-асқабақ негізіндегі пастиладағы С дәруменінің концентрациясы 38,06 мг/100 г-нан 62,97 мг/100 г-ға дейін, ал алма-қызылша негізіндегі пастилада 22,61 мг/100 г-нан 29,98 мг/100 г-ға дейін жоғарылады.

Микробиологиялық зерттеулер пастила үлгілерінің барлық дайын өнімдердің қолданыстағы санитарлық-гигиеналық стандарттарға сәйкес келетінін растады. Талдау жүргізілген үлгілерде

©Ж.С. Набиева, А.Н. Жаханова, А.А. Кулаипбекова, Э.К. Асембаева, Ш.А. Абжанова, 2026

ішек таяқшалары тобындағы бактериялар анықталмады, ал ашытқы мен зеңнің жалпы мөлшері рұқсат етілген деңгейден төмен болды.

Долана (Crataegus almaatensis) жапырағы сығындысын пастила құрамына енгізу өнімнің органолептикалық қасиеттерін жақсартып қана қоймай, оның С витаминімен қамтамасыз етілуін арттырады, антиоксиданттық белсенділігін күшейтеді және функционалдық құндылығын жоғарылатады. Микробиологиялық талдау нәтижелері барлық үлгілердің қауіпсіз екенін растады. Осыған байланысты долана жапырағы сығындысын пастила өндірісінде тиімді әрі қауіпсіз функционалдық ингредиент ретінде қолдануға болады деп қорытындылауға болады.

Түйін сөздер: *пастилалар, долана (Crataegus almaatensis), жапырақ сығындысы, С витамині, антиоксиданттық белсенділік, микробиологиялық қауіпсіздік, функционалды кондитерлік өнімдер.*

Кіріспе. Кондитер өнеркәсібіндегі қазіргі тенденция жоғары тағамдық және биологиялық құндылығы бар, сондай-ақ адам ағзасының физиологиялық процестеріне оң әсер ететін функционалды өнімдер өндірісін кеңейтуге бағытталған. Бұл бағыттың өзектілігі соңғы жылдары ерекше байқала бастады. Бұл дәстүрлі кондитерлік өнімдерді жүйелі және шамадан тыс тұтыну көмірсу алмасуының бұзылуына, салмақ қосуға, қан қысымының жоғарылауына және атеросклероз сияқты созылмалы аурулардың қаупінің артуына әкелетінін көрсететін көптеген ғылыми зерттеулерге байланысты. Осы жағдайды ескере отырып, тамақ өнеркәсібі компаниялары рецепттердегі тез сіңетін көмірсулардың үлесін азайтуға және оларды биологиялық құнды ингредиенттермен ауыстыруға тырысуда. Атап айтқанда, басым бағыттардың бірі – дәрумендермен, пребиотикалық және пробиотикалық компоненттермен, сондай-ақ әртүрлі биологиялық белсенді қосылыстармен байытылған кондитерлік өнімдердің жаңа түрлерін әзірлеу [1-3].

Функционалды кондитерлік өнімдер өндірісінде биотехнологиялық әдістерді қолдану ерекше маңызды. Бұл салада жеміс-жидек және көкөніс өнімдері, жармалар және пробиотикалық микроорганизмдер сияқты өсімдік тектес шикізат кеңінен қолданылады. Жемістер мен көкөністердің табиғи химиялық құрамына дәрумендер, минералдар, тағамдық талшықтар және антиоксиданттық қасиеттері бар қосылыстар кіреді, бұл оларды функционалды тағамдарды өндіру үшін перспективалы шикізат етеді [4].

Жеміс шикізаттарының ішінде алма жоғары биологиялық құндылығымен, қолжетімділігімен және жағымды органолептикалық қасиеттерімен ерекшеленеді. Алмада фенолдық қосылыстардың, сондай-ақ С және Е дәрумендерінің көп мөлшерінің болуы олардың антиоксиданттық белсенділігін арттырады. Ғылыми әдебиеттерде фенолдық заттардың концентрациясы мен антиоксиданттық белсенділік деңгейі арасындағы тікелей байланыс бірнеше рет дәлелденген [5-8].

Өсімдік тектес шикізат та тамақ өнеркәсібінде маңызды рөл атқарады. Мұндай мысалдардың бірі – қызылша (*Beta vulgaris L*.), ол минералдарға, дәрумендерге және фармакологиялық белсенділігі бар фитохимиялық заттарға бай көкөніс ретінде сипатталады. Зерттеулер қызылшаның әртүрлі анатомиялық бөліктерінің қабынуға, микробқа және зеңге қарсы әсерлері, сондай-ақ антидепрессант және диуретикалық қасиеттері бар екенін көрсетеді. Қызылша тамақ өнеркәсібінде табиғи бояғыштар – беталайндарды (Е162) өндіру үшін де кеңінен қолданылады [9-11].

Асқабақ (*Cucurbita spp*.) сонымен қатар жоғары тағамдық және биологиялық құндылығы бар өсімдік тектес шикізат болып табылады. Құрамындағы каротиноидтар, полифенолдар және флавоноидтар оның антиоксиданттық, диабетке, қатерлі ісікке қарсы және гепатопротекторлық қасиеттерін анықтайды. Осы себепті асқабақ функционалды және профилактикалық тағамдарды әзірлеу үшін шикізаттың перспективалы көзі болып саналады [12-14].

Пробиотикалық және пребиотикалық компоненттерді рецептураларға енгізу функционалды кондитерлік өнімдерді әзірлеудің ғылыми негізделген бағыттарының бірі болып табылады. Мұндай ингредиенттердің технологиялық процестер мен биологиялық әсерлерге әсерін кешенді бағалау, сондай-ақ олардың оңтайлы түрлері мен мөлшерін анықтау өнім сапасын жақсарту үшін маңызды. Пробиотикалық микроорганизмдер ішек микрофлорасының тепе-теңдігін сақтауға көмектеседі, ал пектин пребиотик ретінде ішек микробиотасының сапалық және сандық құрамын жақсартады [15-18].

Долананың тамақ өнеркәсібі мен фармакологияда ұзақ уақыт қолданылуына қарамастан, оның жапырақтары мен жас өркендерінің биохимиялық құрамы, сондай-ақ олардың биологиялық белсенді қосылыстардың көзі ретіндегі әлеуеті аз зерттелген. Сондықтан, долананың осы бөліктерін тамақ технологиясында қолдану мүмкіндігін ғылыми тұрғыдан зерттеу маңызды.

Зерттеу нысаны ретінде биологиялық белсенді қосылыстарға бай, бірақ жеткілікті зерттелмеген долана жапырақтары (*Crataegus spp.*) таңдалды. Қазақстанда кең таралған эндемикалық түр – Crataegus almaatensis жапырақтарында гиперозид, кверцитрин және афзелин сияқты флавоноидтардың жоғары концентрациясы анықталды, бұл олардың айқын антиоксиданттық және қабынуға қарсы қасиеттерін көрсетеді. Жалпы полифенолдар мөлшері бойынша долана жапырақтары өсімдіктің жемістері мен гүлдерінен жоғары белсенділікке ие.

Camellia sinensis және *Vitis vinifera* сияқты кеңінен зерттелген шикізат көздерімен салыстырғанда, долана жапырақтарының басты ерекшелігі – олардың агроөнеркәсіптік жанама өнім ретінде төмен құнды, бірақ полифенолдарға аса бай және жоғары антиоксиданттық белсенділік көрсетуі. Сонымен қатар, олар антимикробтық және кардиопротекторлық қасиеттерімен ерекшеленеді, бұл функционалды тағамдар құрамында тиімді қолдануға мүмкіндік береді.

Долана жапырағы сығындысы биоактивтілік пен қолжетімділік үйлесімі бойынша дәстүрлі өсімдік көздеріне балама ретінде ұсынылады [19, 20].

Осылайша, әдебиетке шолу нәтижелері жеміс-көкөніс негізіндегі пастилаларға долана жапырағының сығындысын қосу олардың антиоксидантты әлеуетін арттыра алатынын көрсетеді. Бұл тәсіл қоғамдық денсаулықты сақтауға және жақсартуға бағытталған функционалды кондитерлік өнімдерді әзірлеу үшін маңызды.

Бұл зерттеудің мақсаты – жеміс-көкөніс пастилаларына қосылған долана жапырағының сығындысының өнімнің сапасы мен қауіпсіздігіне әсерін бағалау.

Зерттеу нысаны мен әдістері. Зерттеу нысаны ретінде жеміс-көкөніс езбесі негізінде дайындалған пастила өнімдері алынды. Пастила өндіру үшін негізгі шикізат ретінде екі түрлі композиция таңдалды: алма-асқабақ және алма-қызылша езбесінің қоспалары. Мұндай комбинацияларды қолдану өнімнің тағамдық және функционалдық қасиеттерін арттырумен қатар, органолептикалық сипаттамаларының үйлесімді болуын қамтамасыз етуге бағытталды. Өнімнің дәмдік қасиеттерін қалыптастыру және құрылымдық тұрақтылығын қамтамасыз ету мақсатында рецептуралық құрамға альбумин, лимон қышқылы, қант және пектин енгізілді. Пастиланың функционалдық қасиетін арттыру мақсатында зертханалық жағдайда дайындалған үлгілерге 1% пробиотик, сондай-ақ *Crataegus almaatensis* түріне жататын долана жапырағынан алынған сығынды 1%, 3% және 5% концентрацияларда қосылды. Дегустациялық бағалау нәтижесі бойынша зерттеу жүргізу үшін 3% долана жапырағының сығындысы қосылған үлгілер таңдалды.

Crataegus almaatensis жапырақтарынан сығындыны бөліп алу үшін ультрадыбыстық экстракция әдісі қолданылды (УД экстрактор маркасы Сапфир ТТЦ (РФ, 2020).

Пробиотик ретінде «Genesis» компаниясы өндіретін ацидофильді йогурттарға арналған ұйытқы пайдаланылды, оның құрамына *Streptococcus thermophilus*, *Lactobacillus bulgaricus* және *Lactobacillus acidophilus* штаммдары кіреді. Аталған микроорганизмдердің ішінде *Streptococcus thermophilus* пен *Lactobacillus acidophilus* штаммдарының болуы дайын пастила өнімдеріне пробиотикалық қасиет беруге мүмкіндік береді.

Пастила алу үшін қажетті шикізат алдымен тазаланып, жуылып, ұсақталады. Кейін 100 °С температурада 15-30 минут пісіріледі. Піскен қоспа салқындатылып, блендерде біркелкі езбе күйіне дейін ұсақталады. Езбе 25-30°С-қа дейін салқындатылған соң, оған 3% долана сығындысы және 1% пробиотик қосылады. Пробиотикалық ұйытқы пастила езбесі 25-30 °С температураға дейін салқындатылғаннан кейін енгізіледі, себебі бұл температура пробиотикалық микроорганизмдердің өміршеңдігін сақтау мақсатында таңдалды. Дайын қоспа қалыптарға 5-7 мм қалыңдықта құйылып, 35°С температурада 12-16 сағат кептіріледі.

Алдын ала жүргізілген органолептикалық бағалау нәтижелерін ескере отырып, әрі қарай талдаулар жүргізу үшін төрт тәжірибелік үлгі іріктеліп алынды:

№ 1-үлгі – алма және асқабақ езбесі, 1% пробиотик және дәмдеуіштер;

№ 2-үлгі – алма және асқабақ езбесі, 1% пробиотик, 3% долана жапырағы сығындысы және дәмдеуіштер;

№ 3-үлгі – алма және қызылша езбесі, 1% пробиотик және дәмдеуіштер;

№ 4-үлгі – алма және қызылша езбесі, 1% пробиотик, 3% долана жапырағы сығындысы және дәмдеуіштер.

Дайын пастила үлгілерінің сапалық көрсеткіштерін кешенді бағалау мақсатында олардың антиоксиданттық белсенділігі және микробиологиялық қауіпсіздігі зерттелді. Пастила құрамындағы С витаминінің массалық үлесі титриметриялық әдіс негізінде МЕМСТ 24556–89 стандартына сәйкес анықталды. Өнімдердің құрамындағы суда еритін антиоксиданттар мөлшері «Цвет Яуза А01-АА» маркалы анализатор көмегімен амперометриялық әдіспен анықталады.

Пастила үлгілерінің микробиологиялық қауіпсіздігі бірқатар көрсеткіштер бойынша бағаланды. Мезофильді аэробты және факультативті анаэробты микроорганизмдердің мөлшері қатты қоректік агарда 30±1°С температурада өсіру арқылы МЕМСТ 10444.15-94 әдістемесіне сәйкес анықталды. Ішек таяқшалары тобы бактерияларының болуы МЕМСТ 31747-2012 стандарты бойынша зерттелді, ал ашытқылар мен зең саңырауқұлақтарының жалпы саны МЕМСТ 10444.12-2013 талаптарына сәйкес бағаланды.

Барлық эксперименттік және аналитикалық зертханалық зерттеулер Алматы технологиялық университетінің Тамақ қауіпсіздігін ғылыми-зерттеу институтының зертханалық базасында жүргізілді.

Кондитерлік өнімдер, әдетте, айқын тәтті дәмімен, жағымды хош иісімен және тұтынушы үшін тартымды сыртқы пішінімен ерекшеленеді. Аталған қасиеттер өнімді таңдауда маңызды рөл атқарып, тұтынушылардың қызығушылығын арттырады. Осы зерттеу барысында дайындалған пастила үлгілерінің сыртқы көрінісі мен визуалды сипаттамалары 1-суретте келтірілген.



А Ә

Сурет 1 – Пастила үлгілері

А – Алма-асқабақ пастила үлгілері; Ә – Алма-қызылша пастила үлгілері

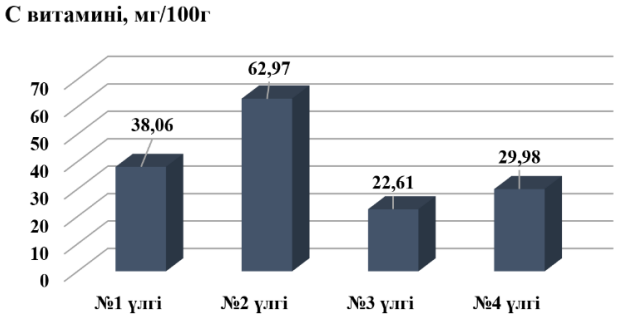
Жүргізілген органолептикалық талдау нәтижелерін салыстырмалы бағалау пастила құрамына долана жапырағы сығындысы 3 % мөлшерде қосылған үлгілердің дәмдік үйлесімділігі, хош иісінің айқындығы және құрылымдық-текстуралық қасиеттері бойынша басқа үлгілерден басым екенін көрсетті. Осыған байланысты зерттеудің кейінгі кезеңдерінде талдаулар дәл осы концентрациядағы долана жапырағы сығындысы қосылған пастила үлгілерінде жүргізілді.

Ғылыми әдебиеттерде функционалдық бағыттағы тағам өнімдерінің басым бөлігі витаминдер мен табиғи антиоксиданттарға бай болатыны кеңінен сипатталған [21]. Табиғи антиоксиданттар өсімдік текті шикізаттардың, соның ішінде жемістердің, көкөністердің және әртүрлі өсімдік сығындыларының құрамында кездесетін биологиялық белсенді қосылыстар тобына жатады [22, 23]. Соңғы жылдары антиоксиданттық заттардың физиологиялық әсерін зерттеуге, сондай-ақ оларды тағам өнімдерінің құрамында қолдану мүмкіндіктерін бағалауға арналған ғылыми зерттеулер санының айтарлықтай артқаны байқалады [24-27].

Антиоксиданттық жүйенің маңызды компоненттерінің бірі болып табылатын аскорбин қышқылы ағзадағы тотығу-тотықсыздану үдерістерінің тепе-теңдігін сақтауға қатысады. Сонымен қатар, С витаминін жоғары мөлшерде тұтынудың айқын теріс әсерлері туралы нақты ғылыми дәлелдердің болмауы оны еркін радикалдардың түзілуі күшейген жағдайларда және

ағзаның эндогенді антиоксиданттық қорғаныс жүйесі әлсіреген кезде қолдануға мүмкіндік беретін тиімді антиоксиданттық препарат ретінде қарастыруға негіз береді [28].

Осы зерттеу барысында долана жапырағы сығындысының пастила өнімдерінің құрамындағы аскорбин қышқылының мөлшеріне тигізетін әсері бағаланды. Зерттелген пастила үлгілеріндегі С витаминінің массалық үлесінің өзгерісі 2-суретте көрсетілген, бұл долана жапырағы сығындысын енгізудің өнімнің витаминдік құндылығына ықпалын салыстырмалы түрде талдауға мүмкіндік береді.

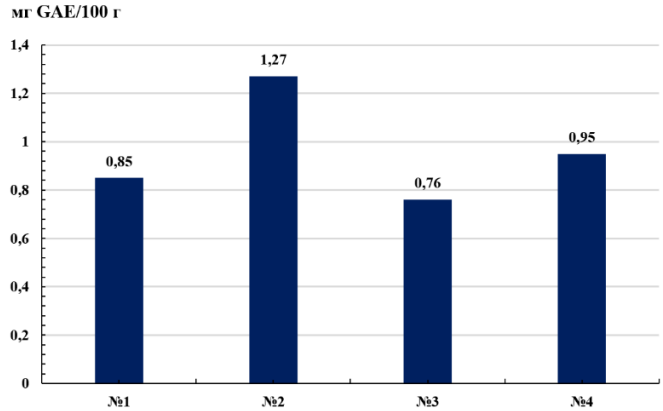


Сурет 2 – Пастила үлгілерінің құрамындағы С витамині, мг/100г

Зерттеу нәтижелері пастила үлгілеріндегі С витаминінің мөлшері рецептуралық құрамға және *Crataegus almaatensis* жапырағы сығындысының қосылуына тікелей тәуелді екенін көрсетті. Алма-асқабақ негізіндегі бақылау үлгісінде (№ 1) аскорбин қышқылы 38,06 мг/100 г құраса, 3% долана жапырағы сығындысы енгізілген № 2 үлгіде бұл көрсеткіш 62,97 мг/100 г-ға дейін артып, шамамен 65% өсті. Осындай нәтиже алма-қызылша пастиласында да анықталды: сығынды қосылмаған № 3 үлгіде С витаминінің мөлшері 22,61 мг/100 г болса, № 4 үлгіде ол 29,98 мг/100 г-ға жетіп, 32% артты. Алынған деректер долана жапырағы сығындысының пастиланың витаминдік құндылығын тиімді арттыратынын дәлелдейді.

С витамині мөлшерінің жоғарылауы сығынды құрамындағы табиғи аскорбин қышқылының болуымен, сондай-ақ флавоноидтар мен фенолдық қосылыстардың оның тотығуын тежеу қабілетімен байланысты. Сонымен қатар, С витамині жоғары үлгілерде антиоксиданттық белсенділіктің де артуы байқалды, бұл аскорбин қышқылы мен фенолдық қосылыстардың синергетикалық әсері өнімнің жалпы антиоксиданттық әлеуетін күшейтетінін көрсетеді (3-сурет).

Жұмыстың барысында пастила үлгілерінің құрамындағы суда еритін антиосидатттардың мөлшеріне талдау жүргізілді, нәтижесі 3-суретте келтірілген.



Сурет 3 – Пастила үлгілерінің суда еритін антиоксиданттар мөлшері, мг GAE/100 г

Долана (*Crataegus almaatensis*) жапырағының сығындысы бар пастила үлгілерінде (№ 2 және № 4) антиоксиданттар мөлшері бақылау үлгілеріне қарағанда айтарлықтай жоғары болды. Бақылау пастилаларында бұл мән алма-асқабақ негізі үшін 0,85 мг GAE/100 г және алма-қызылша пастиласы үшін 0,76 мг GAE/100 г мөлшерінде болды, бұл қызылшадағы антиоксиданттық қосылыстардың салыстырмалы түрде төмен мөлшерімен түсіндіріледі.

3% долана жапырағының сығындысын қосу суда еритін антиоксиданттар мөлшерін айтарлықтай жоғарылатты, алма-асқабақ пастиласында (№ 2) ол 1,27 мг GAE/100 г жетті, бұл бақылау үлгісінен шамамен 50%-ға жоғары, ал алма-қызылша пастиласында №4 үлгіде ол 0,95 мг GAE/100 г болды.

Долана жапырағы сығындысының пастиланың құрамындағы суда еритін антиоксидант мөлшерін жоғарылатуы оның биологиялық белсенді қосылыстарға бай болуына байланысты. Атап айтқанда, долана жапырақтары флавоноидтарға, проантоцианидиндерге және фенол қышқылдарына бай, олар өнімнің жалпы антиоксиданттық әлеуетіне тікелей ықпал етеді. Сонымен қатар, ашыту процесінде қолданылатын сүт қышқылы бактериялары фенолдық қосылыстардың дегликозилденуіне және биотрансформациясына ықпал етеді, жоғары антиоксиданттық белсенділігі бар агликондардың түзілуін жеңілдетеді. Сонымен қатар, ашыту кезінде түзілетін органикалық қышқылдар мен төмен молекулалық салмақты пептидтер бос радикалдарды бейтараптандыру қабілетін арттыра алады [20, 29-32]. Осылайша, өсімдік сығындысы мен сүт қышқылы бактерияларының бірлескен әсері пастила үлгілерінде антиоксиданттық белсенділіктің синергетикалық жоғарылауына әкелді. Атап айтқанда, алма-асқабақ қоспасына 3% долана жапырағы сығындысын қосу өнімнің антиоксиданттық белсенділігін айтарлықтай арттырды.

Кондитерлік өнімдердің сапасы мен қауіпсіздігі ең алдымен олардың микробиологиялық қасиеттерімен бағаланады. Қазіргі уақытта бұл бағалау санитарлық-индикаторлық микроорганизмдердің (мезофильді аэробты және факультативті анаэробты микроорганизмдер саны – МАжФАнМС), *Escherichia coli* бактерияларының (ІТТБ) және шартты патогенді микроорганизмдердің (ашытқы және зең) санын анықтауға негізделген. Бұл көрсеткіштер өнімнің санитарлық-гигиеналық жағдайын, оны сақтау тұрақтылығын және тұтыну қауіпсіздігін кешенді бағалауға мүмкіндік береді. Пастила үлгілерін микробиологиялық талдау нәтижелері 1-кестеде келтірілген.

Кесте 1 – Пастила үлгілерінің микробиологиялық көрсеткіштері

Көрсеткіштер	НҚ бойынша рұқсат етілген шек	Пастила үлгілері			
		№ 1 үлгі	№ 2 үлгі	№ 3 үлгі	№ 4 үлгі
МАФАнММ, КТБ/см^3 (г), артық емес	$5*10^4$	$1,6*10^3$	$1,8*10^3$	$2,4*10^3$	$2,6*10^3$
ІТТБ (колиформалар), (г, см^3).	0,1	табылмады		табылмады	
Ашытқы мен зеңдер, КТБ/см^3 (г), артық емес	500	$1*10^1$-ден аз	$1*10^1$-ден аз	$1*10^1$-ден аз	$1*10^1$-ден аз

Алынған деректер бойынша ішек таяқшалары тобына жататын бактериялар анықталған жоқ. Ашытқылар мен зеңдердің саны төмен деңгейде болып, шамамен $1×10^1$ КТБ/см^3 құрады. Мезофильді аэробты және факультативті анаэробты микроорганизмдердің саны $1,6×10^3$-$2,6×10^3$ КТБ/см^3 аралығында болып, рұқсат етілген нормативтік шектерден аспады. Бұл нәтижелер зерттелген пастила үлгілерінің микробиологиялық қауіпсіздік талаптарына толық сәйкес келетінін және тұтынуға жарамды екенін көрсетеді.

Қорытындылай келе, долана (*Crataegus almaatensis*) жапырағы сығындысын пастила құрамына енгізу өнімнің органолептикалық қасиеттерін жақсартып қана қоймай, оның С витаминімен қамтамасыз етілуін арттырады, антиоксиданттық белсенділігін күшейтеді және функционалдық құндылығын жоғарылатады. Микробиологиялық талдау нәтижелері барлық үлгілердің қауіпсіз екенін растады. Осыған байланысты долана жапырағы сығындысын пастила өндірісінде тиімді әрі қауіпсіз функционалдық ингредиент ретінде қолдануға болады.

Әдебиеттер

1. Технология функциональных продуктов питания: учебное пособие для СПО / под общ.ред. Л. В. Донченко. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2018. – 176 с.

2. Enhancing nutritional value and health benefits of gluten-free confectionery products: innovative pastilles and marshmallows / Y. Pronina et al // Frontiers in Nutrition. – 2024. – Vol. 10. – P. 1321004. https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1321004.

3. Development and study of the functional properties of marshmallow enriched with bee (Apis mellifera) honey and encapsulated probiotics (Lactobacillus rhamnosus) / S.I. Colmenares-Cuevas et al // Frontiers in Nutrition. – 2024. – Vol. 11. – P. 1353530. https://doi.org/10.3389/fnut.2024.1353530.
4. Septembre-Malaterre A. Fruits and vegetables, as a source of nutritional compounds and phytochemicals: Changes in bioactive compounds during lactic fermentation / A. Septembre-Malaterre, F. Remize, P. Poucheret // Food research international. – 2018. – Vol. 104. – P. 86-99. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.09.031.
5. The amount of polyphenols and antioxidant activity of fruits of different varieties of apple tree--Malus domectica L / N. Gogia et al // Georgian Medical News. – 2015. – №. 242. – P. 84-88. PMID: 26042453.
6. Apples and apple by-products: antioxidant properties and food applications / U. Asma et al // Antioxidants. – 2023. – Vol 12. – №. 7. – P. 1456. https://doi.org/10.3390/antiox12071456.
7. A comprehensive analysis of the composition, health benefits, and safety of apple pomace / R.C. Skinner et al // Nutrition reviews. – 2018. – Vol. 76. – №. 12. – P. 893-909. https://doi.org/10.1093/nutrit/nuy033.
8. Malus domestica: A review on nutritional features, chemical composition, traditional and medicinal value / J. Patocka et al // Plants. – 2020. – Vol. 9. – №. 11. – P. 1408. https://doi.org/10.3390/plants9111408.
9. Evaluation of some chemical constituents, antioxidant, antibacterial and anticancer activities of Beta vulgaris L. root / H.S. El-Beltagi et al // Fresenius Environmental Bulletin. – 2018. – Vol. 27. – №. 9. – P. 6369-6378.
10. The potential benefits of red beetroot supplementation in health and disease / T. Clifford et al // Nutrients. – 2015. – Vol. 7. – №. 4. – P. 2801-2822. https://doi.org/10.3390/nu7042801.
11. Studies on evaluation of physical and chemical composition of beetroot (Beta vulgaris L.) / R.G. Kale et al // International journal of chemical studies. – 2018. – Vol. 6. – №. 2. – P. 2977-2979.
12. Functional and nutraceutical properties of pumpkin–a review / S. Kaur et al // Nutrition & Food Science. – 2020. – № 50(2) – P. 384-401. https://doi.org/10.1108/NFS-05-2019-0143.
13. Ahmad G. Pumpkin: horticultural importance and its roles in various forms; a review / G. Ahmad, A.A. Khan // Int. J. Hortic. Agric. – 2019. – Vol. 4. – №. 1. – P. 1-6. https://doi.org/10.15226/2572-3154/4/1/00124.
14. Ceclu L. Pumpkin-health benefits / L. Ceclu, D.G. Mocanu, O.V. Nistor // Journal of agroalimentary processes and technologies. – 2020. – Vol. 26. – № 3. – P. 241-246.
15. Functional and nutraceutical properties of pumpkin–a review / S. Kaur et al // Nutrition & Food Science. – 2020. – Т. 50. – № 2. – P. 384-401. https://doi.org/10.1108/NFS-05-2019-0143.
16. Корниенко Е.А. Пробиотики, постбиотики и парапробиотики / Е.А. Корниенко // Экспериментальная и клиническая гастроэнтерология. – 2022. – № 9(205). – С. 240-250. https://doi.org/10.31146/1682-8658-ecg-205-9-240-250.
17. Артюхова С.И. Биотехнология микроорганизмов: пробиотики, пребиотики, метабиотики: учеб. пособие / С.И. Артюхова, О.В. Козлова. – Кемерово: КемГУ, 2019. – 224 с.
18. Ершова А.Р. Пастильное изделие функционального назначения с добавлением синбиотического комплекса / А.Р. Ершова // Многополярный мир в фокусе новой действительности. – 2023. – С. 9-12.
19. Chemistry and pharmacology of the Kazakh Crataegus almaatensis pojark: An Asian herbal medicine / S.S. Soares et al // Antioxidants. – 2019. – Vol. 8, № 8. – P. 300. https://doi.org/10.3390/antiox8080300.
20. Bioactive Compounds in Hawthorn Leaves (Crataegus spp.) – Extraction, Functionality, and Future Perspectives: From Waste to Wealth / A. Kulaipbekova et al // Agriculture. – 2026. – № 16(3). – P. 363. https://doi.org/10.3390/agriculture16030363.
21. Malus domestica: A review on nutritional features, chemical composition, traditional and medicinal value / J. Patocka et al // Plants. – 2020. – № 9(11). – P. 1408. https://doi.org/10.3390/plants9111408.
22. In vitro antioxidant potential of Abrus precatorius L. and Asystasia gangetica (L.) T. Anderson / N. Janakiraman et al // Letters in Applied NanoBioScience. – 2021. – Vol. 11, № 4. – P. 4071-4079. https://doi.org/10.33263/ LIANBS114.40714079.

23. How natural dietary antioxidants in fruits, vegetables and legumes promote vascular health / S. Wang et al // Food Research International. – 2011. – Vol. 44, № 1. – P. 14-22. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.09.028.
24. Arias A. Exploring the potential of antioxidants from fruits and vegetables and strategies for their recovery / A. Arias, G. Feijoo, M.T. Moreira // Innov. Food Sci. Emerg. Technol. – 2022. – Vol. 77, № 10.1016. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.102974.
25. The effects of polyphenols and other bioactives on human health / C.G. Fraga et al // Food & function. – 2019. – Vol. 10, № 2. – P. 514-528. https://doi.org/10.1039/C8FO01997E.
26. Berries extracts as natural antioxidants in meat products: A review / J.M. Lorenzo et al // Food Research International. – 2018. – Vol. 106. – P. 1095-1104. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.12.005.
27. Apple pomace as a functional and healthy ingredient in food products: A review / F. Lyu et al // Processes. – 2020. – Vol. 8, № 3. – P. 319. https://doi.org/10.3390/pr8030319.
28. Тимирханова Г.А. Витамин С: классические представления и новые факты о механизмах биологического воздействия / Г.А. Тимирханова, И.Г. Абдуллина, Г.М. Кулагина // Вятский медицинский вестник. – 2007. – № 4. – С. 158-161.
29. Fermentation affects the antioxidant activity of plant-based food material through the release and production of bioactive components / Y.S. Zhao et al // Antioxidants. – 2021. – Vol. 10, № 12. – P. 2004. https://doi.org/10.3390/antiox10122004.
30. Effect of fermentation on the antioxidant activity in plant-based foods / S.J. Hur et al // Food chemistry. – 2014. – Vol. 160. – P. 346-356. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.03.112.
31. Effects of different lactic acid bacteria on the physicochemical properties, functional characteristics and metabolic characteristics of fermented hawthorn juice / M. Zhao et al // Food Chemistry. – 2025. – Vol. 470. – P. 142672. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.142672.
32. Lactic acid fermentation as a tool to enhance the antioxidant properties of Myrtus communis berries / J.A. Curiel et al // Microbial Cell Factories. – 2015. – Vol. 14, № 1. – P. 67. https://doi.org/10.1186/s12934-015-0250-4.

References

1. Tekhnologiya funktsional'nykh produktov pitaniya: uchebnoe posobie dlya SPO / pod obshch.red. L. V. Donchenko. – 2-e izd., ispr. i dop. – M.: Izdatel'stvo Yurait, 2018. – 176 s. (In Russian).
2. Enhancing nutritional value and health benefits of gluten-free confectionery products: innovative pastilles and marshmallows / Y. Pronina et al // Frontiers in Nutrition. – 2024. – Vol. 10. – P. 1321004. https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1321004. (In English).
3. Development and study of the functional properties of marshmallow enriched with bee (Apis mellifera) honey and encapsulated probiotics (Lactobacillus rhamnosus) / S.I. Colmenares-Cuevas et al // Frontiers in Nutrition. – 2024. – Vol. 11. – P. 1353530. https://doi.org/10.3389/fnut.2024.1353530. (In English).
4. Septembre-Malaterre A. Fruits and vegetables, as a source of nutritional compounds and phytochemicals: Changes in bioactive compounds during lactic fermentation / A. Septembre-Malaterre, F. Remize, P. Poucheret // Food research international. – 2018. – Vol. 104. – P. 86-99. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.09.031. (In English).
5. The amount of polyphenols and antioxidant activity of fruits of different varieties of apple tree--Malus domectica L / N. Gogia et al // Georgian Medical News. – 2015. – №. 242. – P. 84-88. PMID: 26042453. (In English).
6. Apples and apple by-products: antioxidant properties and food applications / U. Asma et al // Antioxidants. – 2023. – Vol 12. – №. 7. – P. 1456. https://doi.org/10.3390/antiox12071456. (In English).
7. A comprehensive analysis of the composition, health benefits, and safety of apple pomace / R.C. Skinner et al // Nutrition reviews. – 2018. – Vol. 76. – №. 12. – P. 893-909. https://doi.org/10.1093/nutrit/nuy033. (In English).
8. Malus domestica: A review on nutritional features, chemical composition, traditional and medicinal value / J. Patocka et al // Plants. – 2020. – Vol. 9. – №. 11. – P. 1408. https://doi.org/10.3390/plants9111408. (In English).

9. Evaluation of some chemical constituents, antioxidant, antibacterial and anticancer activities of Beta vulgaris L. root / H.S. El-Beltagi et al // Fresenius Environmental Bulletin. – 2018. – Vol. 27. – №. 9. – P. 6369-6378. (In English).
10. The potential benefits of red beetroot supplementation in health and disease / T. Clifford et al // Nutrients. – 2015. – Vol. 7. – №. 4. – P. 2801-2822. https://doi.org/10.3390/nu7042801. (In English).
11. Studies on evaluation of physical and chemical composition of beetroot (Beta vulgaris L.) / R.G. Kale et al // International journal of chemical studies. – 2018. – Vol. 6. – №. 2. – P. 2977-2979. (In English).
12. Functional and nutraceutical properties of pumpkin–a review / S. Kaur et al // Nutrition & Food Science. – 2020. – № 50(2) – P. 384-401. https://doi.org/10.1108/NFS-05-2019-0143. (In English).
13. Ahmad G. Pumpkin: horticultural importance and its roles in various forms; a review / G. Ahmad, A.A. Khan // Int. J. Hortic. Agric. – 2019. – Vol. 4. – №. 1. – P. 1-6. https://doi.org/10.15226/2572-3154/4/1/00124. (In English).
14. Ceclu L. Pumpkin–health benefits / L. Ceclu, D.G. Mocanu, O.V. Nistor // Journal of agroalimentary processes and technologies. – 2020. – Vol. 26. – № 3. – P. 241-246. (In English).
15. Functional and nutraceutical properties of pumpkin–a review / S. Kaur et al // Nutrition & Food Science. – 2020. – T. 50. – № 2. – P. 384-401. https://doi.org/10.1108/NFS-05-2019-0143. (In English).
16. Kornienko E.A. Probiotiki, postbiotiki i paraprobiotiki / E.A. Kornienko // Ehksperimental'naya i klinicheskaya gastroehnterologiya. – 2022. – № 9(205). – S. 240-250. https://doi.org/10.31146/1682-8658-ecg-205-9-240-250. (In Russian).
17. Artyukhova S.I. Biotekhnologiya mikroorganizmov: probiotiki, prebiotiki, metabiotiki: ucheb. posobie / S.I. Artyukhova, O.V. Kozlova. – Kemerovo: KemGU, 2019. – 224 s. (In Russian).
18. Ershova A.R. Pastil'noe izdelie funktsional'nogo naznacheniya s dobavleniem sinbioticheskogo kompleksa / A.R. Ershova // Mnogopolyarnyi mir v fokuse novoi deistvitel'nosti. – 2023. – S. 9-12. (In Russian).
19. Chemistry and pharmacology of the Kazakh Crataegus almaatensis pojark: An Asian herbal medicine / S.S. Soares et al // Antioxidants. – 2019. – Vol. 8, № 8. – P. 300. https://doi.org/10.3390/antiox8080300. (In English).
20. Bioactive Compounds in Hawthorn Leaves (Crataegus spp.) – Extraction, Functionality, and Future Perspectives: From Waste to Wealth / A. Kulaipbekova et al // Agriculture. – 2026. – № 16(3). – R. 363. https://doi.org/10.3390/agriculture16030363. (In English).
21. Malus domestica: A review on nutritional features, chemical composition, traditional and medicinal value / J. Patocka et al // Plants. – 2020. – № 9(11). – R. 1408. https://doi.org/10.3390/plants9111408. (In English).
22. In vitro antioxidant potential of Abrus precatorius L. and Asystasia gangetica (L.) T. Anderson / N. Janakiraman et al // Letters in Applied NanoBioScience. – 2021. – Vol. 11, № 4. – P. 4071-4079. https://doi.org/10.33263/ LIANBS114.40714079. (In English).
23. How natural dietary antioxidants in fruits, vegetables and legumes promote vascular health / S. Wang et al // Food Research International. – 2011. – Vol. 44, № 1. – P. 14-22. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.09.028. (In English).
24. Arias A. Exploring the potential of antioxidants from fruits and vegetables and strategies for their recovery / A. Arias, G. Feijoo, M.T. Moreira // Innov. Food Sci. Emerg. Technol. – 2022. – Vol. 77, № 10.1016. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.102974. (In English).
25. The effects of polyphenols and other bioactives on human health / C.G. Fraga et al // Food & function. – 2019. – Vol. 10, № 2. – P. 514-528. https://doi.org/10.1039/C8FO01997E. (In English).
26. Berries extracts as natural antioxidants in meat products: A review / J.M. Lorenzo et al // Food Research International. – 2018. – Vol. 106. – P. 1095-1104. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.12.005. (In English).
27. Apple pomace as a functional and healthy ingredient in food products: A review / F. Lyu et al // Processes. – 2020. – Vol. 8, № 3. – P. 319. https://doi.org/10.3390/pr8030319. (In English).
28. Timirkhanova G.A. Vitamin S: klassicheskie predstavleniya i novye fakty o mekhanizmakh biologicheskogo vozdeistviya / G.A. Timirkhanova, I.G. Abdullina, G.M. Kulagina // Vyatskii meditsinskii vestnik. – 2007. – № 4. – S. 158-161. (In Russian).

29. Fermentation affects the antioxidant activity of plant-based food material through the release and production of bioactive components / Y.S. Zhao et al // Antioxidants. – 2021. – Vol. 10, № 12. – P. 2004. https://doi.org/10.3390/antiox10122004. (In English).
30. Effect of fermentation on the antioxidant activity in plant-based foods / S.J. Hur et al // Food chemistry. – 2014. – Vol. 160. – P. 346-356. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.03.112. (In English).
31. Effects of different lactic acid bacteria on the physicochemical properties, functional characteristics and metabolic characteristics of fermented hawthorn juice / M. Zhao et al // Food Chemistry. – 2025. – Vol. 470. – P. 142672. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.142672. (In English).
32. Lactic acid fermentation as a tool to enhance the antioxidant properties of Myrtus communis berries / J.A. Curiel et al // Microbial Cell Factories. – 2015. – Vol. 14, № 1. – P. 67. https://doi.org/10.1186/s12934-015-0250-4. (In English).

Қаржыландыру. *Жұмыс ИРН AP23489874 «Кондитерлік өнімдерді байыту үшін жергілікті өсімдік шикізатын өңдеу негізінде табиғи сығындылар алудың тиімді технологиясын әзірлеу» жобасы бойынша Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі Ғылым комитетінің гранттық қаржыландыруы аясында жүзеге асырылды.*

Ж.С. Набиева, А.Н. Жаханова, А.А. Кулаипбекова*, Э.К. Асембаева, Ш.А. Абжанова
Алматинский технологический университет
050012, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Толе би, 100
*e-mail: ak04erke22@mail.ru

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЭКСТРАКТА ЛИСТЬЕВ БОЯРЫШНИКА НА ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ПАСТИЛЫ

В данной статье анализируется комплексная оценка влияния добавления экстракта листьев боярышника (Crataegus almaatensis) в пастилки из яблока, тыквы и свеклы на качество продукта. В ходе эксперимента были определены органолептические характеристики, содержание витаминов, антиоксидантная активность и микробиологическая безопасность образцов пастилок, обогащенных экстрактом.

Результаты дегустационного анализа показали, что пастилки с 3% экстракта листьев боярышника получили наивысшие оценки за вкус, приятный аромат и внешний вид. Кроме того, в этих образцах наблюдалось увеличение содержания аскорбиновой кислоты: концентрация витамина С в пастилке на основе яблока и тыквы увеличилась с 38,06 мг/100 г до 62,97 мг/100 г, а в пастилке на основе яблока и свеклы – с 22,61 мг/100 г до 29,98 мг/100 г.

Микробиологические исследования образцов пастилок подтвердили соответствие всех готовых изделий действующим санитарно-гигиеническим стандартам. В проанализированных образцах не было обнаружено бактерий Escherichia coli, а общее количество дрожжей и плесени было ниже допустимого уровня.

Включение экстракта листьев боярышника (Crataegus almaatensis) в состав пастилок не только улучшает органолептические свойства продукта, но и повышает содержание витамина С, усиливает антиоксидантную активность и увеличивает его функциональную ценность. Результаты микробиологического анализа подтвердили безопасность всех образцов. В связи с этим можно сделать вывод, что экстракт листьев боярышника может быть использован в качестве эффективного и безопасного функционального ингредиента при производстве пастилок.

Ключевые слова: *пастила, экстракт листьев боярышника (Crataegus almaatensis), витамин С, антиоксидантная активность, микробиологическая безопасность, функциональное кондитерское изделие.*

Zh.S. Nabiyeva, A.N. Zhakhanova, A.A.Kulaipbekova*, E.K. Assembayeva, Sh.A. Abzhanova
Almaty Technological University
050012, Republic of Kazakhstan, Almaty, Tole Bi street 100
*e-mail: ak04erke22@mail.ru

EVALUATION OF THE EFFECT OF HAWTHORN LEAF EXTRACT ON THE QUALITY INDICATORS OF PASTILA

This article analyzes a comprehensive assessment of the impact of adding hawthorn leaf extract (Crataegus almaatensis) to apple, pumpkin, and beetroot pastilles on product quality. The experiment determined the organoleptic characteristics, vitamin content, antioxidant activity, and microbiological safety of the extract-enriched pastille samples.

Taste analysis results showed that the pastilles with 3% hawthorn leaf extract received the highest ratings for taste, pleasant aroma, and appearance. Furthermore, these samples showed an increase in ascorbic acid content: the vitamin C concentration in the apple-pumpkin pastille increased from 38.06 mg/100 g to 62.97 mg/100 g, and in the apple-beetroot pastille, from 22.61 mg/100 g to 29.98 mg/100 g.

Microbiological testing of the pastille samples confirmed that all finished products complied with current sanitary and hygienic standards. No Escherichia coli bacteria were detected in the samples analyzed, and the total yeast and mold counts were below acceptable levels.

The incorporation of hawthorn leaf extract (Crataegus almaatensis) into fruit pastille not only improved the organoleptic characteristics of the product, but also increased its vitamin C content, enhanced antioxidant activity, and improved its functional value. Microbiological analysis confirmed the safety of all samples. Therefore, hawthorn leaf extract can be considered an effective and safe functional ingredient for use in fruit pastille production.

Key words: *lozenge, hawthorn leaf extract (Crataegus almaatensis), vitamin C, antioxidant activity, microbiological safety, functional confectionery.*

Авторлар туралы мәліметтер

Жанар Серикболовна Набиева – PhD, қауымд. профессор, Алматы технологиялық университеті, Тамақ қауіпсіздігін ғылыми-зерттеу институты, Алматы, Қазақстан; e-mail: atu_nabiyeva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7258-746X.

Айнұр Нұрлыханқызы Жаханова – 2 курс магистранты, Алматы технологиялық университеті, «Қолданбалы биотехнология» кафедрасы, Алматы, Қазақстан; e-mail: z.ainur00001@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/ 0009-0007-2902-9367.

Акерке Аскаркызы Кулаипбекова* – 3 курс докторанты, Алматы технологиялық университеті, «Қолданбалы биотехнология» кафедрасы, Алматы, Қазақстан; e-mail: ak04erke22@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3878-8185.

Эльмира Куандыковна Асембаева – PhD, Алматы технологиялық университеті, «Қолданбалы биотехнология» кафедрасы, Алматы, Қазақстан; e-mail: asembayevae@bk.ru. ORCID: https://orcid.org/ 0000-0001-7964-7736.

Шолпан Амагельдиевна Абжанова – техника ғылымдарының кандидаты, Алматы технологиялық университеті, «Қолданбалы биотехнология» кафедрасы, Алматы, Қазақстан, e-mail:sholpan-ab@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3209-6855.

Сведения об авторах

Жанар Серикболовна Набиева – PhD, ассоц. профессор, Алматинский технологический университет, Научно-исследовательский институт пищевой безопасности, Алматы, Казахстан; e-mail: atu_nabiyeva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7258-746X.

Айнур Нурлыханкызы Жаханова – магистрант 2 курса, Алматинский технологический университет, кафедра «Прикладная биотехнология», Алматы, Казахстан; e-mail: z.ainur00001@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/ 0009-0007-2902-9367.

Акерке Аскаркызы Кулаипбекова* – докторант 3 курса, Алматинский технологический университет, кафедра «Прикладная биотехнология», Алматы, Казахстан; e-mail: ak04erke22@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3878-8185.

Эльмира Куандыковна Асембаева – PhD, Алматинский технологический университет, кафедра «Прикладная биотехнология», Алматы, Казахстан; e-mail: asembayevae@bk.ru. ORCID: https://orcid.org / 0000-0001-7964-7736.

Шолпан Амагельдиевна Абжанова – кандидат технических наук, ассоц. профессор, Алматинский технологический университет, кафедра «Прикладная биотехнология», Алматы, Казахстан; e-mail:sholpan-ab@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3209-6855.

Information about the authors

Zhanar Nabiyeva – PhD, Almaty Technological University, Research Institute of Food Safety, Almaty, Kazakhstan; e-mail: atu_nabiyeva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7258-746X.

Ainur Zhakhanova – master's student, 2nd year, Almaty Technological University, Deartment of Applied Biotechnology, Almaty, Kazakhstan; e-mail: z.ainur00001@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/ 0009-0007-2902-9367.

Akerke Kulaipbekova* – 3rd-year doctoral student, Almaty Technological University, Deartment of Applied Biotechnology, Almaty, Kazakhstan; e-mail: ak04erke22@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3878-8185.

Elmira Assembayeva – PhD, Almaty Technological University, Department of Applied Biotechnology, Almaty, Kazakhstan; e-mail: asembayevae@bk.ru. ORCID: https://orcid.org / 0000-0001-7964-7736.
Sholpan Abzhanova – Candidate of Technical Sciences, Almaty Technological University, Department of Applied Biotechnology, Almaty, Kazakhstan,e-mail:sholpan-ab@mail.ru. ORCID: ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3209-6855.

Редакцияға енуі 30.03.2026
Өңдеуден кейін түсуі 19.05.2026
Жариялауға қабылданды 25.05.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-39

ҒТАХР: 65.13.13

М.Т. Мурсалыкова[1]*, М.М. Какимов[2], Б.М. Искаков[2], А.М. Шуленова[2], А.Д. Үсенова[2]
[1]Шәкәрім университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинки көшесі, 20 А
[2]С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті,
010000, Қазақстан Республикасы, Астана қаласы, Жеңіс даңғылы, 62
*e-mail: maigul_85@mail.ru

МАҚСАРЫ МАЙЫН ПРЕСТЕУ ЖӘНЕ БИОФИЛЬТРДІ ҚОЛДАНУ АРҚЫЛЫ БАСТАПҚЫ ТАЗАРТУ ПРОЦЕСІН ОҢТАЙЛАНДЫРУ

Аңдатпа: *Мақалада дәнді және майлы дақылдарды қайта өңдеудің екінші өнімдерін бастапқы тазалау кезеңінде сүзгі материалы ретінде қолдану арқылы мақсары майын сүзу технологиясын жетілдіру бойынша зерттеу нәтижелері келтірілген. Қысымды реттеу механизмі бар жаңартылған шнекті престе суық сығу әдісімен алынған майды сүзу үшін зығыр талшықтарын пайдалануды қамтитын технологиялық сызба әзірленіп, сынақтан өткізілді. Зерттеу барысында мақсары майының сүзуге дейінгі және кейінгі органолептикалық, физика-химиялық және биохимиялық көрсеткіштеріне кешенді талдау жүргізілді. Май сапасын бағалау үшін қышқылдық саны, тотығу көрсеткіштері, майлы емес қоспалардың мөлшері, антиоксиданттық белсенділігі және сақтау тұрақтылығы анықталды. Зығыр талшықтарын қолдану шөгіндінің және майлы емес қоспалардың массалық үлесін 0,02%-ға дейін төмендетуге, қышқылдық санын 1,060 мг КОН/г дейін азайтуға, антиоксиданттық белсенділікті 42,65%-ға арттыруға және майдың сақтау мерзімін 12 айға дейін ұлғайтуға мүмкіндік беретіні анықталды. Ұсынылған технология сүзу тиімділігін арттырып, өнімнің тұтынушылық қасиеттерін жақсартуға мүмкіндік береді. Жұмыс нәтижелері ҚР патенттерімен расталып, өндірістік жағдайда енгізілді. Сонымен қатар, сүзгі материалы ретінде зығыр талшықтарын пайдалану қосымша химиялық реагенттерді қажет етпейтін экологиялық қауіпсіз және экономикалық тұрғыдан тиімді технологиялық шешім екендігі дәлелденді.*

Түйін сөздер: *мақсары майы, бастапқы тазалау, сүзу, екінші шикізат, зығыр талшықтары, шнекті пресс, қысымды реттеу.*

Кіріспе

Өсімдік майлары адамның теңгерімді тамақтануының ажырамас компоненті болып табылады және құрылымдық, энергетикалық әрі реттеуші қызметтер атқарады. Солардың ішінде мақсары майы (*Carthamus tinctorius L.*) құрамында полиқанықпаған май қышқылдарының, әсіресе омега-6 тобына жататын линол қышқылының (78%-ға дейін) өте жоғары мөлшерде болуымен ерекшеленеді. Бұл биохимиялық құрам оның тағамдық және функционалдық құндылығын айқындайды, соның ішінде жүрек-қантамыр жүйесіне, холестерин алмасуына және тері күйіне оң әсер етеді. Тағам өнеркәсібінен басқа, мақсары майы косметологияда, фармацевтикада және техникалық салаларда да қолданыс табуда [1, 2].

Алайда май-тоң май өнімдерінің сапасы, қауіпсіздігі және тұтынушылық қасиеттері оны өндіру мен кейінгі тазалау технологиясына тікелей байланысты. Өсімдік майларын

©М.Т. Мурсалыкова, М.М. Какимов, Б.М. Искаков, А.М. Шуленова, А.Д. Үсенова, 2026

рафинадтаудың дәстүрлі үдерісі – ілеспе заттарды (механикалық қоспалар, фосфолипидтер, бос май қышқылдары, пигменттер, ұшпа қосылыстар мен улы элементтер) жоюға бағытталған көпсатылы физика-химиялық операциялар кешенін (гидратация, бейтараптандыру, ағарту, дезодорация) қамтиды. Тиімділігіне қарамастан, классикалық химиялық рафинацияның бірқатар елеулі кемшіліктері бар: биологиялық белсенді заттардың (токоферолдар, фитостеролдар, полифенолдар) айтарлықтай жоғалуы, қажетсіз қосылыстардың (май қышқылдарының транс-изомерлері, тотығудың екінші өнімдері) түзілу қаупі, энергия шығынының көптігі және экологиялық жүктеменің жоғары болуы [3].

Жалпы технологиялық тізбекте бастапқы тазалау (сүзу) кезеңі ерекше маңызға ие, ол майды сығу процесінен кейін тікелей жүзеге асырылады. Бұл кезеңнің мақсаты – ірі дисперсті механикалық қоспаларды (ұнтақталған дән массасы, тұқым қабығының бөлшектері) жою болып табылады. Аталған қоспалар майдың органолептикалық көрсеткіштерін және сақтау мерзімін төмендетіп қана қоймай, рафинацияның кейінгі сатыларын қиындатады, реагенттер шығынын және процестердің ұзақтығын арттырады. Қазіргі заманғы өнеркәсіпте әртүрлі сүзгілеуші материалдар (белтинг, перлит, кизельгур, синтетикалық мембраналар) қолданылады, алайда олардың әрқайсысының өзіндік технологиялық және экономикалық шектеулері бар: жоғары құны, бір реттік пайдалану, кәдеге жарату қажеттілігі немесе сорбциялық сыйымдылығының жеткіліксіздігі [4, 5].

Осы тұрғыда баламалы, экологиялық тұрғыдан қауіпсіз және экономикалық жағынан тиімді сүзгілеуші материалдарды іздеу мен өндіріске енгізу өзекті мәселе болып табылады. Перспективалы бағыттардың бірі – агроөнеркәсіптік кешеннің қайта өңдеу өнімдерінің екінші шикізатын пайдалану. Бұл тәсіл тұйық циклді экономика (циркулярлы экономика) мен тұрақты дамудың қағидаттарына сәйкес келеді. Мұндай материалдарға астық дақылдарының кебектері немесе талшықты өсімдіктердің (зығыр және т.б.) талшықтары жатады, олар қолжетімді, қалпына келтірілетін және тиімді сорбцияға қабілетті табиғи кеуекті құрылымға ие [6].

Май тазалау технологиясын жетілдірумен қатар, майды сығу процесін оңтайландыру да түбегейлі мәнге ие. Сүзуге түсетін рафинацияланбаған майдың сапасы көп жағдайда престеу параметрлерімен анықталады. Қысымды реттеу механизмі бар шнекті престі әзірлеу негізгі технологиялық факторларды – шикізатты ұнтақтау дәрежесін, температуралық режимді және өнім шығымын – басқаруға мүмкіндік береді. Бұл тәсіл бастапқы кезеңде-ақ май құрамындағы қалқымалы бөлшектер мен тотығуға ұшыраған липидтердің мөлшерін барынша азайтуға жағдай жасайды, нәтижесінде кейінгі тазалау үдерістерін анағұрлым тиімді әрі жұмсақ жүргізуге мүмкіндік береді.

Зерттеудің мақсаты – мақсары майын өндірудің бастапқы сатыларын кешенді түрде жетілдіру, оның ішінде:

1. Майдың бастапқы сапалық көрсеткіштерін жақсарту мақсатында қысымды реттеуге мүмкіндік беретін шнекті престі қолдану;

2. Екінші шикізатты, атап айтқанда сүзгі материалы ретінде зығыр талшықтарын пайдалану арқылы майды бастапқы тазалаудың тиімді технологиясын әзірлеу және ғылыми тұрғыда негіздеу;

3. Ұсынылған технологияның мақсары майының биохимиялық құрамына, қауіпсіздік көрсеткіштеріне, антиоксиданттық әлеуетіне және органолептикалық қасиеттеріне әсерін кешенді бағалау.

Жұмыстың ғылыми жаңалығы – мақсары майын терең тазалау мақсатында зығыр талшықтарын сүзгі материалы ретінде қолданудың алғаш рет кешенді түрде ғылыми негізделуінде, сондай-ақ реттелетін суық сығу мен биоматериал арқылы жүргізілетін сорбциялық фильтрацияның синергетикалық әсерінің дәлелденуінде.

Практикалық маңызы – алынған нәтижелер өнертабыс пен пайдалы модельге берілген патенттермен расталған, сонымен қатар өндірістік жағдайда сәтті сынақтан өткізіліп, экономикалық тиімділік пен дайын өнім сапасының жақсарғанын көрсетті [7].

Зерттеу нысандары мен әдістері

Зерттеу нысандары:

Зерттеу нысаны ретінде «Ахрам» сортының тұқымдарынан алынған, қысымды реттеу механизмі бар шнекті престе суық сығу әдісімен өндірілген мақсары майы алынды. Сүзгілеуші

материалдар ретінде бидай, қара бидай, сұлы кебектері және зығыр талшықтары пайдаланылды.

Зерттеу әдістері:

Майды сығу процесі қысымды 10-30 МПа аралығында реттеуге мүмкіндік беретін жаңғыртылған шнекті престе жүргізілді. Бұл май шығымын және қатты бөлшектердің ұсақталу дәрежесін бақылауға мүмкіндік берді. Сүзу үрдісі дәнді және майлы дақылдарды қайта өңдеудің екінші өнімдерін пайдалану арқылы жүзеге асырылды. Майдың органолептикалық, физика-химиялық, биохимиялық және микробиологиялық көрсеткіштері ГОСТ және халықаралық стандарттарға сәйкес анықталды [8].

Зерттеуде қолданылған мақсары майы арнайы әзірленген, қысымды реттеу механизмімен жабдықталған шнекті престе суық сығу әдісімен алынды. Бұл майды алу процесін оңтайландыруға және бастапқы өнімдегі механикалық қоспалардың мөлшерін азайтуға бағытталған (сурет 1, 2).



Сурет 1 – Қысымды реттеу механизмі бар жаңғыртылған шнекті пресс



Сурет 2 – Мақсары дақылдары мен май

Қысымды реттеу қатты компоненттерді (ұнтақталған дән массасы, қабықтар) оптималды мөлшерге дейін ұсақтауға мүмкіндік береді, бұл майдағы қалқымалы бөлшектердің мөлшерін азайтады. Төмен температурадағы сығу режимі полиқанықпаған май қышқылдары мен антиоксиданттардың термиялық деградациясын болдырмайды. Қысымды оңтайландыру мақсары дәнінің ядросынан максималды май шығаруға жағдай жасайды. Қысымды реттеу арқылы алынған майда ұсақ бөлшектердің аз болуы кейінгі тазалау процесін жеңілдетеді [9, 10].

Осылайша, әзірленген шнекті престі қолдану бастапқы көрсеткіштері жақсартылған мақсары майын алуға мүмкіндік берді, бұл екінші сүзгілеуші материалдарды пайдалана отырып тиімді бастапқы тазалау жүргізуге қолайлы жағдай жасады.

Нәтижелер мен талқылау

Зерттеу шеңберінде реттелетін шнекті престеу және кейінгі зығыр талшықтары арқылы сүзу әдісін қамтитын әзірленген технология бойынша алынған мақсары майын жан-жақты бағалау жүргізілді. Нәтижелер төрт негізгі көрсеткіштер тобы бойынша берілген (кесте 1).

Органолептикалық көрсеткіштер 5 балдық шкала бойынша анықталды.

Кесте 1 – Мақсары майының органолептикалық сипаттамасы

Көрсеткіш	Престелген кейінгі май (сүзуге дейін)	Сүзуден кейінгі май (зығыр талшықтары)	МЕСТ талаптары
Сыртқы көрінісі	Қалқып тұрған шөгіндісі көрінетін бұлдыр сұйықтық	Шыны тәрізді, біртекті, шөгіндісіз және қалқымалы бөлшексіз сұйықтық	Шыны тәрізді, шөгіндісіз
Түсі	Қанық сары-қоңыр, біртектілігі жоқ	Таза алтын-сары, біртекті	Майға тән
Иісі	Қуырылған тұқымдардың тондарымен айқын, өрескел	Таза, жұмсақ, мақсарыға тән, сыртқы реңктері жоқ	Бөтен иіс жоқ
Дәмі	Өткір, аздап ащы және тұтқыр дәммен	Нәзік, жұмсақ, ащы немесе бөгде дәмсіз	Бөтен дәм жоқ

Зығыр талшықтары арқылы сүзу майдың органолептикалық қасиеттерін түбегейлі жақсартып, барлық көрсеткіштерді ең жоғары сауда стандарттарына сәйкестендірді [11].

Физика-химиялық көрсеткіштерін анықтау. Физика-химиялық көрсеткіштер өсімдік майларының сапасын, тазалығын және тұрақтылығын, сондай-ақ нормативтік-техникалық талаптарға сәйкестігін объективті бағалайтын негізгі критерий болып табылады. Олар технологиялық операциялардың тиімділігін және шикізатқа әсер дәрежесін тікелей көрсетеді.

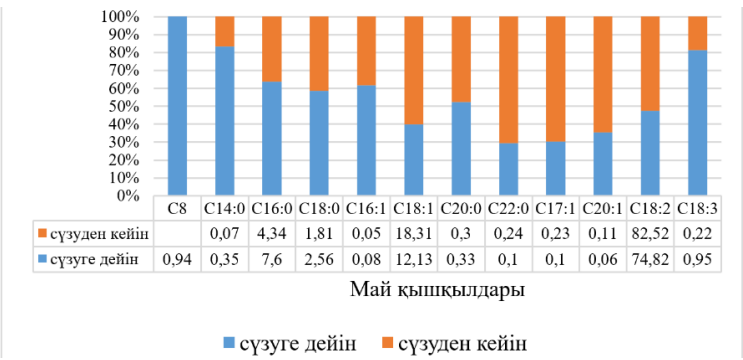
Осы зерттеу аясында негізгі стандартталған параметрлер сафлор майына екі кезеңде анықталды: реттелетін шнекті престен кейін және кейінгі зығыр талшықтары арқылы сүзуден соң. Алынған мәліметтер ұсынылған біріктірілген технологияның әсерін сандық түрде бағалауға мүмкіндік береді, соның ішінде: тотығу дәрежесі (пероксидтік сан), бос май қышқылдарының мөлшері (қышқылдық сан), қоспалардан тазарту толықтығы және өнімді сипаттайтын негізгі константалар. Бұл көрсеткіштерді талдау технологиялық тиімділікті негіздеуге және дайын өнімнің тұтынушылық қауіпсіздігін растауға қажет (кесте 2).

Кесте 2 – Мақсары майының физика-химиялық көрсеткіштері

Көрсеткіш	Анықтау әдісі (МЕСТ)	Престеуден кейінгі	Сүзуден кейінгі (Зығыр талшықтары)	Норматив (ТР ТС 024/2011)
Қышқыл саны, мг КОН/г	МемСТ 31933-2012	1.066 ± 0.02	1.060 ± 0.02	2.5 артық емес
Пероксидтік саны, ммоль O_2/кг	МемСТ ISO 27107-2016	7.01 ± 0.30	5.47 ± 0.20	10.0 артық емес
Йод саны, г I_2/100 г	МемСТ ISO 3961-2020	148.2 ± 2.5	150.2 ± 2.5	130-155 (мақсарыға)
Ылғал мен ұшпа заттардың үлесі, %	МемСТ 5481-2014	0.45 ± 0.05	0.12 ± 0.02	0.20 артық емес
Майсыз қоспалардың массалық үлесі, %	МемСТ 5481-2014	0.45 ± 0.14	0.02 ± 0.03	0.05 артық емес
Тығыздығы 20°C, г / см3	МемСТ 18848-2019	0.922 ± 0.002	0.919 ± 0.002	0.915-0.925
Сыну көрсеткіші 20°C	МемСТ ISO 6320-2012	1.4771 ± 0.0002	1.4770 ± 0.0002	1.473-1.477

Сүзу нәтижесінде майдағы ылғал мөлшері мен механикалық қоспалардың деңгейі рұқсат етілген шектен төмендеді. Пероксидтік санның 22%-ға статистикалық маңызды төмендеуі байқалды, бұл тотығудың бастапқы өнімдерінің түзілуінің баяулағанын және майдың тотығуға тұрақтылығының артқанын көрсетеді. Барлық көрсеткіштер нормативтік талаптарға сәйкес келеді.

Биохимиялық көрсеткіштерді анықтау. Әзірленген технология бойынша алынған мақсары майының биохимиялық параметрлерін терең талдау нәтижелері берілген. Зерттеу реттелетін шнекті престеу (термиялық стресс пен тотығуды азайтатын) мен кейінгі зығыр талшықтары арқылы жүргізілетін сорбциялық сүзудің бірлескен әсері майдағы маңызды компоненттердің сақталуына және потенциалды қауіпті ластаушы заттардың жойылуына қалай әсер ететінін бағалауға бағытталған (сурет 3).



Сурет 3 – Престеуден кейінгі және сүзуге дейінгі мақсары майының май қышқылды құрамы

Прессталған майда басым пальмитин (7,6%) және стеарин (2,56%) қышқылдары болды. Зығыр талшығымен сүзгеннен кейін қанықкан май қышқылдарының жалпы үлесі азайды: пальмитин 4,34%-ға, стеарин 1,81%-ға төмендеді, ал C8:0 толығымен жойылды.

Моноқанықпағандардың ішінде олеин қышқылы (C18:1) 12,13%-дан 18,31%-ға айтарлықтай өсті. Полиқанықпаған линол қышқылы (C18:2) басым болып, 74,82%-дан 82,52%-ға көбейді, ал α-линолен қышқылы (C18:3) 0,95%-дан 0,22%-ға төмендеді.

Сүзу фосфор, кальций сияқты элементтердің концентрациясын арттырды, бірақ олар қауіпсіз шектерде қалды. Темір мөлшері аз өсті, күкірт жойылды. Токоферолдардың (витамин Е) жалпы деңгейі (~508 мг/кг) өзгеріссіз сақталды, бұл тазартудың биологиялық белсенді заттарды сақтаудағы тиімділігін көрсетеді.

Микробиологиялық көрсеткіштерді анықтау. Азық-түлік өнімдерінің қауіпсіздігін бағалау және олардың белгіленген нормативтерге сәйкестігін тексеру мақсатында мақсары майының микробиологиялық сипаттамалары екі өңдеу кезеңінде зерттелді: тікелей престеуден кейін және қосымша тазартудан (сүзгіден өткізу) кейін (кесте 3). Алынған деректер қолданылған тазарту әдісінің майдың микробиологиялық тұрақтылығы мен қауіпсіздігін қамтамасыз етудегі тиімділігін айқындауға мүмкіндік береді [12].

Кесте 3 – Мақсары майының микробиологиялық қауіпсіздігі

Көрсеткіш	Престеуден кейінгі, КОЕ/г	Сүзуден кейінгі, КОЕ/г	Рұқсат етілген деңгейлер
Жалпы микробтық сан	1.5 x 10^3	< 1.0 x 10^1	1.0 x 10^4
Зең	5.0 x 10^2	< 1.0 x 10^1	5.0 x 10^2
Ашытқы	2.0 x 10^2	< 1.0 x 10^1	5.0 x 10^2
БГҚП (колиформ бактериялары)	0,1 г-да анықталған жоқ	0,1 г-да анықталған жоқ	1,0 г-да рұқсат етілмейді
Патогенді, соның ішінде сальмонеллалар	25 г-да анықталған жоқ	25 г-да анықталған жоқ	25 г-да рұқсат етілмейді
Staphylococcus aureus	1,0 г-да анықталған жоқ	1,0 г-да анықталған жоқ	1,0 г-да рұқсат етілмейді

Зығыр талшықтары қабаты арқылы сүзу айқын бактерияға қарсы және сорбциялық әсер көрсетіп, жалпы микробтық ластануды 2-3 реттік деңгейге (100-1000 есе) төмендетті. Май май өнімдеріне арналған микробиологиялық қауіпсіздік талаптарының барлығына сәйкес келеді.

Қорытынды

Кешенді бағалау әзірленген технологияның жоғары тиімділігін дәлелдеді, ол келесі операцияларды біріктіреді:

Қысымды реттеуге мүмкіндік беретін шнекті престеу – бөлшектердің өлшемін бақылауға және термиялық стресс минималды болуына жағдай жасай отырып май алу үшін;

Зығыр талшықтары арқылы сүзу – терең тазалаудың негізгі операциясы ретінде.

Бұл технология жоғары органолептикалық сапаны қамтамасыз етеді (транспаренттілік, таза дәм мен хош иіс). Ол тағамдық құрамды сақтап қана қоймай, жақсартады (тұрақты май қышқылдарының құрамын, антиоксиданттардың жоғары мөлшерін). Қауіпсіздікті арттырады (улы элементтерді 2 есеге төмендету, микробтық ластануды 2-3 реттік азайту). Сақтау тұрақтылығын жақсартады (пероксидтік сан 22%-ға төмендейді, антиоксиданттық белсенділік 42,5%-ға артады). Барлық көрсеткіштер қолданыстағы нормативтік талаптарға (ТР ТС) сәйкес келеді. Нәтижелер бұл технологияны функционалдық қасиеттері бар жоғары сапалы мақсары майын өндіру үшін енгізудің тиімділігін растайды.

Әдебиеттер тізімі

1. Ganesan K. Impact of consumption and cooking manners of vegetable oils on cardiovascular diseases-A critical review / K. Ganesan, K. Sukalingam, B. Xu // Trends in Food Science & Technology. – 2018. – Т. 71. – P. 132-154.

2. Replacing saturated fat with walnuts or vegetable oils improves central blood pressure and serum lipids in adults at risk for cardiovascular disease: a randomized controlled-feeding trial / A.M. Tindall et al //Journal of the American Heart Association. – 2019. – Т. 8, № 9. – P. e011512.

3. Awogbemi O. Comparative study of properties and fatty acid composition of some neat vegetable oils and waste cooking oils / O. Awogbemi, E.I. Onuh, F.L. Inambao // International Journal of Low-Carbon Technologies. – 2019. – Т. 14, № 3. – P. 417-425.

4. Ghouila Z. Vegetable oils and fats: Extraction, composition and applications / Z. Ghouila, M. Sehailia, S. Chemat // Plant Based «Green Chemistry 2.0» Moving from Evolutionary to Revolutionary. – 2019. – P. 339-375.
5. Chew S.C. Refining of edible oils / S.C. Chew, K.L. Nyam // Lipids and edible oils. – Academic Press, 2020. – P. 213-241.
6. Choriyorovna E.N. Effective technology for cleaning mechanical compounds in vegetable oils / E.N. Choriyorovna, A.A. Normuminovich, N.U.U. Kizi // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. – 2022. – № 1-2. – P. 13-17.
7. Пайдалы модельге патент № 7977. Май сығуға арналған шнекті пресс / Мурсалыкова М.Т., Какимов М.М., Касенов А.Л., Искаков Б.М. 21.04.2023 ж.
8. Өнертабысқа патент № 36262. Өсімдік майларын механикалық механикалық қоспалардан терең тазартуға арналған центрифуга / Искаков Б.М., Какимов М.М., Тохтаров Ж.Х., Мурсалыкова М.Т., Сатаева Ж.И. 15.09.2023 ж.
9. МемСТ 18848-2019. Өсімдік майлары. Органолептикалық және физико-химиялық көрсеткіштерді анықтау. – Введ. 2002-06-01. – М.: Межгосстандарт Россия: Изд-во стандартов, 2019. – IV, 18 с: ил.
10. МемСТ 5481-2014. Тұнба мен майсыз қоспалардың массалық үлесін анықтау. – Введ. 2016-01-01. – М.: Межгосстандарт Россия: Изд-во стандартов, 2015. – IV, 12с: ил.
11. Development of a small-size processing line for production of safflower oil / M. Mursalykova et al // Journal of Food Process Engineering. – 2023. – Т. 46, № 9. – P. e14394.
12. Improving the Technology of Primary Purification of the Safflower Oil Using Secondary Products of Processing on a Biological Basis / B. Iskakov et al // Foods. – 2023. – Т. 12, № 17. – P. 3275.

References

1. Ganesan K. Impact of consumption and cooking manners of vegetable oils on cardiovascular diseases-A critical review / K. Ganesan, K. Sukalingam, B. Xu // Trends in Food Science & Technology. – 2018. – Т. 71. – R. 132-154. (In English).
2. Replacing saturated fat with walnuts or vegetable oils improves central blood pressure and serum lipids in adults at risk for cardiovascular disease: a randomized controlled‐feeding trial / A.M. Tindall et al //Journal of the American Heart Association. – 2019. – Т. 8, № 9. – R. e011512. (In English).
3. Awogbemi O. Comparative study of properties and fatty acid composition of some neat vegetable oils and waste cooking oils / O. Awogbemi, E.I. Onuh, F.L. Inambao // International Journal of Low-Carbon Technologies. – 2019. – Т. 14, № 3. – R. 417-425. (In English).
4. Ghouila Z. Vegetable oils and fats: Extraction, composition and applications / Z. Ghouila, M. Sehailia, S. Chemat // Plant Based «Green Chemistry 2.0» Moving from Evolutionary to Revolutionary. – 2019. – R. 339-375. (In English).
5. Chew S.C. Refining of edible oils / S.C. Chew, K.L. Nyam // Lipids and edible oils. – Academic Press, 2020. – R. 213-241. (In English).
6. Choriyorovna E.N. Effective technology for cleaning mechanical compounds in vegetable oils / E.N. Choriyorovna, A.A. Normuminovich, N.U.U. Kizi // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. – 2022. – № 1-2. – R. 13-17. (In English).
7. Paidaly model'ge patent № 7977. Mai syguga arnalgan shnekti press / Mursalykova M.T., Kakimov M.M., Kasenov A.L., Iskakov B.M. 21.04.2023 zh. (In Kazakh).
8. Өnertabyska patent № 36262. Osimdik mailaryn mekhanikalyk mekhanikalyk kospalardan teren tazartuga arnalgan tsentrifuga / Iskakov B.M., Kakimov M.M., Tokhtarov Zh.Kh., Mursalykova M.T., Sataeva Zh.I. 15.09.2023 zh. (In Kazakh).
9. MemST 18848-2019. Osimdik mailary. Organoleptikalyk zhane fiziko-khimiyalyk korsetkishterdi anyktau. – Vved. 2002-06-01. – M.: Mezhgosstandart Rossiya: Izd-vo standartov, 2019. – IV, 18 s: il. (In Kazakh).
10. MemST 5481-2014. Tunba men maisyz kospalardyn massalyk ulesin anyktau. – Vved. 2016-01-01. – M.: Mezhgosstandart Rossiya: Izd-vo standartov, 2015. – IV, 12s: il. (In Kazakh).
11. Development of a small‐size processing line for production of safflower oil / M. Mursalykova et al // Journal of Food Process Engineering. – 2023. – Т. 46, № 9. – R. e14394. (In English).

12. Improving the Technology of Primary Purification of the Safflower Oil Using Secondary Products of Processing on a Biological Basis / B. Iskakov et al // Foods. – 2023. – Т. 12, № 17. – R. 3275. (In English).

Қаржыландыру туралы ақпарат

Бұл зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және Жоғары білім министрлігі қаржыландыратын 2024-2026 жылдарға арналған "Жас ғалым" жобасы AP22685422 «Мақсары майын өндіру тиімділігін жоғарылатуға арналған пресс жабдығын жетілдіру» тақырыбы бойынша жас ғалымдардың зерттеулерін гранттық қаржыландыру шеңберінде орындалды.

М.Т. Мурсалыкова[1]*, М.М. Какимов[2], Б.М. Искаков[2], А.М. Шуленова[2], А.Д. Үсенова[2]
[1]Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А
[2]Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина,
010000, Республика Казахстан, г. Астана, пр. Жеңіс, 62
*e-mail: maigul_85@mail.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПРЕССОВАНИЯ И ПЕРВИЧНАЯ ОЧИСТКИ САФЛОРОВОГО МАСЛА С ПРИМЕНЕНИЕМ БИОФИЛЬТРА

В статье представлены результаты исследований по совершенствованию технологии фильтрации сафлорового масла с использованием вторичных продуктов переработки зерновых и масличных культур в качестве фильтрующего материала на этапе первичной очистки. Разработана и апробирована технологическая схема, предусматривающая применение льняного волокна для фильтрации масла, полученного методом холодного прессования на модернизированном шнековом прессе с механизмом регулирования давления. В ходе исследования проведён комплексный анализ органолептических, физико-химических и биохимических показателей сафлорового масла до и после фильтрации. Для оценки качества масла определяли кислотное число, показатели окисления, содержание нежировых примесей, антиоксидантную активность и устойчивость при хранении. Установлено, что применение льняного волокна позволяет снизить массовую долю осадка и нежировых примесей до 0,02%, уменьшить кислотное число до 1,060 мг КОН/г, повысить антиоксидантную активность на 42,65% и увеличить срок хранения масла до 12 месяцев. Предложенная технология способствует повышению эффективности фильтрации и улучшению потребительских свойств продукта. Результаты работы подтверждены патентами Республики Казахстан и внедрены в производственных условиях. Кроме того, доказано, что использование льняного волокна в качестве фильтрующего материала является экологически безопасным и экономически эффективным технологическим решением, не требующим применения дополнительных химических реагентов.

Ключевые слова: *сафлоровое масло, первичная очистка, фильтрация, вторичное сырьё, льняные волокна, шнековый пресс, регулирование давления.*

M. Mursalykova[1]*, M. Kakimov[2], B. Iskakov[2], A. Shulenova[2], A. Ussenova[2]
[1]Shakarim University,
071412, Republic of Kazakhstan, Semey, 20 A Glinka str
[2]Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin,
010000, Republic of Kazakhstan, Astana, Zhenis Ave. 62
*e-mail: maigul_85@mail.ru

OPTIMIZATION OF THE PRESSING PROCESS AND PRIMARY PURIFICATION OF SAFFLOWER OIL USING BIOFILTERS

This article presents the results of research aimed at improving safflower oil filtration technology through the use of by-products from cereal and oilseed processing as a filtering material during the primary purification stage. A technological scheme involving the use of flax fibers for filtering oil obtained by cold pressing on a modified screw press equipped with a pressure regulation mechanism was developed and experimentally validated. A comprehensive analysis of the organoleptic, physicochemical, and biochemical properties of safflower oil before and after filtration was conducted. Oil quality was evaluated by determining the acid value, oxidation indicators, content of non-fat impurities, antioxidant activity, and storage stability. The results showed that the application of flax fibers reduced the mass fraction of sediment and non-fat impurities

to 0.02%, decreased the acid value to 1.060 mg KOH/g, increased antioxidant activity by 42.65%, and extended the shelf life of the oil to 12 months. The proposed technology improves filtration efficiency and enhances the consumer characteristics of the final product. The research findings have been confirmed by patents of the Republic of Kazakhstan and implemented under industrial conditions. Furthermore, the use of flax fibers as a filtration material was proven to be an environmentally friendly and economically efficient technological solution that does not require the use of additional chemical reagents.

Key words: *safflower oil, primary purification, filtration, secondary raw materials, flax fibers, screw press, pressure control.*

Авторлар туралы мәліметтер

Майгуль Тауржановна Мурсалыкова* – PhD, Шәкәрім университеті, Қазақстан, Семей; e-mail: maigul_85@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5904-9544.

Мухтарбек Муханович Какимов – техника ғылымдарының кандидаты, профессор, «Азық-түлік өнімдерінің өндірісі» білім беру бағдарламасы тобының жетекшісі, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Қазақстан, Астана; e-mail: muhtarbek@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1190-2195.

Бауржан Мырзабекович Искаков – PhD докторы, «Тамақ және қайта өңдеу өндірістерінің технологиясы» кафедрасының аға оқытушысы, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Қазақстан, Астана; e-mail: baissemey@bk.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7665-8058.

Асем Манарбековна Шуленова – «Тамақ өнімдерінің технологиясы» білім беру бағдарламасының докторанты; С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық университеті, Астана, Қазақстан; e-mail: shulenovaa@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/ 0009-0003-2812-075X.

Айдана Дәулетқызы Үсенова – «Тамақ өнімдерінің технологиясы» білім беру бағдарламасының докторанты; С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық университеті, Астана, Қазақстан; e-mail: ussenova.aidana@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-3371-8518.

Сведения об авторах

Майгуль Тауржановна Мурсалыкова* – PhD, Шәкәрім университет, Казахстан, Семей; e-mail: maigul_85@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5904-9544.

Мухтарбек Муханович Какимов – кандидат технических наук, профессор, руководитель группы образовательных программ «Производство продуктов питания», Казахский агротехнический исследовательский университет им. С. Сейфуллина, Казахстан, Астана; e-mail: muhtarbek@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1190-2195.

Бауржан Мырзабекович Искаков – доктор PhD докторы, старший преподаватель Института инжиниринга и пищевых технологии, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Қазақстан, Астана; e-mail: baissemey@bk.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7665-8058.

Асем Манарбековна Шуленова – докторант образовательной программы «Технология пищевых продуктов», Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Астана, Казахстан; e-mail: shulenovaa@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-2812-075X.

Айдана Дәулетқызы Үсенова – докторант образовательной программы «Технология пищевых продуктов», Казахский агротехнический исследовательский университет им. С. Сейфуллина, Казахстан, Астана; e-mail: ussenova.aidana@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/ 0009-0004-3371-8518.

Information about the authors

Maigul Mursalykova* – PhD, Shakarim University, Kazakhstan, Semey, Kazakhstan; e-mail: maigul_85@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5904-9544.

Mukhtarbek Kakimov – Candidate of Technical Sciences, Professor, Head of the Educational Program Group «Food Production», Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seyfullin, Kazakhstan, Astana; e-mail: muhtarbek@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1190-2195.

Baurzhan Iskakov – PhD, Senior Lecturer of the Institute of Engineering and Food Technologies, Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin, Kazakhstan, Astana; e-mail: baissemey@bk.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7665-8058.

Assem Shulenova – Doctoral Student in the Educational Program «Food Technology», S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Republic of Kazakhstan, Astana; e-mail: shulenovaa@mail.ru. ORCID https://orcid.org/ 0009-0003-2812-075X.

Aidana Ussenova – doctoral Student in the Educational Program «Food Technology», S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Republic of Kazakhstan, Astana; e-mail: ussenova.aidana@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/ 0009-0004-3371-8518.

Редакцияға енуі 01.06.2026
Жариялауға қабылданды 09.06.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-40

BY 4.0
Check for updates

МРНТИ: 34.31.25

Г.Т. Доланбаева*, К.О. Богданова[1], В.Н. Николаева[2], С.К. Кабдрахманова[1]
[1]Satbayev University,
050013, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Каныша Сатпаева, 22
[2]Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова,
070002, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск, ул. 30-й Гвардейской дивизии, 34
*e-mail: saia_26@mail.ru

ПОЛУЧЕНИЕ ЭНДОГЕННОГО БИОСТИМУЛЯТОРА ФУЗИКОКЦИНА: СПОСОБ ВЫДЕЛЕНИЯ, АНАЛИЗ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ

Аннотация: *Разработка экологически безопасных биостимуляторов для повышения устойчивости сельскохозяйственных культур к абиотическим и биотическим стрессам является актуальной задачей. В данной статье представлены результаты исследований по разработке технологии получения и применения фитогормона фузикокцина (FC) из семян пшеницы (Triticum aestivum L.). Проведена комплексная оценка семи сортов яровой пшеницы на устойчивость к патогенам (гельминтоспориоз, альтернариоз, головня) и абиотическим стрессам (засоление, засуха, температурные экстремумы, защелачивание, избыточное увлажнение). Выделены наиболее устойчивые сорта («Саратовская», «Алтай», «Ульбинка 25»), показавшие высокую всхожесть и энергию прорастания в стрессовых условиях. Разработана и оптимизирована методика выделения FC, включающая индукцию стресса в семенах, экстракцию этанолом, очистку методом обратно-фазовой высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) и количественное определение с помощью спектрофотометрии. Валидация метода подтвердила его высокую воспроизводимость ($R^2 > 0.998$) и стабильность. Полученные результаты демонстрируют потенциал использования фузикокцина, полученного из доступного растительного сырья, в качестве эффективного биостимулятора для предпосевной обработки семян с целью повышения урожайности и стрессоустойчивости пшеницы.*

Ключевые слова: *пшеница, фузикокцин, биостимуляторы, абиотический стресс, фитопатология, жидкостная хроматография, предпосевная обработка семян, стрессоустойчивость.*

Введение

Устойчивое развитие мирового сельского хозяйства в условиях нарастающих климатических изменений, деградации почв и необходимости обеспечения продовольственной безопасности требует разработки инновационных и экологически сбалансированных агроприемов [1]. Особую актуальность приобретают стратегии, направленные на повышение внутреннего (эндогенного) потенциала растений к сопротивлению абиотическим (засуха, засоление, экстремальные температуры) и биотическим (патогены, вредители) стрессам на наиболее уязвимых начальных этапах онтогенеза – прорастания семян и развития всходов [2, 3].

В этом контексте одним из перспективных направлений является использование природных биостимуляторов – соединений, которые в малых дозах активируют метаболические процессы, усиливают стрессоустойчивость и, как следствие, повышают продуктивность сельскохозяйственных культур без негативного воздействия на окружающую среду [2-4]. Среди широкого спектра биологически активных веществ особый интерес представляют фитогормоны, выполняющие ключевые регуляторные функции. В отличие от классических гормонов (ауксины, цитокинины, гиббереллины), фузикокцин (FC) долгое время рассматривался преимущественно как микотоксин гриба *Fusicoccum amygdali* [5]. Однако современные данные свидетельствуют о его эндогенном синтезе в тканях высших растений, где он играет уникальную роль в качестве мощного активатора плазматической H^+-АТФазы – «протонного насоса» клеточной мембраны [6].

©Г.Т. Доланбаева, К.О. Богданова, В.Н. Николаева, С.К. Кабдрахманова, 2026

Активация H^+-АТФазы под действием FC приводит к гиперполяризации мембранного потенциала, закислению апопласта и созданию движущей силы для вторичного активного транспорта ионов (K^+, Ca^{2+}, NO_3^-) и питательных веществ. Это фундаментальное свойство определяет многогранное физиологическое действие FC: от регуляции устьичных движений и роста клеток растяжением до модуляции ответа на стресс. Экзогенное применение FC усиливает устойчивость растений к засухе за счет улучшения водного статуса и активации синтеза абсцизовой кислоты, к засолению – за счет поддержания ионного гомеостаза и осморегуляции, а также индуцирует экспрессию генов патогенез-родственных белков (PR-белков), повышая резистентность к грибковым и бактериальным инфекциям [7, 8].

Несмотря на доказанную высокую биологическую активность, широкое практическое применение FC в агрономии сдерживается ограниченностью и высокой стоимостью источников его получения (традиционно-культуры фитопатогенных грибов) [5]. В связи с этим, поиск альтернативных, рентабельных и возобновляемых источников FC является актуальной научно-практической задачей. Перспективным направлением представляется выделение FC из массовых сельскохозяйственных культур, в частности пшеницы (*Triticum aestivum L.*) [7, 8]. Практически не изучено влияние предпосевных стрессовых воздействий на семенной материал с целью индукции синтеза или мобилизации эндогенных пулов FC как стратегии повышения качества сырья для его последующего выделения.

Целью данного исследования была разработка научных основ технологии получения биостимулятора на основе фузикокцина из семян пшеницы для предпосевной обработки. Для этого были поставлены следующие задачи: провести сравнительный фитопатологический анализ и оценку посевных качеств семян различных сортов яровой пшеницы; изучить реакцию сортов пшеницы на комплекс модельных абиотических стрессов (засоление, засуха, температурные шоки, защелачивание, гипоксия) с оценкой энергии прорастания, всхожести и ростовых параметров; на основе скрининга выделить наиболее перспективные сорта-кандидаты для использования в качестве сырья для получения FC; разработать и валидировать методику выделения, очистки и количественного определения FC.

Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования использовались семена семи широко распространенных в Казахстане сортов яровой мягкой пшеницы (*Triticum aestivum L.*): Алтай, ГВК, Наргиз, Саратовская, Улан 43, Ульбинка 25 и Уралосибирская. Семенной материал был предоставлен семеноводческими хозяйствами Восточно-Казахстанской области и соответствовал категории репродукционных семян.

Для проведения фитопатологического анализа, стресс-индукции, экстракции и хроматографического анализа использовали: этанол (96% и 80%), воду дистиллированную; трифторуксусная кислота (TFA, 99%), ацетонитрил (99.9%), метанол (99.9%), хлорид натрия (ч.д.а.), сахароза (ч.д.а.), гидроксид натрия (ч.д.а.), активированный уголь, бентонитовую глину; стандартный образец фузикокцина (Sigma-Aldrich, ≥95%); фильтровальную бумагу ФС.

Фитопатологический анализ семян проведён биологическим методом проращивания в рулонах фильтровальной бумаги [9]. Учёт результатов проводили на 3-й и 7-й день под бинокулярной лупой (увеличение x16). Определяли зараженность тремя основными грибковыми заболеваниями: гельминтоспориоз (*Bipolaris sorokiniana*), **Ошибка! Источник ссылки не найден.**альтернариоз (*Alternaria* spp.), головня (*Ustilago/Tilletia spp.*).

Процент зараженности (X, %) рассчитан по формуле:

$$X = (N1 / N) \times 100 \qquad (1)$$

где N1 – количество зараженных семян,

N – общее количество семян (400 шт.).

Энергию прорастания и лабораторную всхожесть семян определяли по ГОСТ 12038-84 [10]. Подсчёт нормально проросших семян проводили на 3-и сутки (энергия прорастания) и на 7-е сутки (всхожесть). Все эксперименты проводили в двух временных сериях (август и сентябрь 2024 г.). Статистическую обработку выполняли с использованием t-критерия Стьюдента ($p < 0,05$).

Моделирование абиотических стрессов проведена для изучения реакции сортов на стресс и индукции биосинтеза FC, семена подвергали контролируемым стрессовым воздействиям в течение 48 часов. Для каждого сорта и типа стресса использовали три биологические повторности по 100 семян. Моделировали следующие условия:

1. контроль: стандартные лабораторные условия (температура 22°C, влажность 60%).
2. замачивание: полное погружение в стерильную дистиллированную воду (22°C);
3. засоление: раствор NaCl (400 мМ);
4. защелачивание: раствор с pH 9.0 (NaOH);
5. осмотический стресс: раствор сахарозы (осмотический потенциал -0.5 Мпа);
6. низкотемпературный стресс: выдерживание при температуре -4...-10°C;
7. высокотемпературный стресс: инкубация при +45°C.

После воздействия семена промывали, подсушивали и оценивали их жизнеспособность. Проращивание проводили в рулонах фильтровальной бумаги с оценкой энергии прорастания (4-й день) и окончательной всхожести (8-й день). Для оценки ростовой активности отбирали 20 проростков из каждой группы, измеряли общую длину растения, длину ростка и корней, подсчитывали количество корней.

Для выделения FC был использован сортовой материал («Саратовская», «Алтай»). Отобранные семена подвергали стресс-индукции замачиванием в воде (48 ч). Высушенные до воздушно-сухого состояния семена измельчали на лабораторной мельнице. Гомогенат (100 г) экстрагировали 200 мл 80% этанола (соотношение 1:2, масса/объем) в течение 24 часов при комнатной температуре на магнитной мешалке. Экстракт центрифугировали (5000 g, 15 мин). Надосадочную жидкость очищали на колонке (30 х 2 см) с комбинированным сорбентом (активированный уголь: бентонитовая глина, 1:1). Несорбируемые примеси отмывали 10% этанолом (200 мл), целевые соединения элюировали 50% этанолом (150 мл). Фракцию упаривали на ротационном испарителе (40°C) и ресуспендировали в 5 мл 50% метанола [11].

Анализ и очистку проводили на системе Agilent 1260 Infinity II с DAD-детектором. Колонка: Zorbax Eclipse Plus C18 (150 х 4.6 мм, 5 мкм). Подвижная фаза: (А) вода с 0.1% TFA (pH 4.0), (В) ацетонитрил. Градиент: 0-5 мин – 10% В; 5-25 мин – линейный рост до 90% В; 25-30 мин – 90% В; 30-35 мин – возврат к 10% В. Скорость потока 0,8 мл/мин, температура колонки – 30°C, объем пробы – 20 мкл, детекция при 220 нм и 254 [12].

Более детальные параметры хроматографического анализа и спектрофотометрической валидации представлены в онлайн-приложении к статье (Supplementary Material S1).

Метод ВЭЖХ валидирован по параметрам линейности, предела обнаружения (LOD) и количественного определения (LOQ) [1313]. Калибровочные кривые строили по методу внешнего стандарта в диапазоне 1 - 50 мкг/мл. Уравнения линейной регрессии рассчитывали методом наименьших квадратов. Статистическую обработку проводили с использованием ANOVA ($p < 0,05$) и post-hoc теста Тьюки в программе OriginPro 2022 [11].

Результаты и обсуждение исследований

Исходная фитопатологическая экспертиза выявила присутствие комплекса грибных патогенов во всех семи сортах (табл. 1). Наиболее распространенными были возбудители гельминтоспориозной корневой гнили и альтернариоза. Сорта «Саратовская», «Ульбинка 25» и «Уралосибирская» показали наименьший уровень комплексной зараженности (4.75-6.83%) и наибольший процент здоровых семян (93.17-95.00%). Высокие показатели энергии прорастания (92-96%) и лабораторной всхожести (95-98%) в оптимальных условиях зафиксированы у сортов «Алтай», «Улан 43» и «Ульбинка 25».

Таблица 1 – Сводные результаты фитопатологического анализа и оценки всхожести семян пшеницы (данные за август-сентябрь 2024 г.)

Сорт	Зараженность, % (суммарная)	Здоровые семена, %	Энергия прорастания, % (контроль)	Всхожесть, % (контроль)
Алтай	10.58 – 11.50	88.50 – 89.42	92.5 – 93.0	97.5 – 98.0
ГВК	12.25 – 14.25	85.75 – 87.75	76.0 – 80.0	78.0 – 81.5
Наргиз	8.08 – 8.16	91.83 – 91.92	88.0 – 89.0	90.0 – 91.0
Саратовская	4.75 – 5.25	94.00 – 94.75	75.0 – 76.3	77.0 – 80.0
Улан 43	4.75 – 8.50	91.50 – 95.25	95.5 – 96.0	97.4 – 98.0
Ульбинка 25	5.00 – 5.90	94.17 – 95.00	92.0 – 93.5	95.0 – 95.5
Уралосибирская	5.16 – 6.83	93.17 – 94.83	83.2 – 84.0	83.5 – 85.0

Примечание: различия между сортами достоверны при $p < 0,05$ (ANOVA).

Реакция сортов на моделируемые стрессовые факторы носила выраженный дифференциальный характер (рис. 1, табл. 2). Сорт «Алтай» проявил себя как универсально стресс-толерантный генотип, сохранив всхожесть на уровне 90-99% при всех типах стресса, кроме осмотического (90%). Сорт «Саратовская» подтвердил устойчивость к засолению и защелачиванию, но оказался чувствительным к дефициту воды. Сорта «ГВК» и «Уралосибирская» идентифицированы как наиболее стресс-чувствительные.

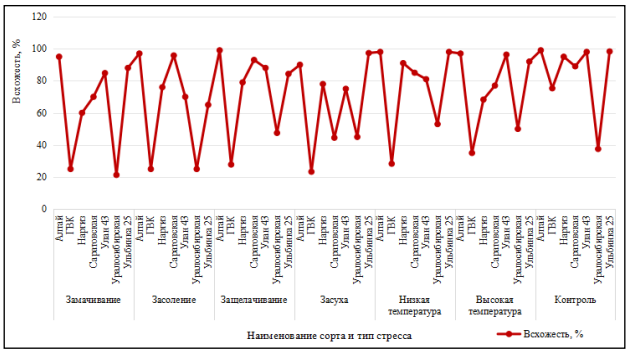


Рисунок 1 – Всхожесть семян различных сортов пшеницы после 48-часового воздействия абиотическими стрессорами (засуха моделировалась осмотическим стрессом – 0.5 МПа)

Таблица 2 – Сравнительная оценка устойчивости сортов к ключевым стрессам на основе всхожести и ростовых параметров

Критерий / Сорт	Алтай	Саратовская	Ульбинка 25	ГВК (наименее устойчивый)
Устойчивость к засолению	Высокая (97%)	Высокая (95.8%)	Средняя (65%)	Низкая (25%, гибель 30.6%)
Устойчивость к осмотич. стрессу (засуха)	Высокая (90%)	Низкая (44.5%)	Очень высокая (97.3%)	Низкая (23.3%)
Устойчивость к защелачиванию	Высокая (99%)	Высокая (93%)	Высокая (84.3%)	Низкая (27.8%)
Термоустойчивость (высокие t°)	Высокая (97%)	Средняя (77%)	Высокая (92%)	Низкая (35%)
Минимальная задержка роста при стрессе	+++	++ (кроме засухи)	++	---

Примечание: +++ – минимальная задержка, --- – максимальная задержка роста. Различия достоверны при p <0,01.

На основании этих данных для последующего выделения FC выбраны сорта «Алтай» (универсальная устойчивость) и «Саратовская» (устойчивость к ионному стрессу). Предпосевное замачивание (стресс-индукция), применено для потенцирования физиологических процессов, ведущих к аккумуляции защитных метаболитов, включая FC [8].

Разработанная схема downstream-обработки семян пшеницы представлена на рисунке 2 (ключевые этапы: стресс-индукция → экстракция → первичная очистка → ВЭЖХ-анализ). Детальное описание параметров ВЭЖХ и спектрофотометрической валидации вынесено в онлайн-приложение (Supplementary Material S1).

На хроматограмме (рис. 3) идентифицирован пик FC с временем удерживания 18,5 мин, характеризующийся высокой интенсивностью, симметричной формой (коэффициент асимметрии 1,05) и хорошим разрешением от соседних пиков.

Построение калибровочных кривых (рис. 4) в диапазоне 1-50 мкг/мл продемонстрировало отличную линейность: при 220 нм $y = 0,0207x + 0,0295$ ($R^2 = 0,998$), при 254 нм $y = 0,0197x + 0,0194$ ($R^2 = 0,999$). LOD и LOQ составили ≈0,3 мкг/мл и 1,0 мкг/мл соответственно. Воспроизводимость метода (относительное стандартное отклонение) составила менее 5% (CV <5%).

Для сравнения групп использовали однофакторный ANOVA с последующим post-hoc тестом Тьюки. Различия между контрольными и стресс-обработанными образцами признаны статистически значимыми при $p < 0,05$. Стандартная ошибка среднего (SEM) для всех показателей не превышала 5%.

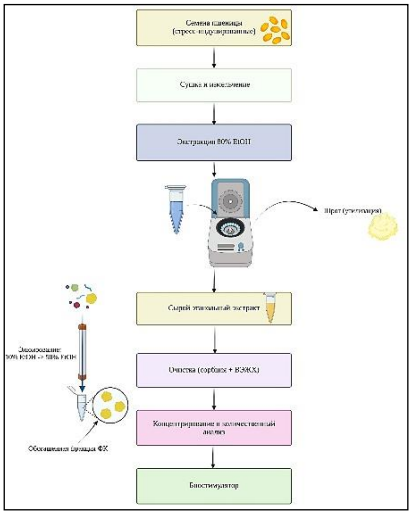
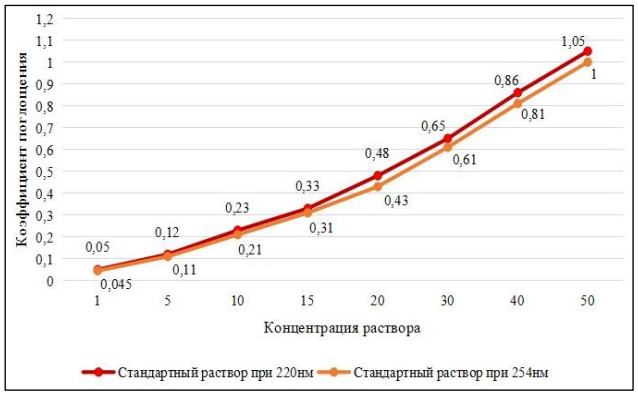


Рисунок 2 – Схема методики выделения и анализа фузикокцина из семян пшеницы



Рисунок 3 – Репрезентативная хроматограмма этанольного экстракта семян пшеницы (сорт Алтай) при детекции 220 нм. Пик 1 соответствует фузикокцину (tR = 18.5 мин)



При 220 нм: y = 0.0207x + 0.0295; R^2 = 0.998
При 254 нм: y = 0.0197x + 0.0194; R^2 = 0.999

Рисунок 4 – Калибровочная кривая фитогормона фузикокцина

Представленная технология имеет ряд ограничений. Выход FC зависит от сезонных и почвенно-климатических условий выращивания пшеницы, что может влиять на воспроизводимость результатов. Масштабирование процесса с лабораторного уровня (100 г сырья) до промышленного требует оптимизации параметров экстракции и хроматографической очистки (замена препаративной ВЭЖХ на более производительные методы, например, жидкостную экстракцию под давлением). Экономическая эффективность технологии должна быть подтверждена расчётами себестоимости получаемого биостимулятора в сравнении с импортными аналогами. Перспективными направлениями дальнейших исследований являются: автоматизация процесса выделения, создание стандартизированной формы препарата и проведение полевых испытаний на различных сельскохозяйственных культурах.

Выводы

Таким образом, исследован способ получения биостимулятора на основе эндогенного фузикокцина из семян пшеницы. Комплексный подход позволил сформулировать следующие выводы:

1. Выделены перспективные генотипы-доноры. В результате фитопатологического скрининга и оценки стресс-толерантности семи сортов яровой пшеницы идентифицированы сорта «Саратовская», «Алтай» и «Ульбинка 25», характеризующиеся минимальной зараженностью (4.75-11.50%) и высокой устойчивостью к абиотическим стрессам. Это делает их оптимальным сырьем для накопления FC.

2. Обоснован прием стресс-индукции. Предпосевное замачивание семян (48 ч) активирует физиологические пути ответа на стресс, что способствует мобилизации пулов защитных фитогормонов, включая FC, и создает основу для увеличения выхода целевого продукта.

3. Разработана и валидирована аналитическая платформа для выделения и контроля FC. Впервые для семян пшеницы предложена схема downstream-обработки: экстракция 80% этанолом, очистка методом ВЭЖХ на колонке C18 (ацетонитрил-вода, 0.1% TFA, pH 4.0), количественное определение при 220 нм. Метод линеен в диапазоне 1-50 мкг/мл ($R^2 > 0.998$) и пригоден для анализа FC в сложной растительной матрице.

4. Создана научно-методическая основа для получения биостимулятора. Работа предоставляет законченный технологический контур: от отбора стресс-толерантного сырья через оптимизированную экстракцию к стандартизированному анализу. Разработанная методология позволяет создать отечественный биостимулятор для предпосевной обработки семян, повышающий всхожесть и устойчивость проростков к засухе и засолению.

Исследование вносит вклад в физиологию стресса и прикладную биотехнологию. Для завершения технологической цепочки необходимы масштабирование процесса и полевые испытания.

Список литературы

1. Эндогенные фиторегуляторы роста: свойства, физиологическое действие и практическое использование / А.П. Волынец и др. Волынца. – Минск: Беларуская навука, 2019. – 232 с.
2. Synthesis, characterization and biological studies of coordination compounds of silver complex of succinic acid / S. Kabdrakhmanova et al // Materials Today: Proceedings. – 2023. https://orcid.org/10.1016/j.matpr.2023.04.342.
3. Growth Stimulating and Fungicidal Properties of Succinic Acid Complexes with Silver, Copper and Boron Ions During Pre-Sowing Treatment of Soybean Seeds / S.K. Kabdrakhmanova et al // Engineered Science. – 2023. – Vol. 26, № 973. https://orcid.org/10.30919/es973.
4. Fungicidal and Stimulating Effects of Heteroleptic Copper Complex on the Germination and Phytosafety of Plants / S. Kabdrakhmanova et al // Journal of Composites Science. – 2023. – Vol. 7, № 308. https://orcid.org/10.3390/jcs7080308.
5. The Surprising Story of Fusicoccin: A Wilt-Inducing Phytotoxin, a Tool in Plant Physiology and a 14-3-3-Targeted Drug / M. Marra et al // Biomolecules. – 2021. – Vol. 11, № 9. – P. 1393. https://orcid.org/10.3390/biom11091393.
6. De Boer A.H. The fusicoccin story revisited / A.H. De Boer // Journal of Experimental Botany. – 2024. – Vol. 75, № 18. – P. 5531-5546. https://orcid.org/10.1093/jxb/erae300.
7. Plant-derived natural products as a new class of biostimulants: towards sustainable agriculture A. de Zélicourt et al // Natural Product Reports. – 2021. – Vol. 38, № 11. – P. 2027-2048. https://orcid.org/10.1039/D1NP00025A.
8. Fusicoccin-induced cell elongation and endogenous fusicoccin-like ligands in germinating seeds / O.V. Antipova et al // Plant Physiology and Biochemistry. — 2019. — Vol. 141. – P. 218-226. https://orcid.org/10.1016/j.plaphy.2019.05.025.
9. ГОСТ 12044-93. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения зараженности болезнями. – М.: Стандартинформ, 2011. – 10 с.
10. ГОСТ 12038-84. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести. – М.: Стандартинформ, 2011. – 40 с.
11. Чучалин В.С. Технология получения максимально очищенных препаратов: учеб. пособие / В.С. Чучалин, Н.В. Келус, В.В. Шейкин. – Томск: Изд-во СибГМУ, 2019. – 87 с.
12. Хроматографические методы очистки белков: учеб.-метод. пособие / А.Н. Ибрагимов и др. – Казань: КФУ, 2020. – 52 с.

13. Шаповалова Е.Н. Хроматографические методы анализа: метод. пособие для спецкурса / Е.Н. Шаповалова, А.В. Пирогов. – М.: Изд-во МГУ, 2018. – 210 с.
14. Пат. 23810 Республика Казахстан, МПК A01N 43 40. 63/00, 63/04. Способ получения фузикокцинового суперфитостимулятора для вегетативного размножения растений / С.А. Ибрагимова и др. – № 2010/0536.1; заявл. 27.04.10; опубл. 15.01.13, Бюл. № 1.

References

1. Ehndogennye fitoregulyatory rosta: svoistva, fiziologicheskoe deistvie i prakticheskoe ispol'zovanie / A.P. Volynets i dr. Volyntsa. – Minsk: Belaruskaya navuka, 2019. – 232 s. (In Russian).
2. Synthesis, characterization and biological studies of coordination compounds of silver complex of succinic acid / S. Kabdrakhmanova et al // Materials Today: Proceedings. – 2023. https://orcid.org/10.1016/j.matpr.2023.04.342. (In English).
3. Growth Stimulating and Fungicidal Properties of Succinic Acid Complexes with Silver, Copper and Boron Ions During Pre-Sowing Treatment of Soybean Seeds / S.K. Kabdrakhmanova et al // Engineered Science. – 2023. – Vol. 26, № 973. https://orcid.org/10.30919/es973. (In English).
4. Fungicidal and Stimulating Effects of Heteroleptic Copper Complex on the Germination and Phytosafety of Plants / S. Kabdrakhmanova et al // Journal of Composites Science. – 2023. – Vol. 7, № 308. https://orcid.org/10.3390/jcs7080308. (In English).
5. The Surprising Story of Fusicoccin: A Wilt-Inducing Phytotoxin, a Tool in Plant Physiology and a 14-3-3-Targeted Drug / M. Marra et al // Biomolecules. – 2021. – Vol. 11, № 9. – R. 1393. https://orcid.org/10.3390/biom11091393. (In English).
6. De Boer A.H. The fusicoccin story revisited / A.H. De Boer // Journal of Experimental Botany. – 2024. – Vol. 75, № 18. – P. 5531-5546. https://orcid.org/10.1093/jxb/erae300. (In English).
7. Plant-derived natural products as a new class of biostimulants: towards sustainable agriculture A. de Zélicourt et al // Natural Product Reports. – 2021. – Vol. 38, № 11. – P. 2027-2048. https://orcid.org/10.1039/D1NP00025A. (In English).
8. Fusicoccin-induced cell elongation and endogenous fusicoccin-like ligands in germinating seeds / O.V. Antipova et al // Plant Physiology and Biochemistry. — 2019. — Vol. 141. – P. 218-226. https://orcid.org/10.1016/j.plaphy.2019.05.025. (In English).
9. GOST 12044-93. Semena sel'skokhozyaistvennykh kul'tur. Metody opredeleniya zarazhennosti boleznyami. – M.: Standartinform, 2011. – 10 s. (In Russian).
10. GOST 12038-84. Semena sel'skokhozyaistvennykh kul'tur. Metody opredeleniya vskhozhesti. – M.: Standartinform, 2011. – 40 s. (In Russian).
11. Chuchalin V.S. Tekhnologiya polucheniya maksimal'no ochishchennykh preparatov: ucheb. posobie / V.S. Chuchalin, N.V. Kelus, V.V. Sheikin. – Tomsk: Izd-vo SibGMU, 2019. – 87 s. (In Russian).
12. Khromatograficheskie metody ochistki belkov: ucheb.-metod. posobie / A.N. Ibragimov i dr. – Kazan': KFU, 2020. – 52 s. (In Russian).
13. Shapovalova E.N. Khromatograficheskie metody analiza: metod. posobie dlya spetskursa / E.N. Shapovalova, A.V. Pirogov. – M.: Izd-vo MGU, 2018. – 210 s. (In Russian).
14. Pat. 23810 Respublika Kazakhstan, MPK A01N 43 40. 63/00, 63/04. Sposob polucheniya fuzikoktsinovogo superfitostimulyatora dlya vegetativnogo razmnozheniya rastenii / S.A. Ibragimova i dr. – № 2010/0536.1; zayavl. 27.04.10; opubl. 15.01.13, Byul. № 1. (In Russian).

Финансирование

Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № BR24993105).

Г.Т. Доланбаева[*], Қ.О. Богданова[1], В.Н. Николаева[2], С.К. Кабдрахманова[1]
[1]Satbayev University, 050013, Қазақстан Республикасы, Алматы қаласы, Қ. Сәтбаев көшесі, 22
[2]Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті,
070002, Қазақстан Республикасы, Өскемен қаласы, 30-Гвардиялық дивизия көшесі, 34
*e-mail: saia_26@mail.ru

ФУЗИКОКЦИННІҢ ЭНДОГЕНДІ БИОСТИМУЛЯТОРЫН АЛУ: БӨЛІНУ ТӘСІЛІ, ТИІМДІЛІГІН ТАЛДАУ ЖӘНЕ БАҒАЛАУ

Ауыл шаруашылығы дақылдарының абиотикалық және биотикалық күйзеліске төзімділігін арттыру үшін экологиялық қауіпсіз биостимуляторларды әзірлеу өзекті міндет болып табылады. Осы бапта бидай тұқымынан (Triticum aestivum L.) фузикокцин (FC) фитогормонын алу және қолдану технологиясын әзірлеу жөніндегі зерттеулердің нәтижелері ұсынылған. Жаздық бидайдың жеті сортына патогендерге (гельминтоспориоз, альтернариоз, бастиек) және абиотикалық стресске (тұздану, құрғақшылық, температуралық экстремумдар, сілтілеу, артық ылғалдану) төзімділікке кешенді бағалау жүргізілді. Стрессті жағдайларда өнгіштігі мен өсу энергиясын жоғары көрсеткен неғұрлым орнықты сорттар («Саратов», «Алтай», «Ульбинка 25») бөлінген. Тұқымдардағы стресс индукциясын, этанолмен экстракцияны, жоғары тиімді сұйықтық хроматографиясының (ВЭЖХ) кері-фазалық әдісімен тазартуды және спектрофотометрияның көмегімен сандық анықтауды қамтитын FC бөлу әдістемесі әзірленіп, оңтайландырылды. Әдісті валидациялау оның жоғары жаңғыртылуын (R ²> 0.998) және тұрақтылығын растады. Алынған нәтижелер бидай шығымдылығы мен күйзеліске төзімділігін арттыру мақсатында тұқымдарды себу алдында өңдеу үшін тиімді биостимулятор ретінде қолжетімді өсімдік шикізатынан алынған фузикокцинді пайдалану әлеуетін көрсетеді.

Түйін сөздер: *бидай, фузикокцин, биостимуляторлар, абиотикалық стресс, фитопатология, сұйық хроматография, тұқымдарды себу алдында өңдеу, стресске төзімділік.*

G.T. Dolanbaeva[*], K.O. Bogdanova[1], V.N. Nikolaeva[2], S.K. Kabdrakhmanova[1]
[1]Satbayev University, 22 Satpayev str., Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan
[2]Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University,
34, 30th Guards Division, Ust-Kamenogorsk, 070002, Republic of Kazakhstan
*e-mail: saia_26@mail.ru

PRODUCTION OF ENDOGENOUS BIOSTIMULANT OF FUSICOCCIN: METHOD FOR ISOLATION, ANALYSIS AND EVALUATION OF EFFICACY

Developing environmentally friendly biostimulants to increase crop resistance to abiotic and biotic stresses is an urgent challenge. This article presents the results of research on the development of technology for the production and use of phytohormone fusicoccin (FC) from wheat seeds (Triticum aestivum L.). A comprehensive assessment of seven varieties of spring wheat for resistance to pathogens (helminthosporiosis, alternariosis, smut) and abiotic stresses (salinity, drought, temperature extremes, latching, excessive moisture) was carried out. The most stable varieties («Saratov», «Altai», «Ulbinka 25») were identified, which showed high germination and germination energy under stressful conditions. A technique for FC isolation was developed and optimized, including stress induction in seeds, ethanol extraction, purification by reverse phase high performance liquid chromatography (HPLC), and quantification by spectrophotometry. The method validation confirmed its high reproducibility (R ²> 0.998) and stability. The results obtained demonstrate the potential of using fusicoccin obtained from available plant raw materials as an effective biostimulant for pre-sowing treatment of seeds in order to increase yield and stress resistance of wheat.

Key words: *wheat, fusicoccin, biostimulants, abiotic stress, phytopathology, liquid chromatography, presowing treatment of seeds, stress resistance.*

Сведения об авторах

Гүлсайын Тойкенқызы Доланбаева* – докторант, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, научный сотрудник лаборатории биологии и биотехнологии растений национальной научной лаборатории колективного пользования, Восточно-Казахстанский университет им. С. Аманжолова, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан; e-mail: saia_26@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0049-1511.

Валентина Николаевна Николаева – научный сотрудник лаборатории биологии и биотехнологии растений национальной научной лаборатории колективного пользования, Восточно-Казахстанский университет им. С. Аманжолова, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан; e-mail: valentina_nn23@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8887-7111.

Ксения Олеговна Богданова – докторант, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, научный сотрудник лаборатории биологии и биотехнологии растений национальной научной лаборатории колективного пользования, Восточно-Казахстанский университет им. С. Аманжолова, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан; e-mail: bogdanova.xeniya@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9318-6155.

Сана Канатбековна Кабдрахманова – руководитель Международного Research & Development (R&D) центра передовых функциональных материалов и их композитов кафедры химических процессов и промышленной экологии Казахского национального исследовательского технического университета имени К. Сатпаева, г. Алматы, Республика Казахстан; e-mail: skabdrakhmanova@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5760-2967.

Авторлар туралы мәліметтер

Гүлсайын Тойкенқызы Доланбаева* – Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті, докторанты, ұжымдық пайдаланудағы ұлттық ғылыми зертхананың өсімдіктер биологиясы және биотехнологиясы зертханасының ғылыми қызметкері, Шығыс Қазақстан университеті С. Аманжолов, Өскемен қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: saia_26@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0049-1511.

Валентина Николаевна Николаева – Қазақстан Республикасы, Өскемен қаласы, С. Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, ұжымдық пайдалану ұлттық ғылыми зертханасының өсімдіктер биологиясы және биотехнологиясы зертханасының ғылыми қызметкері; e-mail: valentina_nn23@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8887-7111.

Ксения Олеговна Богданова – докторанты, Қ.И.Сәтпаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті, ұжымдық пайдаланудағы ұлттық ғылыми зертхананың өсімдіктер биологиясы және биотехнологиясы зертханасының ғылыми қызметкері, Шығыс Қазақстан университеті С. Аманжолов, Өскемен қ., Қазақстан Республикасы, e-mail: bogdanova.xeniya@mail.ru. Web of Science Researcher ID - GZM-3036-2022. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9318-6155

Сана Канатбековна Кабдрахманова – Қ. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, химиялық процестер және өнеркәсіптік экология кафедрасы Озық функционалды материалдар мен олардың композиттері Research & Development халықаралық орталығының жетекшісі, Алматы қаласы, Қазақстан Республикасы; e-mail: skabdrakhmanova@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5760-2967.

Information about the authors

Gulsaiyn Toikenkyzy Dolanbayeva* – doctoral student, Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev, Researcher, Laboratory of Plant Biology and Biotechnology, National Scientific Laboratory of Collective Use, Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, city Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan; e-mail: saia_26@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0049-1511.

Valentina Nikolaevna Nikolaeva – Researcher at the Laboratory of Plant Biology and Biotechnology of the National Scientific Laboratory of Collective Use, Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan; e-mail: valentina_nn23@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8887-7111.

Xeniya Olegovna Bogdanova – doctoral student, Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpaev, Researcher, Laboratory of Plant Biology and Biotechnology, National Scientific Laboratory of Collective Use, Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk city, Republic of Kazakhstan; e-mail: bogdanova.xeniya@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9318-6155.

Sana Kanatbekovna Kabdrakhmanova – Head of the International Research & Development (R&D) Center for Advanced Functional Materials and Their Composites, Department of Chemical Processes and Industrial Ecology, K. Satpayev Kazakh National Research Technical University, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: skabdrakhmanova@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5760-2967.

Поступила в редакцию 30.03.2026
Поступила после доработки 05.06.2026
Принята к публикации 08.06.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-41

ҒТАХР: 65.59.29

CC BY 4.0
Check for updates

И.А. Махатова, А.У. Шингисов, А.Ж. Шиналиева*, Э.Т. Кансеитова, Г.Е. Коштаева
М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті,
160000, Қазақстан Республикасы, Шымкент қ., Тәуке хан даңғылы, 5
*e-mail: ainur_09_09@mail.ru

КОНФИТЮР ЖЕМІС-ЖИДЕК-КӨКӨНІСТІ ДЕСЕРТІНІҢ АНТИОКСИДАНТТЫ ШИКІЗАТЫ МЕН РЕОЛОГИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ

Аңдатпа: *Мақалада өсімдік шикізатының физика-химиялық сипаттамаларын, антиоксиданттық қасиеттері мен реологиялық параметрлерін, сондай-ақ оның негізінде жасалған "конфитюр" жеміс-көкөніс-жидек десертін зерттеу нәтижелері келтірілген. Зерттеу барысында мүкжидек, итмұрын, таңқурай, қауын, қара өрік және апельсин сияқты жемістер мен жидектерді*

©И.А. Махатова, А.У. Шингисов, А.Ж. Шиналиева, Э.Т. Кансеитова, Г.Е. Коштаева, 2026

қолдана отырып, табиғи қоректік заттармен және табиғи антиоксиданттармен байытылған екі конфитюр үлгісі зерттелді.

Зерттеудің негізгі мақсаты «конфитюр» функционалды жеміс-жидек-көкөністі десертін жасау кезінде антиоксиданттық белсенділігі жоғары өсімдік ингредиенттерін қолданудың орындылығын негіздеу болды. Сонымен қатар, олардың дайын өнімнің құрылымдық-механикалық қасиеттеріне әсері зерттелді. Жемістер, көкөністер мен жидектерге негізделген табиғи десерттердің ассортиментін кеңейту құрамында қант бар дәстүрлі тәтті тағамдарды тағамдық және биологиялық құндылығы жоғары тағамдармен алмастыру арқылы ұтымды тамақтануды жақсартады.

Табиғи қоректік заттармен және антиоксиданттармен байытылған конфитюр десертінің реологиялық қасиеттерін зерттеу барысында келесі негізгі реологиялық параметрлер эксперименталды түрде анықталды: тұтқырлық айналу моменті, сұйықтық, жабысқақтық және адгезия қабілеті. Реологиялық параметрлер өнімдердің органолептикалық қолайлылығына да, өнеркәсіптік өңдеу, орау және сақтау жағдайында олардың технологиялық бейімделуіне де айтарлықтай әсер ететіні белгілі.

Мақалада келтірілген реологиялық параметрлерді кешенді талдау нәтижелері № 2 конфитюрдің прототипі зерттелген нұсқалар арасында реологиялық сипаттамалардың ең қолайлы үйлесімін көрсететіндігін көрсетеді. Бұл оны технологиялық тұрғыдан оңтайлы деп санауға негіз береді.

Түйін сөздер: *конфитюр, өсімдік шикізаты, реологиялық сипаттамалары, антиоксиданттық қасиеттері, табиғи қоректік заттар.*

КІРІСПЕ

Соңғы жылдары Қазақстан Республикасы Үкіметінің жеміс-жидек дақылдарын өсірумен айналысатын шағын және орта шаруа қожалықтарын қолдауы нәтижесінде оларды өсіру алаңы жыл сайын ұлғаюда [1]. Бүгінгі таңда бізде де, шетелде де жеміс-жидек дақылдарынан түрлі десерттер өндіріледі. Маркетингтік зерттеулер көрсеткендей, адамдардың шамамен 80%-ы жеміс-жидек десерттерін пайдаланады [2]. Жеміс-жидек дақылдарынан алынған жемістер мен шырындар сияқты басқа тағамдармен салыстырғанда, халық жыл бойы тұрақты түрде тұтынады, бұл оң экономикалық фактор болып табылады [3, 4].

Қазіргі уақытта өсімдік тектес қоректік заттармен және табиғи антиоксиданттармен байытылған жеміс-жидек десерттерін өндіру сұранысқа ие. Алайда, қазіргі уақытта Қазақстанда оларды өндіруде инновациялық технологиялардың болмауына байланысты бұл мәселеге жеткілікті көңіл бөлінбеген. Сондықтан жеміс-жидек десерттерін өндіру технологиясын әзірлеу өзекті болып табылады, ал макро және микроэлементтерге, дәрумендерге, талшықтарға, десертке бай қосымша ингредиенттерді (қоректік заттар мен антиоксиданттар) енгізу жағымды хош иіс пен дәм береді және сол арқылы адам денсаулығына жағымды әсер етеді.

Жұмыста [5] «конфитюр» жеміс-көкөніс-жидек десертінің органолептикалық көрсеткіштері мен минералды құрамы зерттелді. Авторлар бұл өнімнің теңдестірілген органолептикалық қасиеттерімен сипатталатынын және құрамында минералдардың едәуір мөлшері бар екенін көрсетті, бұл оның тағамдық және биологиялық құндылығын және конфитюрді функционалды өнім ретінде пайдалану перспективасын растайды.

Жеміс-жидек-көкөніс десерттерінің (джем, конфитюр) реологиялық қасиеттері рецепт компоненттері мен технологиялық факторлардың күрделі өзара әрекеттесуі нәтижесінде қалыптасады. Зерттеулердің көпшілігінде бұл өнімдер ағымның ньютондық емес сипатына ие дисперсті гель тәрізді жүйелер ретінде қарастырылады [6].

Реологиялық сипаттамалардың қалыптасуында шешуші рөлді соңғы жылдары әмбебап функционалды гидроколлоид ретінде қарастырылатын пектин атқарады. Қазіргі шолуларға сәйкес, пектин гель құрылымын қалыптастырып қана қоймайды, сонымен қатар өнімнің тұтқырлығы, тұрақтылығы және текстуралық сипаттамалары сияқты параметрлерді анықтайды. Метоксилдену дәрежесіне байланысты пектин гельдердің әртүрлі түрлерін құрайды, бұл конфитюрдың реологиялық құрылымына тікелей әсер етеді [7].

Соңғы зерттеулердің нәтижелері [8] алма күнжарасы сияқты өсімдік компоненттерін енгізу гельдеу процестеріне және өнімнің реологиялық қасиеттеріне айтарлықтай әсер ететіндігін көрсетеді. Диеталық талшықтар мен қосымша пектиннің болуы гельдің құрылымын жақсартады және оның тұрақтылығын арттырады, бірақ температура мен өңдеу уақытына сезімталдық жоғары болып қалады.

Қазіргі заманғы жұмыстарда технологиялық факторлардың әсеріне ерекше назар аударылады. Сонымен, жылу өңдеудің температурасы мен ұзақтығы гельдің қалыптасу дәрежесін және оның кейінгі тұрақтылығын анықтайды. Температураның жоғарылауы молекулалардың қозғалғыштығының жоғарылауына және құрылымның ішінара бұзылуына байланысты тұтқырлықтың төмендеуіне әкеледі, бұл гидроколлоидты жүйелердің жылу сезімталдығы туралы қазіргі идеяларға сәйкес келеді [9].

Заманауи зерттеулер осы факторларды мақсатты түрде реттеуге бағытталған, бұл берілген текстуралық және функционалдық сипаттамалары бар өнімдерді алу үшін, бұл әсіресе инновациялық жеміс-жидек-көкөніс десерттерін әзірлеуде маңызды [10].

Бұл жұмыстың мақсаты конфитюр жеміс-жидек-көкөніс десертінің реологиялық қасиеттерін зерттеу және оның құрамдас құрамының құрылымдық-механикалық сипаттамаларына әсерін бағалау болып табылады.

Зерттеу объектілері мен әдістері

Зерттеу нысандары: табиғи нутриенттермен және табиғи антиоксиданттармен байытылған 2 конфитюр үлгісі.

1-кестеде жеміс-жидек-көкөністі десерті конфитюрдің рецептурасы көрсетілген.

Кесте 1 – Жеміс-жидек-көкөністі десерті конфитюрдің рецептурасы

№	Табиғи антиоксиданттармен байытылған конфитюр/100 г		Табиғи нутриенттері бар конфитюр/ 100 г	
1	Таңқурай	20,4	Сәбіз	14,5
2	Өрік	20,4	Зімбір тамыры	9,03
3	Мүкжидек	18,4	Апельсин	13,35
4	Итмұрын	5,2	Асқабақ	67,6
5	Қауын шырыны	29,5	Қауын шырыны	19,04
6	Агар-агар	2,0	Агар-агар	2,0

Конфитюр рецептерін әзірлеу кезінде жемістер, жидектер және көкөністер олардың функционалдық қасиеттерінің үйлесімділігіне, түстік, дәмдік және хош иістік көрсеткіштеріне сәйкес таңдалды.

Таңдалған шикізат биологиялық белсенді заттардың көзі болып табылады және көпфункционалды профилактикалық әсерді қамтамасыз етеді. Бұл шикізаттар экологиялық таза және біздің өңірде қолжетімді.

Зерттеу нәтижелері және олардың талдауы

Жемістердің химиялық құрамын зерттеу жүргізілді: қара өрік, апельсин және жидектердің әр түрлі сорттары: мүкжидек, итмұрын, таңқурай, қауын.

Зерттеу «Құрылымдық және биохимиялық материалдар» инженерлік профиліндегі аймақтық сынақ зертханасынада (ИРЛИП «ҚБМ») М.Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті базасында өткізілді.

Зерттеу нәтижелері 2-кестеде көрсетілген.

Кесте 2 – Жемістер мен жидектердің химиялық құрамы

Шикізаттар атауы	Химиялық құрамы, мг%						
	ақуыз	май	көмірсу	оңай сіңірілетін қанттар	органикалық қышқылдар	дубильді заттар	пектинді заттар
Мүкжидек	0,45	0,1	3,7	3,7	3,1	1,8	0,7
Таңқурай	0,8	0,5	8,3	11,0	1,3	2,0	0,6
Қауын	0,8	0,5	3,4	12,5	1,8	0,3	10,3
Өрік	0,8	0,3	9,6	9,5	1,0	0,12	0,88
Апельсин	0,9	0,2	8,1	8,1	1,3	0,11	0,68

2-кестеде келтірілген мәліметтерден зерттелген жидектер арасындағы ақуыз бен майдың құрамы бойынша таңқурай, қауын және мүкжидек жетекші орын алатынын, ал көмірсулардың ең көп мөлшері таңқурай, содан кейін мүкжидек пен қауын екенін көруге болады. Қауын құрамында оңай сіңетін қанттың көп мөлшері бар, ал таңқурайда бұл көрсеткіш 12% , ал мүкжидекте қауынға қарағанда 3,38 есе аз.

2-кестенің деректерін талдау көрсеткендей, органикалық қышқылдардың ең көп пайызы көрсетеді мүкжидек, содан кейін қауын және таңқурай болды. Зерттелген жидектерде дубильді заттардың мөлшері таңқурайда бірдей болды.

Жоғарыда айтылғандарға сүйене отырып, зерттелген жемістер мен жидектердің химиялық құрамы осы өсімдіктердің географиялық өсу орнына, топырақ құрамына және басқа факторларға байланысты деген қорытынды жасауға болады.

Сәбіз және асқабақтың физика-химиялық көрсеткіштерін зерттеу 3-кестеде келтірілген.

Кесте 3 – Асқабақтың, сәбіздің физикалық-химиялық көрсеткіштері

Көрсеткіштер	Сәбіз	Асқабақ
Құрғақ заттардың массалық үлесі, %	16,1	7,0
Қанттардың массалық үлесі, %	12,0	6,4
С витаминінің массалық үлесі, мг/100 г	8,8	10,3
Титрленетін қышқылдық, %	0,18	0,07
Пектин құрамы, %	1,4	1,0
Күлділігі, %	0,39	0,7

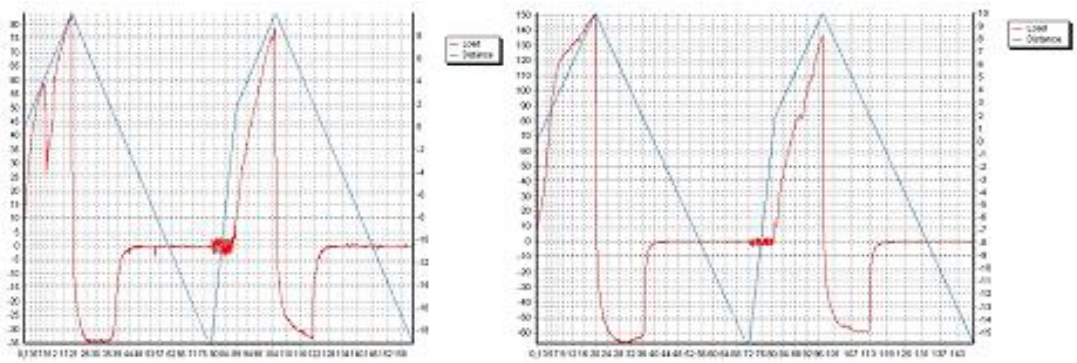
3-кестеде келтірілген мәліметтерді талдау зерттелген өнімдердің ішінде құрғақ заттардың массалық үлесінің ең жоғарысы сәбізде екенін көрсетті, ал асқабақта оның мөлшері 2, 3 есе төмен. Қанттардың массалық үлесін салыстырғанда, алдыңғы жағдайға қарағанда аздап өзгеше төмендеу байқалады. Мысалы, асқабақтағы қанттардың массалық үлесі сәбізге қарағанда 1,88 есе аз.

3-кестеде келтірілген деректерден С дәруменінің мөлшері (мг/100 г) асқабақта жоғары екені, ал сәбізде оның мөлшері төмен екені көрінеді. Мысалы, сәбізде 5,52 есе, ал асқабақта 4,72 есе жоғары.

Пектин мөлшері бойынша басқа көрініс байқалады: оның ең жоғары мөлшері сәбізде, ал асқабақта төмен.

Табиғи нутриенттер мен антиоксиданттармен байытылған аонфитюрлердің реологиялық сипаттамалары Қазақ тағам және қайта өңдеу өнеркәсібі ғылыми-зерттеу институты зертханалық базасында зерттелді.

Конфитюр үлгілерінің реологиялық сипаттамалары бойынша жүргізілген тәжірибелік зерттеулердің нәтижелері 1-суретте келтірілген, ал олардың сандық мәндері 4-кестеде берілген.



Сурет 1 – Конфитюрлердің реологиялық көрсеткіштерінің кестесі: а) № 1 үлгі; б) № 2 үлгі

Кесте 4 – Конфитюрлердің негізгі реологиялық параметрлері

№ р/с	Десерттік өнімнің тәжірибелік үлгілері	Тұтқырлығы, (с·Р)	Айналу моменті	Ағымдылық, ($Па^{-1}.с^{-1}$)	Жабысқақтық, (N)	Адгезия, (N·s)
Конфитюр						
1	№ 1	48290	96,6	0,0207	2,688	35
2	№ 2	49290	98,6	0,0203	0,487	60

Конфитюрлердің реологиялық қасиеттерін талдау № 2 үлгінің тұтқырлығы мен айналу моментінің мәндері № 1 үлгіге қарағанда 20,7%-ға жоғары екенін көрсетті. Бұл № 2 үлгінің құрылымдық тығыздығы мен қоюлығының анағұрлым жоғары екенін білдіреді.

Сонымен қатар, тұтқырлықтың кері көрсеткіші болып табылатын ағымдылық бойынша № 1 үлгі № 2 үлгімен салыстырғанда 19,7%-ға жоғары мән көрсетеді. Бұл нәтиже № 1 үлгінің қозғалтқыштығы жоғары әрі консистенциялық тұрақтылығы төмен екенін, яғни реологиялық тұрғыдан алғанда оның тұтқырлығы аз және ағымдылығы жоғары екенін көрсетеді.

Белгілі болғандай, жабысқақтық көрсеткіші өнімнің ерігіш құрғақ заттарының мөлшеріне, ылғалдылық деңгейіне, температурасына және тұтқырлығына байланысты қасиеттерін сипаттайды. Ол өнімнің қатты беттерге (мысалы қасыққа, ерінге, ыдысқа) жабысу дәрежесін және сенсорлық бағалау кезіндегі қабылданатын тұтқырлығын көрсетеді. Эксперименттік деректерге сәйкес, № 1 үлгінің жабысқақтығы № 2 үлгімен салыстырғанда 5,51 есе жоғары, бұл оның адгезиялық қасиеттерінің айқын екенін және инертті немесе биологиялық беттермен жанасу жағдайында құрылымдық-механикалық белсенділігінің жоғары екенін дәлелдейді.

Тағам өнімдерінің реологиялық қасиеттерін анықтайтын негізгі параметрлердің бірі-адгезия, яғни өнім мен қатты беттің арасындағы өзара әрекеттесу дәрежесін сипаттайтын көрсеткіш. Зерттеу нәтижелері бойынша, № 2 үлгінің адгезия көрсеткіші № 1 үлгіге қарағанда 1,71 есе жоғары екені анықталды. Бұл № 2 үлгінің жабысу қабілетінің жоғары екенін және жанасатын материалдармен беткі өзара әрекеттесуінің күштірек екенін көрсетеді.

Осылайша, кестелік түрде берілген реологиялық параметрлердің кешенді талдауы негізінде № 2 конфитюр үлгісі зерттелген нұсқалардың ішінде ең тиімді реологиялық қасиеттер жиынтығына ие екені анықталды, бұл оны технологиялық тұрғыдан оңтайлы деп қарастыруға мүмкіндік береді.

Қорытынды

Жүргізілген зертеулер негізінде таңдалған өсімдіктекті шикізаттар табиғи антиоксиданттар мен нутриенттер құрамы бойынша бір–бірін толықтыратыны және құрамында полифенолдар (антиоксиданттар) мен нутриенттер бар жеміс-жидек десерті-конфитюр өндіруге мүмкіндік беретіні анықталды.

Реологиялық зерттеулер конфитюрдің псевдопластикалық ағымдылық сипаттамалары бар тұтқыр-пластикалық құрылымданған жүйе екенін растады. Рецептуралық факторлардың тұтқырлық, ағымдылық, жабысқақтық және адгезия сияқты көрсеткіштерге елеулі әсер ететіні анықталды. Бұл мәліметтер өндірістің оңтайлы технологиялық режимдерін таңдауда практикалық маңызға ие. Алынған нәтижелер дұрыс тамақтануға арналған өнімдер ассортиментін кеңейту мақсатында жемістер, көкөністер мен жидектер негізінде жаңа функционалдық десерт түрлерін әзірлеуде қолданылуы мүмкін.

Әдебиеттер тізімі

1. Отчет о реализации Плана развития Министерства сельского хозяйства Республики Казахстан на 2023-2027 годы, утвержденного приказом Министра сельского хозяйства Республики Казахстан от 30 декабря 2022 года № 454.
2. Технология приготовления фруктового варенья // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. Эргашев Б.А. и др. – 2023. – № 3(108). https://7universum.com/ru/tech/archive/item/15175.
3. Effect of Pectin on the Quality Attributes and Phenolic Composition of Blackberry Jam from Wild and Cultivated Fruits at Different Altitudes / A. Veliu et al // Foods. – 2025. – № 14. – P. 3420. https://doi.org/10.3390/foods14193420.
4. Andreii Zahorulko, Aleksey Zagorulko, Bogdan Liashenko, and Irina Gordienko Improvement of the method for producing confitures BIO Web of Conferences 40, 02008 (2021) ILS 2021
5. Исследование органолептических показателей и минерального состава фруктово-ягодного десерта «конфитюр» / А.У. Шингисов и др. // Вестник Университета Шакарима. Серия технические науки. – 2025. – № 2(18). – P. 359-368. https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-2(18)-44.
6. Pectin as a rheology modifier: origin, structure, commercial production and rheology / S.Y. Chan et al // Carbohydrate Polymers. – 2017. – Vol. 161. – P. 118-139.
7. Pectin: A review with recent advances in the emerging revolution and multiscale evaluation approaches of its emulsifying characteristics / Yangyang Jia et al // Food Hydrocolloids. – 2024. – Vol. 157. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110428.
8. Viegas Â. Sustainable Jam with Apple Pomace: Gelling, Rheology, and Composition Analysis / Â. Viegas, M.J. Alegria, A. Raymundo // Gels. – 2024. – № 10. – P. 580. https://doi.org/10.3390/gels10090580.

9. Pathania S. Utilization of Fruits and Vegetable By-Products for Isolation of Dietary Fibres and Its Potential Application as Functional Ingredients / S. Pathania, N. Kaur // Bioact. Carbohydr. Diet. Fibre. – 2022. – № 27. – P. 100295.
10. Banaś A. Quality assessment of low-sugar jams enriched with plant raw materials exhibiting health-promoting properties / A. Banaś, A. Korus, M. Tabaszewska // Journal of food science and technology. – 2018. – Т. 55, № 1. – P. 408-417.

References

1. Otchet o realizatsii Plana razvitiya Ministerstva sel'skogo khozyaistva Respubliki Kazakhstan na 2023-2027 gody, utverzhdennogo prikazom Ministra sel'skogo khozyaistva Respubliki Kazakhstan ot 30 dekabrya 2022 goda № 454. (In Russian).
2. Tekhnologiya prigotovleniya fruktovogo varen'ya // Universum: tekhnicheskie nauki: ehlektron. nauchn. zhurn. Ehrgashev B.A. i dr. – 2023. – № 3(108). https://7universum.com/ru/tech/archive/item/15175. (In Russian).
3. Effect of Pectin on the Quality Attributes and Phenolic Composition of Blackberry Jam from Wild and Cultivated Fruits at Different Altitudes / A. Veliu et al // Foods. – 2025. – № 14. – R. 3420. https://doi.org/10.3390/foods14193420. (In English).
4. Andreii Zahorulko, Aleksey Zagorulko, Bogdan Liashenko, and Irina Gordienko Improvement of the method for producing confitures BIO Web of Conferences 40, 02008 (2021) ILS 2021. (In English).
5. Issledovanie organolepticheskikh pokazatelei i mineral'nogo sostava fruktovo-yagodnogo deserta «konfityur» / A.U. Shingisov i dr. // Vestnik Universiteta Shakarima. Seriya tekhnicheskie nauki. – 2025. – № 2(18). – R. 359-368. https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-2(18)-44. (In Russian).
6. Pectin as a rheology modifier: origin, structure, commercial production and rheology / S.Y. Chan et al // Carbohydrate Polymers. – 2017. – Vol. 161. – R. 118-139. (In English).
7. Pectin: A review with recent advances in the emerging revolution and multiscale evaluation approaches of its emulsifying characteristics / Yangyang Jia et al // Food Hydrocolloids. – 2024. – Vol. 157. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110428. (In English).
8. Viegas Â. Sustainable Jam with Apple Pomace: Gelling, Rheology, and Composition Analysis / Â. Viegas, M.J. Alegria, A. Raymundo // Gels. – 2024. – № 10. – R. 580. https://doi.org/10.3390/gels10090580. (In English).
9. Pathania S. Utilization of Fruits and Vegetable By-Products for Isolation of Dietary Fibres and Its Potential Application as Functional Ingredients / S. Pathania, N. Kaur // Bioact. Carbohydr. Diet. Fibre. – 2022. – № 27. – R. 100295. (In English).
10. Banaś A. Quality assessment of low-sugar jams enriched with plant raw materials exhibiting health-promoting properties / A. Banaś, A. Korus, M. Tabaszewska // Journal of food science and technology. – 2018. – Т. 55, № 1. – R. 408-417. (In English).

И.А. Махатова, А.У. Шингисов, А.Ж. Шиналиева*, **Э.Т. Кансеитова, Г.Е. Коштаева**
Южно-Казахстанский университет им.М.Ауэзова,
160000, Республика Казахстан г. Шымкент,пр.Тауке-хана,5
*e-mail: ainur_09_09@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ АНТИОКСИДАНТНОГО СЫРЬЯ И РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЛОДОВО-ЯГОДНО-ОВОЩНОГО ДЕСЕРТА КОНФИТЮР

В статье представлены результаты исследования физико-химических характеристик, антиоксидантных свойств и реологических параметров растительного сырья, а также плодово-овощного-ягодного десерта «конфитюр», созданного на его основе. В рамках исследования изучались два образца конфитюра, обогащённые натуральными нутриентами и природными антиоксидантами, с использованием таких плодов и ягод, как клюква, облепиха, малина, дыня, сливы и апельсин.

Основная цель исследования заключалась в обосновании целесообразности применения растительных ингредиентов с высокой антиоксидантной активностью при разработке функционального плодово-овощного-ягодного десерта «конфитюр». Кроме того, изучалось их влияние на структурно-механические свойства готового продукта. Расширение ассортимента натуральных десертов на основе фруктов, овощей и ягод способствует улучшению рационального питания за счёт замены традиционных сладких изделий, содержащих сахар, продуктами с повышенной пищевой и биологической ценностью.

В ходе проведённых исследований реологических свойств десерта конфитюр, обогащённого природными нутриентами и антиоксидантами, были экспериментально определены следующие основные реологические параметры: вязкость крутящийся момент, текучесть, липкости и адгезионной способности. Как известно, что реологические параметры оказывают значительное влияние, как на органолептическую приемлемость продуктов, так и на их технологическую адаптируемость в условиях промышленной переработки, фасовки и хранения.

Следовательно, результаты комплексного анализа реологических параметров, представленных в таблице, свидетельствуют о том, что опытный образец конфитюра № 2 демонстрирует наиболее благоприятное сочетание реологических характеристик среди исследованных вариантов. Это дает основания считать его технологически оптимальным.

Ключевые слова: *конфитюр, растительное сырье, реологические характеристики, антиоксидантные свойства, природные нутриенты.*

I.A. Makhatova, A.U. Shingisov, A.Zh. Shinaliyeva*, E.T. Kanseitova, G.Y. Koshtayeva
M.Auezov South Kazakhstan University,
160000, Shymkent, Republic of Kazakhstan,Tauke Khan avenue, 5
*e-mail: ainur_09_09@mail.ru

RESEARCH OF ANTIOXIDANT RAW MATERIALS AND RHEOLOGICAL PROPERTIES OF FRUIT, BERRY AND VEGETABLE DESSERT CONFITURE

The article presents the results of a study of the physico-chemical characteristics, antioxidant properties and rheological parameters of vegetable raw materials, as well as the fruit, vegetable and berry dessert "confiture", created on its basis. The study examined two jam samples enriched with natural nutrients and natural antioxidants, using fruits and berries such as cranberries, sea buckthorn, raspberries, melons, plums and oranges.

The main purpose of the study was to substantiate the expediency of using herbal ingredients with high antioxidant activity in the development of a functional fruit, vegetable and berry dessert "confiture". In addition, their effect on the structural and mechanical properties of the finished product was studied. The expansion of the range of natural desserts based on fruits, vegetables and berries contributes to the improvement of rational nutrition by replacing traditional sweet products containing sugar with products with increased nutritional and biological value.

In the course of studies of the rheological properties of dessert confiture, enriched with natural nutrients and antioxidants, the following main rheological parameters were experimentally determined: viscosity, torque, fluidity, stickiness and adhesive ability. It is known that rheological parameters have a significant impact on both the organoleptic acceptability of products and their technological adaptability in conditions of industrial processing, packaging and storage.

Consequently, the results of a comprehensive analysis of the rheological parameters presented in the table indicate that the prototype confiture No. 2 demonstrates the most favorable combination of rheological characteristics among the studied options. This gives reason to consider it technologically optimal.

Key words: *jam, vegetable raw materials, rheological characteristics, antioxidant properties, natural nutrients*.

Авторлар туралы мәліметтер

Индира Абайханқызы Махатова – а/ш ғылымдарының кандидаты, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, «Тоқыма және тамақ инженериясы» Жоғары мектебі, Шымкент, Қазақстан; e-mail: indiram@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-5441-9870.

Азрет Утебаевич Шингисов – техника ғылымдарының докторы, «Азық-түлік өнімдерінің технологиясы және қауіпсіздігі» кафедрасының профессоры, Шымкент,Қазақстан; e-mail: azret_utebai@mail.ru. ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0726-8232.

Айнұр Жандильдақызы Шиналиева* – докторант, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, «Тоқыма және тамақ инженериясы» жоғары мектебі, Шымкент, Қазақстан; e-mail: ainur_09_09@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-8656-0302.

Эльмира Тагаейевна Кансейтова – а/ш ғылымдарының кандидаты, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Тоқыма және тамақ инженериясы жоғары мектебі, Шымкент, Қазақстан; e-mail: kanseitova@bk.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8275-5786.

Гульшат Елтаевна Коштаева – «Азық-түлік өнімдерінің технологиясы және қауіпсіздігі» кафедрасының оқытушысы, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Тоқыма және тамақ инженериясы жоғары мектебі, Шымкент, Қазақстан; e-mail: gulk.1979@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-7802-7979.

Сведения об авторах

Индира Абаихановна Махатова – канд. с.-х. наук, Южно-Казахстанский университет имени М. Ауэзова, Высшая школа Текстильной и пищевой инженерии, Шымкент, Казахстан; e-mail: indiram@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-5441-9870.

Азрет Утебаевич Шингисов – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология и безопасность продовольственных продуктов», Высшая школа Текстильной и пищевой инженерии, Шымкент, Казахстан; e-mail: azret_utebai@mail.ru. ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0726-8232.

Айнур Жандильдаевна Шиналиева* – докторант, Южно-Казахстанский университет имени М. Ауэзова, Высшая школа Текстильной и пищевой инженерии, Шымкент, Казахстан; e-mail: ainur_09_09@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-8656-0302.

Эльмира Тагайевна Кансейтова – канд. с.-х. наук, Южно-Казахстанский университет имени М. Ауэзова, Высшая школа Текстильной и пищевой инженерии, Шымкент, Казахстан; e-mail: kanseitova@bk.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8275-5786.

Гульшат Елтаевна Коштаева – преподаватель кафедры «Технология и безопасность продовольственных продуктов», Южно-Казахстанский университет имени М. Ауэзова, Высшая школа Текстильной и пищевой инженерии, Шымкент, Казахстан; e-mail: gulk.1979@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-7802-7979.

Information about authors

Indira Makhatova – Candidate of Agricultural Sciences, M. Auezov South Kazakhstan University, Higher School of Textile and Food Engineering, Shymkent, Kazakhstan; e-mail: indiram@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-5441-9870.

Azret Shingisov – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Technology and Food Safety, Higher School of Textile and Food Engineering, Shymkent, Kazakhstan; e-mail: azret_utebai@mail.ru. ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0726-8232.

Ainur Shinaliyeva* – Doctoral student, M. Auezov South Kazakhstan University, Higher School of Textile and Food Engineering, Shymkent, Kazakhstan; e-mail: ainur_09_09@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-8656-0302.

Elmira Kanseitova – Candidate of Agricultural Sciences, M. Auezov South Kazakhstan University, Higher School of Textile and Food Engineering, Shymkent, Kazakhstan; e-mail: kanseitova@bk.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8275-5786.

Gulshat Koshtayeva – Lecturer at the Department of Technology and Food Safety, M. Auezov South Kazakhstan University, Higher School of Textile and Food Engineering, Shymkent, Kazakhstan; e-mail: gulk.1979@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-7802-7979.

Редакцияға енуі 30.03.2026
Жариялауға қабылданды 28.05.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-42

МРНТИ: 65.63.37

CC BY 4.0
Check for updates

Ф.Х. Смольникова*, Б.К. Асенова, Э.К. Окусханова, Ш.К. Жакупбекова, А.С.Камбарова
Шәкәрім университет
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А
*e-mail: smolnikovafarida@mail.ru

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ СВЕЖЕГО СЫРА ИЗ КОЗЬЕГО МОЛОКА С ПАПРИКОЙ, ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА

Аннотация: *В данной статье рассматривается технология производства «Домашний сыр» из козьего молока с паприкой. Козье молоко является востребованным сырьем для производства сыров. Особенностью нового сыра является применение мезофильной симбиотической закваски, состоящих из культур Lactococcus lactis subsp. lactis и Lactococcus lactis subsp. cremoris, полученный сыр не предназначен для длительного хранения, относится к группе свежих сыров. Применение выбранной закваски обеспечивает интенсивное развитие молочнокислых микроорганизмов и формирование стабильной структуры сырного сгустка. Особенностью сыра является использование сладкой красной паприки для обсыпки поверхности*

©Ф.Х. Смольникова, Б.К. Асенова, Э.К. Окусханова, Ш.К. Жакупбекова, А.С.Камбарова, 2026

сыра. Готовый продукт характеризуется оптимальными физико-химическими показателями, а также выраженными органолептическими свойствами. Содержание влаги составляет 50,4%, белка 29,3%, жира в сухом веществе 43,8% и лактозы 0,8%. Для получения 1 кг сыра расходовалось 10,7 литров молока, что говорит о хорошем стабильном выходе. Микробиологические исследования подтвердили отсутствие БГКП, дрожжей, плесеней и спор анаэробных микроорганизмов рода Clostridium, при высоком уровне полезной молочнокислой микрофлоры, соответствующем требованиям ТР ТС 033/2013. Полученные результаты свидетельствуют о безопасности, высоком качестве и технологической эффективности производства сыра из козьего молока.

Ключевые слова: *сыр козий, закваска мезофильная, сквашивание, пастеризация, посолка.*

Поголовье коз во всем мире растет, и сектор молочного животноводства развивается соответствующим образом. Хотя новые технологии, применяемые в животноводстве, внедряются медленно из-за преобладания традиционной подсекции в молочном секторе, за последнее десятилетие были достигнуты значительные успехи [1].

Технологические инновации в настоящее время направлены на решение проблем, связанных с консистенцией, качеством и ожиданиями потребителей. Новые технологии посолки и упаковки увеличивают срок хранения, новые закваски повышают безопасность сыра. Кроме того, использование дополнительных культур, нетермическая и термическая обработка способствуют улучшению вкусовых качеств и питательных свойств. Хотя эти инновации модернизируют производство, они могут изменить традиционные характеристики, что подчеркивает необходимость оптимизации процесса [2].

Так Matibayeva A. оптимизированы режимы производства и доказана целесообразность использования бактериальной закваски и препарата для рассольных сыров, состоящего из солеустойчивых штаммов мезофильных молочнокислых стрептококков и палочки L.casei. Это позволяет интенсифицировать микробиологические и биохимические процессы и ускорить созревание сыров в 2 раза [3].

Одним из наиболее производимых и потребляемых традиционных видов козьего сыра является свежий козий сыр [4].

Ориентация потребителей на здоровое питание повышает спрос на сыры ручной работы, приготовленные из сырого козьего молока. Производство таких сыров как правило осуществляется на небольших эко-фермах, что обеспечивает уникальность их микробиологического состава [5].

В данной статье будут рассмотрены технологические аспекты производства «Домашнего сыра» из козьего молока с паприкой, относящегося к свежим сырам.

Методы исследования

Исследования козьего молока осуществляли на приборе Лактан 4. Для исследования сыра и заквасок использовали методики, приведенные ниже.

Кислотность определяли титриметрическим методом ГОСТ 3624-92 [6].

Определение осуществляется путём нейтрализации кислот и кислых солей, присутствующих в анализируемом образце, с использованием раствора гидроксида натрия стандартной концентрации. Процесс проводят в присутствии индикатора фенолфталеина.

Для выполнения анализа в колбу конической формы объемом 100-250 см³ помещают 10 см³ исследуемого продукта и добавляют 20 см³ дистиллированной воды. После этого в смесь вводят 3-5 капель 1%-ного спиртового раствора фенолфталеина.

Компоненты тщательно перемешивают и проводят титрование раствором гидроксида натрия нормальностью 0,1 н до тех пор, пока не появится слабая розовая окраска, сохраняющаяся не менее одной минуты.

Результат выражают в градусах Тернера (°Т). Для расчёта кислотности количество миллилитров использованного 0,1 н раствора NaOH, затраченного на титрование 10 см³ образца, умножают на коэффициент 10.

Математическая модель расчёта выглядит следующим образом (формула 1):

$$К=V\times10 \quad (1)$$

где:

К – кислотность продукта, °Т;

V – объем 0,1 н раствора гидроксида натрия, израсходованный на титрование, см³.

За окончательный результат принимали среднее арифметическое значение двух параллельных определений. Расхождение между параллельными определениями не должно превышать значений, установленных ГОСТ 3624-92.

Количество pH определяли потенциометрическим методом на приборе pH-150МИ.

Плотность молока определяли ареометрическим методом ГОСТ 3625-84 [7], массовая доля жира определялась кислотным методом Гербера по ГОСТ 5867-90 [8], массовая доля белка определялась методом Кьельдаля по ГОСТ 25179-2014 [9], массовую доля сухих веществ определяли высушиванием по ГОСТ 3626-73 [10], бактериальную обсеменённость определяли микробиологическим методом по ГОСТ 32901-2014 [11].

Обработку экспериментальных данных проводили методом однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA). Результаты представлены в виде средних значений и стандартных отклонений. Статистически значимыми считали различия при $p < 0,05$.

Результаты исследований

Для производства «Домашний сыр» было использовано козье молоко, химический состав молока представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав козьего молока

Показатели	Значение
Сухое вещество, %	13,2±0,1
СОМО, %	9,6±0,2
Жир, %	3,6±0,3
Белок, %	3,6±0,2
Лактоза, %	5,0±0,1
Зола, %	1,0±0,1

Используемое молоко было исследовано на сыропригодность и показатели безопасности, данные приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Сыропригодность молока-сырья и показатели пищевой безопасности

Показатель	Фактические показатели	Требования ТР ТС 033/2013
Плотность, кг/м^3	1029,0±0,15	Не менее 1027,0
Титруемая кислотность, °Т	17,0±0,5	От 16,0 до 21,0
Количество соматических клеток, тыс. клет./см^3	210±03	Не более 750
Ингибирующие вещества	Отсутствуют	Не допускаются
Антибиотики	Отсутствуют	Не допускаются
Сычужная проба, класс	I	
КМАФАнМ, КОЕ/см3	(4,6±0,3)·104	Не более 5·105
Дрожжи, КОЕ/см3	(2±0,1)·101	Не нормируется
Патогенные МО, в том числе сальмонеллы, в 25 г	Не обнаружены	Не допускаются

Результаты микробиологических анализов молочной смеси до внесения производственной закваски, представленные в таблице 2, свидетельствуют о том, что показатели молочной смеси для выработки сыра полностью соответствовали показателям безопасности. Споровые микроорганизмы, способные оказать влияние на качество сыра, выявлены в допустимом количестве. Показатели КМАФАнМ отвечают требованиям безопасности, а исходное количество микроорганизмов в молочной смеси соответствует требуемому уровню.

Для производства сыра была выбрана мезофильная закваска прямого внесения в состав которой входили: Lactococcus lactis subsp. lactis, Lactococcus lactis subsp. cremoris (фирма изготовитель «Полезная партия», Россия).

Расход закваски составлял: 1 гр на 50 л молока, нормируемый выход сыра: 10 % (от 5 кг сыра с 50 л молока).

Перед использованием закваска была исследована на показатели безопасности, данные представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Показатели безопасности молочнокислой закваски

Микроорганизмы	Фактическое значение	Требования ТР ТС 033/2013
КМАФАнМ, КОЕ/г, ед. АК, не менее	1х109	не нормируется (для заквасок допускается высокий уровень молочнокислой микрофлоры, ≥1×10⁹)
БГКП, масса (г), в которой не допускается	Не обнаружено	не допускаются в 0,1 г
Плесени и дрожжи, КОЕ/г, ед. АК, в сумме не более	Не обнаружено	не более 100 КОЕ/г
S. aureus, масса (г), в которой не допускается	Не обнаружено	не допускается в 1,0 г
Сальмонелла, масса (г), в которой не допускается	Не обнаружено	не допускается в 25 г
Listeria spp.	Не обнаружено	не допускается в 25 г

Для улучшения качества козьего молока для сыроделия применялась термизация молока при 63-65 °С в течении 20-25 мин с последующей пастеризацией при 72 °С в течение 20-25 сек.

Качественные показатели закваски приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Качественные показатели закваски

Наименования показателей	Значение
Титруемая кислотность,Т	100-110
Наличие углекислоты, см	2,1-2,22
Наличие диацетила +ацетоина, мин	8-9
Общее количество клеток, в 1 $см^3$	1,4- 1,9 х 109
Микропрепарат	кокки, диплококки, цепочки кокков, палочки
Органолептическая оценка	чистый кисломолочный

Технологию изготовления «Домашний сыр» из козьего молока с паприкой осуществляли по следующей схеме: молоко пастеризовали при температуре 73°С при интенсивном перемешивании в течении 30 секунд, далее вносили закваску, выдерживали смесь 30-60 минут при температуре 34°С, периодически перемешивая, после вносили сычужный фермент. Свёртывание осуществляли в течении 60-80 минут, дожидаясь отделения сгустка от сыворотки. Полученный сгусток нарезали на квадратики со стороной 2,5 см, оставляли их на 10 минут в ванне, чтобы разрезанный сгусток немного уплотнился и сыворотка отделилась. Полученное зерно вымешивали в течении 20 минут, поддерживали температуру 32 °С. Готовое зерно выгружали в форму застеленное салфеткой (марлей). По мере уплотнения дополняли форму сырным зерном.

Полученную массу выдерживали в форме 1-2 ч до уплотнения сгустка в плотную головку. Переворачивали сыр в течение 3 часов. В результате образовалась головка сыра. Готовый сыр оставляли на 10-12 часов, обтирали солью, обваливали в красной молотой паприке и оставляли сыр подсушиваться. Готовый сыр хранили при температуре 2-8°С не более 5 дней. Готовый продукт рекомендуется употреблять в свежем виде.

Обсуждение научных исследований

В процессе производства сыра были изучены технологические аспекты его производства и качественные показатели.

Было исследовано влияние закваски на технологические показатели производства сыра, в таблице 5 представлены результаты.

Представленные данные свидетельствуют о том, что используемая закваска обеспечила стабильное протекание технологического процесса производства «Домашний сыр» из козьего молока с паприкой. Для выработки продукта было использовано 5,545 кг нормализованной смеси с массовой долей жира 2,73%, что соответствует требованиям к сырью для производства мягких сыров.

Таблица 5 – Влияние закваски на технологические показатели производства сыра «Домашний сыр» из козьего молока с паприкой

Показатели	Значение
Количество нормализованной смеси, кг	5,545±0,010
Массовая доля жира нормализованной смеси, %	2,73±0,01
Продолжительность свёртывания, мин.	35±1
Титруемая кислотность при разрезке сгустка, ºТ Активная кислотность сыворотки при разрезке сгустка (pH)	12±0,02 6,38±0,01
Титруемая кислотность сыворотки в конце обработки сырного зерна, ºТ Активная кислотность сыворотки в конце обработки сырного зерна(pH)	13º ±0,01 6,10±0,01
Продолжительность самопрессования, мин.	180±1

Продолжительность свертывания составила 35 минут, что указывает на высокую активность молочнокислых микроорганизмов и эффективное действие сычужного фермента. Полученное время коагуляции находится в оптимальных пределах для производства домашних и мягких сыров, обеспечивая формирование плотного и упругого сгустка.

В таблице 6 показаны изменение физико-химических показателей сыра в процессе его производства.

Таблица 6 – Физико-химические показатели «Домашний сыр» из козьего молока с паприкой

Показатели	Значение
Масса сыра после прессования, кг	0,514±0,010
Затраты сырья на единицу продукции, кг	10,7±0,1
Кислотность отпрессованного сыра (pH)	5,47±0,02
Массовая доля влаги в отпрессованном сыре, %	51,3±0,03
Массовая доля жира в сухом веществе сыра, %	43,8±0,1
Массовая доля влаги в готовом продукте, %	50,4±0,1
pH в готовом продукте	5,4±0,1

Затраты сырья на единицу продукции составили 10,7 кг молока на 1 кг сыра, что соответствует особенностям производства мягких сыров из козьего молока. Данный показатель обусловлен содержанием сухих веществ в исходном сырье и степенью удаления влаги в процессе обработки сырной массы.

Кислотность отпрессованного сыра составила pH 5,47, а в готовом продукте – pH 5,4. Незначительное снижение значения pH в процессе созревания и хранения свидетельствует о продолжающейся активности молочнокислой микрофлоры и стабильном протекании биохимических процессов. Данный уровень кислотности способствует формированию характерного вкуса и повышению микробиологической безопасности продукта.

Массовая доля влаги в отпрессованном сыре составила 47,3%, а в готовом продукте – 46,5%. Незначительное уменьшение содержания влаги связано с дальнейшим обезвоживанием продукта в процессе хранения. Полученные значения характерны для мягких сыров и обеспечивают нежную, пластичную консистенцию.

В таблице 7 показана органолептическая оценка «Домашний сыр» из козьего молока с паприкой.

Таблица 7 – Органолептическая оценка «Домашний сыр» из козьего молока с паприкой

Вкус, запах	Консистенция, плотность
Вкус и запах – выраженный сырный специфический для козьего сыра, без посторонних привкусов и запахов	Тесто нежное, пластичное, однородное по всей массе. На разрезе сыр имеет глазки округлой формы, равномерно расположенные по всей массе сыра, верх сыра окружен слоем красной сладкой молотой паприки

По результатам органолептической оценки «Домашний сыр» из козьего молока характеризуется гармоничными вкусовыми и ароматическими свойствами, нежной пластичной консистенцией и привлекательным внешним видом. Полученные показатели свидетельствуют о высоком качестве продукта и его хороших потребительских характеристиках.

В таблице 8 показаны микробиологические показатели «Домашнего сыра» из козьего молока с паприкой.

Таблица 8 – Микробиологические показатели «Домашнего сыра» из козьего молока с паприкой после самопрессования

Показатели	КМАФАнМ, КОЕ/г	БГКП, в 1 г	Дрожжи, КОЕ/г	Плесневые грибы, КОЕ/г	Споры анаэробных микроорганизмов рода Clostridium, спор/г
Значение	(2,8±0,2)* 109	не обнаружены	не обнаружены	не обнаружены	не обнаружены
Требования ТР ТС 033/2013	не нормируется (для заквасочных продуктов допускается высокий уровень молочнокислой микрофлоры)	не допускаются в 0,1 г	не более 100 КОЕ/г	не более 100 КОЕ/г	не допускаются в 0,01 г

Количество мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов (КМАФАнМ) составило (2,8±0,2)*10⁹ КОЕ/г. Полученные данные свидетельствует об активном развитии заквасочной микрофлоры и интенсивном протекании процессов молочнокислого брожения. Это способствует формированию характерных органолептических свойств сыра, повышению его биологической ценности и устойчивости к развитию нежелательной микрофлоры.

Высокое содержание полезной молочнокислой микрофлоры при полном отсутствии санитарно-показательных и патогенно опасных микроорганизмов свидетельствует о правильном подборе закваски и соблюдении технологического режима производства.

Результаты показывают, что общее количество клеток молочнокислой микрофлоры находится на достаточно высоком уровне.

В таблице 9 приведён химический состав и физико-химические показатели «Домашнего сыра» из козьего молока после самопрессования.

Таблица 9 – Химический состав «Домашнего сыра» из козьего молока после самопрессования

Массовая доля влаги, %	Массовая доля жира в сухом веществе,%	Массовая доля лактозы, %	Массовая доля белка,%
50,4±0,4	43,8±0,1	0,8±0,11	29,3±0,35

Данные таблицы 9 показывают, что после процесса самопрессования «Домашний сыр» характеризуется сбалансированным химическим составом и высокой пищевой ценностью.

Массовая доля влаги составила 50,4±0,4 %, что соответствует характеристикам мягких сыров. Такое содержание влаги обеспечивает продукту нежную консистенцию, хорошую пластичность и благоприятные органолептические свойства.

Жировая фаза играет важную роль в формировании текстуры сыра и служит источником жирорастворимых витаминов и незаменимых жирных кислот.

Большая часть лактозы была израсходована во время приготовления сыра и ее количество стало незначительным. «Домашний сыр» из козьего молока после самопрессования характеризуется высоким содержанием белка, умеренным количеством жира и низким уровнем остаточной лактозы. Полученные показатели свидетельствуют об эффективном протекании процессов свертывания и молочнокислого брожения.

В таблице 10 приведено изменение КМАФАнМ в процессе выработки «Домашнего сыра» из козьего молока с паприкой.

Таблица 10 – Изменение микрофлоры в процессе выработки и созревания «Домашнего сыра» из козьего молока с паприкой

Стадии контроля	КМАФАнМ, КОЕ/г
Смесь пастеризованная	(1±0,1)*104
Смесь с закваской	(1,8±0,1)*108
Зерно обработанное	(1,9±0,1)*108
Сыр после самопрессования	(2,8±0,1)*109
Сыр после посолки сухой солью	(2,7±0,1)*109
Сыр после посолки и хранения в течение 12 час	(6,9±0,1)*108

Данные таблицы 10 отражают динамику развития микрофлоры на различных этапах производства «Домашний сыр» из козьего молока.

В пастеризованной смеси количество КМАФАнМ составило 1,0×104 КОЕ/г, что обусловлено сохранением термоустойчивой микрофлоры после пастеризации.

После внесения закваски количество микроорганизмов увеличилось до 1,8×10⁸ КОЕ/г, что связано с активизацией роста молочнокислых бактерий. На стадии обработки сырного зерна численность микрофлоры возросла до 1,9×10⁸ КОЕ/г, что подтверждает интенсивное протекание процессов молочнокислого брожения и накопление молочной кислоты.

Наибольшее количество микроорганизмов было отмечено в сыре после самопрессования – 2,8×10⁹ КОЕ/г. После сухой посолки содержание микроорганизмов практически не изменилось и составило 2,7×10⁹ КОЕ/г. Незначительное снижение численности клеток объясняется началом воздействия поваренной соли, которая оказывает умеренное ингибирующее действие на микроорганизмы.

На стадии хранения после посолки в течение 12 часов количество КМАФАнМ снизилось до 6,9×10⁸ КОЕ/г. Уменьшение численности микрофлоры обусловлено повышением осмотического давления вследствие присутствия соли, а также изменением условий среды в процессе хранения.

Таким образом, в процессе производства «Домашний сыр» из козьего молока с паприкой наблюдается закономерное увеличение численности молочнокислой микрофлоры от 1,0×104 до 6,9х108 КОЕ/г, что свидетельствует об эффективной работе заквасочных культур.

Заключение

Проведённые исследования в технологии «Домашний сыр» из козьего молока с паприкой обеспечивает получение продукта высокого качества с хорошими органолептическими, физико-химическими и микробиологическими показателями.

Применение заквасочной культуры на основе Lactococcus lactis subsp. lactis и Lactococcus lactis subsp. cremoris способствовало активному протеканию молочнокислого процесса, оптимальному свертыванию молока и формированию плотного сырного сгустка, наблюдалось закономерное увеличение численности молочнокислой микрофлоры, что положительно повлияло на формирование структуры, вкуса и аромата сыра.

Микробиологические исследования подтвердили безопасность сыра. Высокое содержание полезной молочнокислой микрофлоры обеспечивает стабильность продукта и способствует формированию его качественных характеристик.

Технология производства сыра «Домашний» из козьего молока позволяет получать безопасный и конкурентоспособный продукт с высокими органолептическими показателями, хорошей пищевой ценностью и стабильными качественными характеристиками и открывает возможности для расширения ассортимента и дальнейшего изучения его свойств.

Список литературы

1. Sepe L. Recent advances in dairy goat products / L. Sepe, A. Argüello // Asian-Australasian journal of animal sciences. – 2019. – Т. 32, № 8 Suppl. – P. 1306.

2. Technological Advances in Feta Cheese Manufacture: Bridging Traditional Processes and Modern Innovations / H. Rose et al // International Dairy Journal. – 2026. – P. 106627.

3. Investigation of the Effect of Technological Processing on the Quality of Goat's Milk Cheese / A. Matibayeva et al // Current Research in Nutrition and Food Science Journal. – 2022. – Т. 10, № 1. – P. 213-220.
4. Manufacture and some properties of Turkish fresh goat cheese / S. Kılıç et al // Pakistan Journal of Biological Sciences. – 2004. – Т. 7, № 6. – P. 1037-1039.
5. Microbiological changes in craft hard cheeses from raw goat milk during ripening with the use of mites Acarus siro / V. Davydovych et al // Scifood. – 2025. – Т. 19. – P. 176-191.
6. ГОСТ 3624-92. Молоко и молочные продукты. Титриметрические методы определения кислотности. – Москва : Издательство стандартов, 1992. – 8 с.
7. ГОСТ 3625-84. Молоко и молочные продукты. Методы определения плотности. – Москва: Издательство стандартов, 1984. – 14 с.
8. ГОСТ 5867-90. Молоко и молочные продукты. Методы определения жира. – Москва: Издательство стандартов, 1990. – 11 с.
9. ГОСТ 25179-2014. Молоко и молочные продукты. Методы определения массовой доли белка. – Москва : Стандартинформ, 2015. – 12 с.
10. ГОСТ 3626-73. Молоко и молочные продукты. Методы определения влаги и сухого вещества. – Москва : Издательство стандартов, 1973. – 10 с.
11. ГОСТ 32901-2014. Молоко и молочная продукция. Методы микробиологического анализа. – Москва: Стандартинформ, 2015. – 24 с.

References

1. Sepe L. Recent advances in dairy goat products / L. Sepe, A. Argüello // Asian-Australasian journal of animal sciences. – 2019. – Т. 32, № 8 Suppl. – R. 1306. (In English).
2. Technological Advances in Feta Cheese Manufacture: Bridging Traditional Processes and Modern Innovations / H. Rose et al // International Dairy Journal. – 2026. – R. 106627. (In English).
3. Investigation of the Effect of Technological Processing on the Quality of Goat's Milk Cheese / A. Matibayeva et al // Current Research in Nutrition and Food Science Journal. – 2022. – Т. 10, № 1. – R. 213-220. (In English).
4. Manufacture and some properties of Turkish fresh goat cheese / S. Kılıç et al // Pakistan Journal of Biological Sciences. – 2004. – Т. 7, № 6. – R. 1037-1039. (In English).
5. Microbiological changes in craft hard cheeses from raw goat milk during ripening with the use of mites Acarus siro / V. Davydovych et al // Scifood. – 2025. – Т. 19. – R. 176-191. (In English).
6. GOST 3624-92. Moloko i molochnye produkty. Titrimetricheskie metody opredeleniya kislotnosti. – Moskva : Izdatel'stvo standartov, 1992. – 8 s. (In Russian).
7. GOST 3625-84. Moloko i molochnye produkty. Metody opredeleniya plotnosti. – Moskva: Izdatel'stvo standartov, 1984. – 14 s. (In Russian).
8. GOST 5867-90. Moloko i molochnye produkty. Metody opredeleniya zhira. – Moskva: Izdatel'stvo standartov, 1990. – 11 s. (In Russian).
9. GOST 25179-2014. Moloko i molochnye produkty. Metody opredeleniya massovoi doli belka. – Moskva : Standartinform, 2015. – 12 s. (In Russian).
10. GOST 3626-73. Moloko i molochnye produkty. Metody opredeleniya vlagi i sukhogo veshchestva. – Moskva : Izdatel'stvo standartov, 1973. – 10 s. (In Russian).
11. GOST 32901-2014. Moloko i molochnaya produktsiya. Metody mikrobiologicheskogo analiza. – Moskva: Standartinform, 2015. – 24 s. (In Russian).

Ф.Х. Смольникова*, Б.К. Асенова, Э.К. Окусханова, Ш.К. Жакупбекова, А.С. Камбарова
Шәкәрім университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинки көшесі, 20 А
*e-mail: smolnikovafarida@mail.ru

ПАПРИКА ҚОСЫЛҒАН ЕШКІ СҮТІНЕН ДАЙЫНДАЛАТЫН ЖАҢА ІРІМШІК ТЕХНОЛОГИЯСЫН ӘЗІРЛЕУ ЖӘНЕ ӨНДІРІСТІҢ ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ ПРОЦЕСТЕРІН ЗЕРТТЕУ

Бұл мақалада паприка қосылған ешкі сүтінен дайындалатын «үй ірімшігін» өндіру технологиясы қарастырылған. Ешкі сүті ірімшік өндіруге кеңінен қолданылатын құнды шикізат болып табылады. Жаңа ірімшіктің ерекшелігі – құрамында Lactococcus lactis subsp. lactis және

Lactococcus lactis subsp. cremoris дақылдары бар мезофильді симбиотикалық ашытқыны пайдалану. Алынған өнім ұзақ мерзім сақтауға арналмаған және жаңа піскен ірімшіктер тобына жатады.

Таңдалған ашытқыны қолдану сүтқышқылды микроорганизмдердің қарқынды дамуын және ірімшік ұйындысының тұрақты құрылымының қалыптасуын қамтамасыз етеді. Ірімшіктің тағы бір ерекшелігі – оның бетіне тәтті қызыл паприка себіледі. Дайын өнім оңтайлы физика-химиялық көрсеткіштерімен және айқын органолептикалық қасиеттерімен сипатталады. Өнімдегі ылғал мөлшері – 50,4 %, ақуыз – 29,3 %, құрғақ затқа шаққандағы май үлесі – 43,8 %, лактоза мөлшері – 0,8 %.

1 кг ірімшік өндіру үшін 10,7 л сүт жұмсалды, бұл өнім шығымының тұрақты және жоғары деңгейін көрсетеді. Микробиологиялық зерттеулер нәтижесінде ішек таяқшалары тобы бактерияларының (ІТТБ), ашытқылардың, зеңдердің және Clostridium туысына жататын анаэробты микроорганизмдер спораларының болмауы анықталды. Сонымен қатар, пайдалы сүтқышқылды микрофлораның жоғары деңгейі КО ТР 033/2013 талаптарына сәйкес екендігі расталды.

Зерттеу нәтижелері ешкі сүтінен өндірілген ірімшіктің қауіпсіздігін, жоғары сапасын және технологиялық тиімділігін дәлелдейді.

Түйін сөздер: *ешкі ірімшігі, мезофильді ашытқы, ашыту, пастерлеу, тұздау.*

F.H. Smolnikova*, B.K. Asenova, E.K. Okuskhanova, Sh.K. Zhakupbekova, A.S. Kambarova
Shakarim University,
071412, Republic of Kazakhstan, Semey, 20 Glinki St., 20 A
*e-mail: smolnikovafarida@mail.ru

This article discusses the technology for producing "Homemade Cheese" from goat's milk with paprika. Goat's milk is a highly demanded raw material for cheese production. A distinctive feature of the new cheese is the use of a mesophilic symbiotic starter culture consisting of Lactococcus lactis subsp. lactis and Lactococcus lactis subsp. cremoris. The resulting cheese is not intended for long-term storage and belongs to the group of fresh cheeses.

The selected starter culture ensures intensive growth of lactic acid microorganisms and the formation of a stable cheese curd structure. Another characteristic feature of the cheese is the use of sweet red paprika for coating its surface. The finished product is characterized by optimal physicochemical parameters and pronounced sensory properties. The moisture content was 50.4%, protein content 29.3%, fat in dry matter 43.8%, and lactose content 0.8%.

A total of 10.7 liters of milk were required to produce 1 kg of cheese, indicating a good and stable yield. Microbiological studies confirmed the absence of coliform bacteria, yeasts, molds, and spores of anaerobic microorganisms of the genus Clostridium, while maintaining a high level of beneficial lactic acid microflora in compliance with the requirements of TR CU 033/2013.

The obtained results demonstrate the safety, high quality, and technological efficiency of goat milk cheese production.

Key words: *goat cheese, mesophilic starter culture, fermentation, pasteurization, salting.*

Сведения об авторах

Фарида Харисовна Смольникова* – кандидат технических наук, ассоциированный профессор кафедры «Пищевые технологии», Шәкәрім университет, Казахстан; e-mail: smolnikovafarida@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8777-5313.

Бахыткуль Кажженовна Асенова – кандидат технических наук, профессор кафедры «Пищевая технология», Шәкәрім университет, Казахстан; e-mail: asenova.1958@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-8707-9725.

Элеонора Курметовна Окусханова – PhD, ассоциированный профессор кафедры «Пищевые технологии», Шәкәрім университет, Казахстан; e-mail: eleonoraokushan@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5139-9291.

Шугыла Кадыровна Жакупбекова – магистр технических наук, постдокторант кафедры «Пищевые технологии», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: siyanie@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7558-9871.

Арай Сагинбековна Камбарова – PhD, и.о ассоцированного профессора кафедры «Пищевая технология», Шәкәрім университет, Казакстан; e-mail: kambarova@mail.ru. ORCID https://orcid.org/0000-0002-4289-3818.

Авторлар туралы мәліметтер

Фарида Харисқызы Смольникова* – техника ғылымдарының кандидаты, «Тамақ технологиясы» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Шәкәрім университеті, Қазақстан; e-mail: smolnikovafarida@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8777-5313.

Бахыткуль Кажкенқызы Асенова – техника ғылымдарының кандидаты, «Тамақ технологиясы» кафедрасының профессоры, Шәкәрім университеті, Қазақстан; e-mail: asenova.1958@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-8707-9725.

Элеонора Курметқызы Окусханова – PhD, «Тамақ технологиялары» кафедрасының қауымдастырылған профессорының, Шәкәрім университеті, Қазақстан; e-mail: eleonora-okushan@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5139-9291.

Шугыла Кадыровна Жакупбекова – техника ғылымдарының магистрі, «Тамақ технологиясы» кафедрасының постдокторанты, Шәкәрім университеті, Қазақстан; e-mail: siyanie@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7558-9871.

Арай Сагинбековна Камбарова – PhD, «Тамақ технологиясы» кафедрасының қауымдастырылған профессор м.а., Шәкәрім университеті, Қазақстан; e-mail: kambarova@mail.ru. ORCID https://orcid.org/0000-0002-4289-3818.

Information about the authors

Farida Smolnikova* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department «Food Technology», Shakarim University, Kazakhstan; e-mail: smolnikovafarida@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8777-5313.

Bakhytkul Asenova – Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of Food Technology, Shakarim University, Kazakhstan; e-mail: asenova.1958@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-8707-9725.

Eleonora Okushanova – PhD, Associate professor of the Department of «Food technologies», Shakarim University of Semey, Kazakhstan; e-mail: eleonora-okushan@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5139-9291.

Shugyla Zhakupbekova- master of technical sciences, postdoctoral fellowof the department «Food Technology», Shakarim University; e-mail:siyanie@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7558-9871.

Arai Saginbekovna Kambarova – PhD, Acting Associate Professor of the Department of «Food Technology», Shakarim University, Kazakhstan; e-mail: kambarova@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4289-3818.

Поступила в редакцию 01.06.2026
Поступила после доработки 23.06.2026
Принята к публикации 24.06.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-43

МРНТИ: 62.39.51

С.С. Ануарбекова*, Д.А. Шаймерденова[1], Ж.М. Чаканова[1], М.Ж. Кизатова[2]
[1]ТОО «Научно-производственное предприятие «Инноватор»
Республика Казахстан, г. Астана
[2]Казахский национальный медицинский университет имени С.Д. Асфендиярова,
Республика Казахстан, г. Алматы
*e-mail: sanuarbekova@rambler.ru

АМИЛАЗА И МИКРООРГАНИЗМЫ – ПРОДУЦЕНТЫ АМИЛОЛИТИЧЕСКИХ ФЕРМЕНТОВ

Аннотация: *Амилолитические ферменты являются одними из значимых промышленных ферментов, имеющие высокий процент производства. Действие их основано на гидролизе молекул крахмала до глюкозы. Амилазы применяются в быту, в пищевой, текстильной, бумажной, крахмалоперерабатывающей промышленностях, в производстве фармацевтических препаратов, в диагностике и лечении. Продуцентами являются растения, животные и микроорганизмы. Основной процент использования продуцентов являются микроорганизмы, так как микробные амилазы более стабильны, эффективны и экономически выгодны. Основные продуценты амилолитических ферментов представлены бактериями рода Bacillus, Lactobacillus, Klebsiella, Halobacillus и другие, грибами рода Aspergillus, Penicillium, Rhizopus, Mucor, Trichoderma и другие, различными актиномицетами и дрожжами. Их деятельность основана на способности выделять ферменты с дальнейшим подбором условий и питательных сред для ферментации. В данном обзоре отмечено*

©С.С. Ануарбекова, Д.А. Шаймерденова, Чаканова Ж.М., М.Ж. Кизатова, 2026

важное значение гидролитического фермента амилазы бактериального и грибкового происхождения, отмечены мировые штаммы культур и коммерческие препараты, применяемые в различных промышленных сферах. В процессе работы над проектом, нами из зерновых культур были выделены перспективные ферментативно активные культуры бактерий и грибов. Среди них активностью обладают 6 культур бактерий рода Bacillus sp. Отмечены их фенотипические и генотипические характеристики.

Ключевые слова: *бактерии, грибы, штамм, амилаза, амилолитическая активность, биотехнологическая промышленность.*

Для получения новых продуктов питания из растительного сырья по мнению Гридиной С.Б. с соавт. (2014 г.), необходимо знать химический состав исходного сырья, биохимические показатели качества, в частности активность и условия действия активных веществ. Данный этап исследования способствует правильной организации технологического процесса и определению рационального пути использования растений в процессе его переработки [1]. Мы разделяем их мнение. В нашей научно-исследовательской работе сырьём являются злаковые культуры (пшеница, кукуруза, ячмень, гречиха), на основе которых планируется разработать углеводно-сбалансированные продукты питания. Целью одного из разделов проекта является изучение влияния амилолитических ферментов и амилолитичеки активных микроорганизмов на структуру и сбалансированность углеводного состава хлебобулочных продуктов. В связи с этим целью нашего обзора является систематизация современных данных о разнообразии микроорганизмов-продуцентов, механизмах действия и сферы применения амилазы.

Виды зерновых культур (пшеница, кукуруза, ячмень, гречиха) и их углеводный состав указан в таблице 1. Общие данные состава углеводов (в таблице) проанализированы и обобщены при поиске и обработке соответствующей литературы [2-6].

Таблица 1 – Углеводы, входящие в состав зерновых культур

Наименование зерна	Общее количество углеводов, %	Наименование углеводов	Количество углеводов на 100 г, в г
Пшеница	50-70	Крахмал и декстрины Клетчатка Мальтоза Сахароза Фруктоза Глюкоза Раффиноза	54,5-57,5 10,8-15 0,1 0,5-0,8 0,1 0,1 0,1
Кукуруза	74	Крахмал и декстрины Клетчатка Мальтоза Сахароза Фруктоза Глюкоза Галактоза	58,2 7,3-9,6 0,1 1,1 0,2 0,2 0,1
Ячмень	56-76	Крахмал и декстрины Клетчатка Мальтоза Сахароза Фруктоза Глюкоза	54,6 9,6-15,6 0,1 0,5 0,1 0,2
Гречиха	57-62	Крахмал и декстрины Клетчатка Мальтоза Сахароза Фруктоза Глюкоза	55,4 10-14 0,2 0,7 0,1 0,4

Углеводы являются основным компонентом зерна. Количество углеводов в зерне составляет до 80 % от сухой массы. Зерно содержит различные виды углеводов, такие как крахмал, клетчатка, сахара.

Из сахаров больше содержится сахарозы.

Клетчатка составляет 10-15% углеводов.

Крахмал – основное из веществ, содержащихся в зерне злаков. Не является химически индивидуальным веществом, на 8,6-96,1 % состоит из двух полисахаридов – амилозы и амилопектина [7, 8]. Служит основным источником энергии в семени и используется для образования и роста новых молодых клеток (корня, стебля, листа) [8].

Углеводы расщепляются под действием ферментов. Ферменты более эффективны, специфичны и экологичны, чем химические катализаторы. Семена зёрен также содержат ферменты.

Различные ферменты разлагают углеводы зерна на более простые соединения, что улучшает усвояемость продуктов [8-10].

Процесс расщепления углеводов протекает по типу гидролиза.

Инвертаза и β-галактозидаза гидролизуют сахарозу, α-галактозидаза гидролизует раффинозу, галактозу, глюкозу, фруктозу. Глюкоизомераза расщепляет глюкозу и фруктозу, мальтаза – мальтозу на глюкозу, сахараза – сахарозу на глюкозу и фруктозу.

Целлюлаза расщепляет клетчатку.

Для гидролиза крахмала применяется группа ферментов, принадлежащих к одному семейству - α-амилазному семейству или семейству 13 гликозилирующих гидролаз. К ним относятся амилазы, амилоглюкозидазы, пуллуланазы, глюкоамилазы, α-глюкозидазы, изоамилазы, глюканазы, ксиналаза [9, 11-14]. Из данного списка амилаз для гидролиза крахмала чаще применяются амилазы, амилоглюкозидазы, глюкоамилазы [13, 15].

В силу того, что основной процент углеводов в зерне представлен крахмалом, основным ферментом является амилаза. Процесс расщепления амилазы актуален для многих биологических и промышленных процессов, в результате чего амилолитические ферменты являются наиболее исследованными и широко используемыми, при этом исследования не прекращаются [7, 12, 16-18]. Это свидетельствует об актуальности вопроса.

Амилолитические ферменты были известны человеку уже в бронзовом веке. Первые упоминания о продуктах, полученные путём сбраживания крахмалсодержащего сырья, относятся к VI-VII векам до н.э. [19]. Давно известно, что превращение крахмала в короткие глюкозные цепи катализируется определенными ферментами. Благодаря научным исследованиям, в 1875 году, Дж. К. Ирвином было обнаружено ожижение крахмала водным экстрактом из пророщенного ячменя. В 1814 году, Д. С. Кирхгоф выделил из семян зерновых культур вещество, превращающее крахмал в сахар [20]. В 1833 году, французские химики Ансельм Пайен и Жан Франсуа Персоз из пророщенного ячменя получили вещество, расщепляющее крахмал, описали его свойства и назвали - диастаза. Это открытие заложило основы энзимологии [21]. В 1878 году М. Меркер определил состав солодовой диастазы, который состоит из двух ферментов. Это подтвердили Р. Линтнер, Олесон и другие учёные. Олесон в 1926 году назвал один из диастазных ферментов а-амилазой (или декстриногенной), а второй – р-амилазой (или сахарогенной). Позднее термин «диастаза» был заменен на «амилаза» [9, 17].

В нынешнее время, мировой рынок амилазы составлял около 1,76 млрд долларов США в 2024 году, около 1,85 млрд долларов США в 2025 году до 2,90 млрд долларов США к 2034 году. Это отражает устойчивую траекторию роста рынка амилазы с прогнозируемым среднегодовым темпом роста около 5,2% с 2025 по 2034 год [12, 22].

Итак, амилазы – ферменты, катализирующие реакции гидролиза, иначе гидролазы, или карбогидразы – ферменты, расщепляющие углеводы, относится к 3 классу ферментов. Это специфический фермент, действующий на один фактор – крахмал [7, 9, 11, 23-25].

Амилаза подразделяется на три подкласса: *α-, в-* и *γ-*амилазы. Классификация основана на типах связывания. Имеется растительная, животная и микробная амилаза. Существует классификация амилазы по микробному источнику: бактериальная амилаза, грибковая амилаза. По классификации на основе температуры реакции: мезофильная и термофильная амилаза. Мезофильная амилаза активна при температуре от 30 до 70 °C. Наиболее эффективна в условиях умеренных температур, используется в пищевой промышленности и других областях, требующих умеренного нагрева. Термофильная амилаза активна при более высоких температурах, обычно от 90 до 105°C, поэтому используется в отраслях, требующих высокотемпературных условий, таких как пищевая промышленность, производство сахара и текстильная промышленность [26, 27].

α-Амилаза, или иначе, декстриноген-амилаза, обнаружена в слюне, в соке поджелудочной железы людей, животных, в проросших зёрнах пшеницы, ржи, ячменя, бактериях и грибах. β-Амилаза, или иначе, сахароген-амилаза, найдена в зрелых зёрнах пшеницы, ржи и ячменя, семенах сои. *γ*-Амилаза в органах и тканях человека [9, 16, 17, 19, 25, 28]. *α*-Амилаза расщепляет в полисахаридах внутренние α-1,4-связи, поэтому её иногда называют эндоамилазой. *β*-Амилаза отщепляет вторую с конца α-1,4-гликозидную связь, образуя дисахарид мальтозу. *γ*-Амилаза отщепляет последнюю α-1,4-гликозидную связь, приводя к образованию глюкозы [19, 29].

Для применения значение имеют первые две амилазы.

Никитиной Е.В. (2015 г.) отмечено: при действии β-амилазы на крахмал образуются мальтоза и незначительное количество высокомолекулярных декстринов; при действии α-амилазы на крахмал образуются декстрины меньшего молекулярного веса и небольшое количество мальтозы. Последние не реагируют с йодом [13]. Более успешно производят гидролиз крахмала амилазы при совместном действии.

Для расщепления крахмала при выборе амилаз предпочтение нужно отдавать α-амилазе, так как β-амилаза образует больше сахаров [13].

Производителями фермента амилазы являются растения, животные и микробы [9, 13, 30]. Основными продуцентами амилаз считаются микроорганизмы; и микробные ферменты предпочтительнее из-за простоты их выделения в промышленных масштабах, экономичности производства, стабильности в жестких условиях и высоким выходом конечного продукта.

Микробные ферменты получают в больших количествах в соответствии с затратами и временем, за счёт того, что культуры микробов растут в больших количествах за относительно короткий период ферментации. Также питательные среды не дорогие. Наличие собственного оборудования и микроорганизмов-продуцентов удешевляет процесс получения продукта. В работе казахстанских учёных отмечено [32], что на производство ферментов микробной природы, не влияют ни климатические условия или сезонные изменения, ни нормативные или этические вопросы, связанные с убоем животных или вырубкой деревьев и растений. Всё это отличает их от растительных и животных клеток [31, 32].

Продуцентами амилазы являются следующие микроорганизмы: *Bacillus subtilis, Bacillus staerothermophilus, Bacillus amyloliquefaciens, Bacillus licheniformis, Bacillus acidocaldarius, Lactobacillus* sp.*, Bifidobacterium bifidum, Bifidobacterium acerans, Chromohalobacter* sp., *Caldimonas taiwanensis* sp. nov., *Halobacillus* sp., *Geobacillus thermoleovorans, Aspergillus* sp.*, Penicillium* sp.*, Rhizopus* sp.*, Trichoderma* sp.*, Saccharomyces* sp.

Предпочтение отдают как источникам бактериям и грибам.

Амилазы, которые выделены из грибов, устойчивы к действию кислот, а бактериальные ферменты более термостабильны [11, 17, 28, 33-35].

В качестве амилолитически продуцируемых микроорганизмов преобладают бациллы, что связано с их быстрым ростом, выраженной секрецией внеклеточных ферментов, устойчивостью в различных системах ферментации и высокого показателя жизнеспособности. Бактериальные ферменты видов *Bacillus* более стабильны к температуре и pH, устойчивы к присутствию в субстрате органических соединений [27, 34, 36].

Среди грибов преобладают аспергиллы, в частности виды *Aspergillus oryzae* и *Aspergillus niger* [7, 17]. Они дают большой выход энзимов и имеют свойство подавлять сопутствующую бактериальную флору [7].

Было показано, что оптимальные температуры для грибной а-амилазы примерно на 20°C ниже, чем для бактериальных, что нашло практическое применение [30]. В работе [37] отмечается, что бактериальные а-амилазы образуют декстрины быстрее, чем грибные.

Получение продуцентов происходит путём выделения потенциальных культур микроорганизмов, микробиологического синтеза, ферментацией или внедрением [14, 27-29] рекомбинантной амилазы в микробы.

Амилолитически перспективные микроорганизмы выделяют из различных источников. Например, в работе [12] из почвы и отходов переработки картофеля были выделены два вида бактерий, продуцирующих амилазу: *Klebsiella pasteurii* NITTBP2 и *Bacillus clarus* NITTBP1. Штамм *B. Clarus* NITTBP1 продемонстрировал превосходную амилазную активность (18,10 Ед/мл). Морские изоляты также продемонстрировали исключительную эффективность

фермента в условиях высоких температур и pH. Давравновым К.Д. с соавторами, наряду с морскими изолятами, были выделены амилолитически активные изоляты из почвы Приаралья. Из них 6 изолятов грибов обладают амилолитической активностью [38]. Сырьё пищевых производств является источником продуцентов гидролитических ферментов. В исследовании Иштугановой К.В. и Гаричевой А.В. [39], ферментативно активные микроорганизмы были выделены из зерновых культур, муки, пшеничных отрубей. Авторы дали сравнительный анализ трёх перспективных штаммов *B. subtilis,* все они дали положительный результат от высокий цифр до низких: *B. subtilis* № 12-amylolytic, *B. subtilis* № 9-amylolytic, *B. subtilis* № 2-amylolytic. В работе [1] выделены и изучены активности различных ферментов пшеницы, ячменя и овса. Выделение из зёрен амилазы проводили из водной вытяжки. В следующем исследовании и разработке ферментных препаратов отобраны два перспективных изолята *B. subtilis* 2СП и *B. subtilis* 5СП, выделенные из микробиоты диких животных Крайнего Севера, с амилолитической активностью 2,75 и 2,67 ЕД/мг соответственно [40]. В Кашкадарьинском регионе Узбекистана, из штамма *B. Licheniformis* 104.K, получена новая термостабильная α-амилаза. Филогенетический анализ показал, что термостабильная α-амилаза принадлежит к семейству гликозидгидролаз 13, подсемейству 5 (GH13_5) и обладает высокой степенью сходства последовательностей с известными α-амилазами. Данный штамм и амилаза перспективны для применения в различных сферах [27]. В Национальном центре биотехнологии получена α-амилаза из казахстанского амилолитически активного штамма *B. licheniformis* T5, выделенного из почвы Южного Казахстана. Авторами проекта при секвенировании гена α-амилазы установлено, что для казахстанских штаммов характерен полиморфизм в данном локусе, который коррелирует с амилазной активностью. В рамках проекта проведена экспрессия гена α-амилазы из *B. Licheniformis* T5 в дрожжах *Pichia pastoris*, выделен и получен фермент [41, 42].

В нашей практике продуценты амилаз выделялись из почвы, зерновых культур, хлебобулочных изделий, растений, сточных вод и канализационных систем.

Использование фермента амилазы различное, от применения в быту в приготовлении еды, до применения в лечении и диагностике заболеваний, на производстве различного направления.

Амилазы бактериального и грибкового происхождения активно применяются в пищевой промышленности для хлеба, кулинарии, соков, сиропов [12, 17, 22, 25, 27, 30, 43]. В хлебе амилазы расщепляют крахмал в муке на сахара, которые используются далее дрожжами. Под действием фермента в тесте ускоряется процесс ферментации, снижается вязкость теста, сохраняются реологические свойства, увеличивается срок хранения хлеба, улучшается качество теста и готовых изделий [7, 9, 11, 15, 16, 24, 30]. Из микроорганизмов продуцентами амилаз для в хлебопекарной промышленности являются термостабильная мальтогенная амилаза *B. stearothermophilus,* B. amyloliquefaciens [7, 36]. Также используются заводские препараты Амилоризин П10х и Амилосубтилин Г10х от разных производителей. Амилосубтилин Г10х – это бациллярная амилаза из *B. subtilis,* состоящая из α-амилазы, β-глюканазы и протеазы. Данный ферментный биопрепарат работает при pH – 6,0-6,3 и температуре – 0-55 °C [11, 44]. Амилоризин П10х – это грибная α-амилаза из *A. oryzae* – фермент для расщепления крахмала с образованием мальтодекстринов, олигосахаридов и мальтозы. Расщепляет весь доступный крахмал в крахмалосодержащем сырье. Он содержит α-амилазу и протеазы, которые расщепляют крахмал и белки, ускоряя брожение, увеличивая объём хлеба, улучшая цвет корочки и структуру мякиша [44, 45].

Используются амилазы в спиртовой и пивоваренной промышленности, где применяется солод на основе проросшего и высушенного зерна [1, 7, 9, 12, 17, 24, 25, 16, 18, 22, 30, 46]. Это может быть пшеница, рожь, ячмень.

Для производства спирта применяются α-амилазы дрожжей, бацилл [9, 30]. Применяются чаще в качестве продуцентов терморезистентные бактерии, такие как *B. licheniformis*, генно-модифицированные штаммы *Esherichia coli* и *B. subtilis* [27, 28, 47-50]. Известный препарат Амилоризин П10х [45] также применяется в производстве пива. Следующий известный препарат α-амилаза G9995®, полученный из B. licheniformis (Enzyme Biosystems, США), применяется в получении этанола и пива [30].

Амилолитические ферменты актуальны в качестве добавки в питании скота [30]. Амилосубтилин Г10х на основе бацилл вводят в комбикорма для поросят-сосунов и отъёмышей с целью улучшения усвояемости кормов и увеличения привеса [11]. Также он нашёл применение в птицеводстве. Донкова Н.В. и Донков С.А. [50] на основе штаммов *B. subtilis*, продуцирующих амилолитический фермент, разработали сахаросодержащую кормовую добавку (до 70% сахаров) для телят. Она увеличивает привесы, расщепляет крахмал пищи для лучшего усвоения и пищеварения. Имеет цель: профилактика желудочно-кишечных заболеваний, что происходит за счёт антагонистического действия бактерий *B. subtilis* к патогенным и условно-патогенным микроорганизмам. Известно, что основной процент штаммов бацилл обладает свойством антагонизма, что подтверждено и в наших работах [51-58]. Бациллы подавляли в различной степени рост таких культур, как стафилококки, стрептококки, энтеробактерии, бациллы.

Микробные амилолитические энзимы активно применяются в текстильной промышленности для усиления прочности тканей и нитей, в кожевенной промышленности для улучшения качества готовой продукции, в целлюлозно-бумажной промышленности для усиления прочности бумаги [7, 12, 16-18, 22, 24, 25, 27, 30, 43, 59]. При работе с текстилем применяются бациллярные амилазы [27, 30]. Они представлены B. amyloliquefaciens**,** B. licheniformis, B. stearothermophilus, которые эффективны в условиях высокой температуры. Для текстильной, целлюлозно-бумажной промышленности разработаны амилазные препараты, как например, Amizyme® (PMP Fermentation Products, Пеория, США), из бацилл; Termamyl® из *B. licheniformis* (Novozymes, Дания); Fungamyl из *A. oryzae* (Novozymes, Дания) и α-амилаза G9995® из B. licheniformis (Enzyme Biosystems, США) [44].

Амилазы применяются в производстве моющих средств [7, 12, 16, 17, 27, 30]. Ферменты повышают активность моющих средств, повышают разложение крахмалистых продуктов, удаляют стойкие пятна с эффектом отбеливания, могут работать при низких температурах. За счёт применения природных ферментов повышается безопасность продукта. 90 % всех жидких моющих средств содержат амилазы. При производстве моющей продукции предпочтение отдано α-амилазам бацилл и аспергилл [7, 30]. Примером может служить п*репарат* Termamyl® из *B. licheniformis* (Novozymes, Дания) [17].

Основная функция амилазы – применение в крахмалоперерабатывающей промышленности [18, 22, 27, 29, 34, 43].

При этом грамм амилазы превращает тонну крахмала в сахар [60].

Процесс гидролиза крахмала состоит из этапа желатинизации, частичного гидролиза крахмала и снижения вязкости; далее идёт этап осахаривания с образованием глюкозы и мальтозы [1, 7, 11, 15, 30, 34]. Первоначально использовалась α-амилаза *B. amyloliquefaciens*, затем она была заменена на α-амилазу *B. Stearothermophilus* и *B. Licheniformis* [7, 17, 30]. *B. Licheniformis* и *B. Stearothermophilus* способны выдерживать высокие температуры при обработке крахмала. В крахмалопаточной промышленности для разжижения крахмала при высоких температурах применяются следующие известные препараты амилаз: Amizyme® (PMP Fermentation Products, США), α-амилаза G9995® Enzyme Biosystems, США). Они уменьшают вязкость крахмалосодержащего сырья. Активно применяются и другие энзимные препараты производства Novo Nordisk, Дания. К примеру, бактериальный биопрепарат BAN 480L, на основе селективного штамма *B. amyloliquefaciens* и грибковый биопрепарат Dextrozyme E, на основе генетически модифицированого штамма *A. niger* и пуллуланазы. Последняя была выделена из генетически модифицированного штамма *Bacillus* [44].

Микроорганизмы, продуцирующие амилазы, бывают термостабильные, галофильные. Они экспрессируют уникальные альфа-амилазы с термостабильными и галотолерантными характеристиками, зависящими от внутренних особенностей микроорганизма [27, 29, 61-64].

Термостабильные микроорганизмы имеют преимущество при скрининге активных культур, так как ферментация и осахаривание крахмала происходит при высоких температурах – 100-110°С. Большинство термостабильных ферментов получены из термофильных организмов и имеют коммерческое значение. Поиск термостабильных микроорганизмов не прекращается и имеет значение для пополнения коллекций промышленно-ценных микроорганизмов, улучшения промышленных процессов разложения крахмала, увеличения производимости глюкозы, кристаллической декстрозы, декстрозного сиропа, мальтозы и мальтодекстринов [7, 29, 62]. Рядом авторов установлено, что штаммы *B.*

subtilis, *B. stearothermophilus, B. licheniformis, B. coagulans* и *B. amyloliquefaciens* известны как продуценты термостабильной и щелочеустойчивой α-амилазы, и они активно применяются для производства коммерческих ферментов с различным спектром назначения [7, 12, 14, 27, 33, 36, 47].

Интерес представляют ферменты, продуцируемые некоторыми галофильными микроорганизмами, которые обладают устойчивостью к различным уровням солёности, вплоть до высокой степени солёности. Следовательно, могут быть использованы во многих жёстких промышленных процессах, реализуемых на основе концентрированных солевых растворов. Также они обладают свойством стабильности к различным температурам [7, 65]. Основные галофильные амилазы были охарактеризованы у таких галофильных бактерий, как *Chromohalobacter sp.*, *Halobacillus sp.*, *Haloarcula hispanica*, *Halomonas meridiana* и *B. dipsosauri* [38, 64-66].

Ключевые мировые продуценты амилазы депонированы в известных коллекциях разных стран.

Коллекционные штаммы-продуценты амилаз – это специализированные микроорганизмы, селекционированные для промышленного получения энзимов, расщепляющих крахмал.

Например, штамм *B. amyloliquefaciens* ВКПМ B-10291, депонирован в Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов России (ВКПМ) как амилолитически активный штамм. Это селективный штамм, устойчивый к антибиотику рифампицин. Активность его как продуцента высока, так как продуцирует α-амилазу с активностью 900 едГОСТ/мл [67]

В Американской коллекции типовых культур (ATCC) имеется несколько амилолитических штаммов, обычно используемых для производства ферментов амилазы. Ключевые штаммы включают *B. amyloliquefaciens* ATCC 15841, *B. amyloliquefaciens* ATCC 23350, B. subtilis ATCC 6051, B. subtilis ATCC 6633, *Clostridium acetobutylicum* ATCC 824, *Thermomyces lanuginosus* ATCC 34626 [68].

В Республиканской коллекции микроорганизмов (РКМ) Казахстана на хранении находятся амилолитически активные штаммы различных таксономических групп. Известны штаммы B. subtilis 65V-2, B. subtilis Г-2 – продуценты амилазы, A. awamory ВУДТ-2 – глюкоамилазы, A. awamory 466V-7 – комплекс амилолитических ферментов [69].

В результате работы над проектом нами была изучена амилолитическая активность 16 культур бацилл, выделенные из зерновых культур. Выбор бактерий рода *Bacillus* обусловлен их способностью эффективно секретировать большое количество фермента во внешнюю среду, активного роста, жизнеспособности и очистки препарата. Дана была оценка их амилолитической активности: 6 культур активны. Анализ активных бактериальных штаммов на основе секвенирования гена *16S rRNA* с построением филогенетических деревьев, анализом процента идентичности и дивергенции нуклеотидных последовательностей (рис. 1) и дальнейшего исследования культурально-морфологических и биохимических свойств (табл. 2), показал их принадлежность к роду *Bacillus*, включая виды *B. subtilis*, *B. amyloliquefaciens* и *B. tequilensis*.

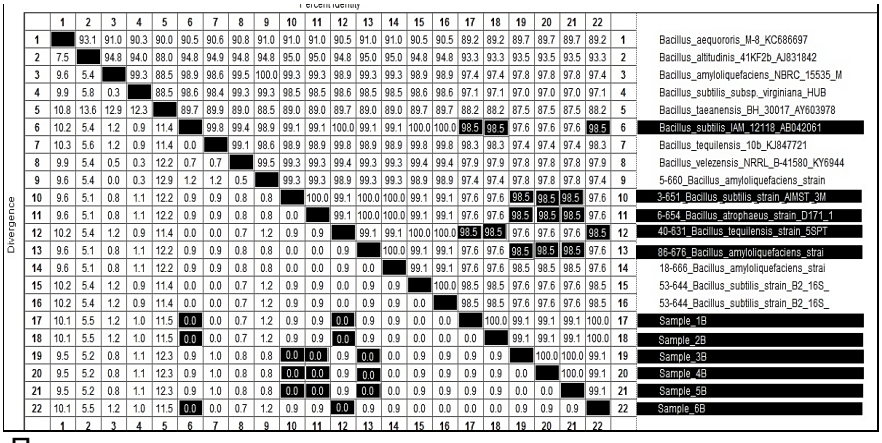


Рисунок 1 – Процент идентичности и дивергенция нуклеотидных последовательностей различных видов рода *Bacillus*

Таблица 2 – Фенотипические свойства активных бацилл

Образец	Споры	Гидролиз крахмала	Сбраживание		ПД	Ох	КтА	Результат
			глюкоза	лактоза				
1В	Э, Ц	+	+	-	-	-	+	*B. tequilensis*
2В	Э, Ц	+	+	-	+	-	+	*B. TEQUILENSIS*
3В	Э, Ц	+++	+	-	+	-	+	*B. AMYLOLIGUEFACIENS*
4В	Э, Ц	++	+	-	+	-	+	*B. subtilis*
5В	Э, Ц	++	+	-	-	-	+	*B. subtilis*
6В	Э, Ц	++	+	-	+	-	+	*B. subtilis*

Примечание: КтА – каталазная активность, Ох – диски на оксидазный тест, ПД – подвижность, Э – споры элипсоидной формы, Ц – споры центрального расположения, (+) – положительный результат, (-) – отрицательный результат, ++ – сильная зона, +++ – ещё выше, чем другие виды

На основе анализа гено- и фенотипирования установлено, что 2 штамма являются *B. tequilensis,* 1 штамм – *B. amyloliguefaciens,* 3 штамма – *B. subtilis.*

Данные штаммы бацилл, перспективные для расщепления крахмала, будут использованы в дальнейшей работе.

На основе изучения литературы, в качестве амилолитических ферментов для дальнейшей работы нами взяты ферменты α-амилаза и глюкоамилаза (производство «HiMedia Laboratories Pvt. Ltd.», Индия).

Подобранные нами ферменты и выделенные амилолитически активные микроорганизмы будут способствовать достижению нашей цели и завершению проекта.

Таким образом, амилаза часто применяется в биотехнологической промышленности. Показателем является способность расщеплять крахмал. Микроорганизмы как продуценты амилолитических ферментов имеют ряд преимуществ экономического, этического и производственного характера. Некоторые штаммы микроорганизмов со временем могут терять свои производственные свойства и показатель выживаемости. В связи с этим необходимо проводить поиск новых культур микроорганизмов и улучшать их свойства для повышения выхода продукта. Всё это приводит к непрерывному процессу получения амилолитически активных штаммов различного происхождения. Доказательством является анализ литературы и научно-производственных исследований с выделением новых микроорганизмов с промышленно-ценными свойствами.

Список литературы

1. Ферментативная активность зерновых культур / С.Б. Гридина и др. // Вестн. КрасГАУ. – 2014. – № 8. – С. 57-60.
2. Скурихин И.М. Химический состав пищевых продуктов / И.М. Скурихин, М.Н. Волгарёв. – Издание 2-е, переработанное и дополненное. В 2-х книгах. – Москва: Агропромиздат, 1987. – 584 с.
3. Зайнобиддинов М.З. Анализ химического состава зерен пшеницы и ржи для ежедневного потребления / М.З. Зайнобиддинов // Экономика и социум. – 2023. – № 12(115)-1. – С. 1108-1116.
4. Типсина Н.Н. Биологическая ценность продуктов переработки ячменя / Н.Н. Типсина, О.С. Пуляева // Вестн. КрасГАУ. – 2013. – № 8. – С. 226-229.
5. Артыклыев Э. Изменение химического состава зерна при созревании / Э. Артыклыев, А. Байрамов, Ш. Гараджаев // Инновационная наука. – 2023. – № 12-2. – С. 77-79.
6. Анализ химического состава и пищевой ценности зернового сырья для производства продуктов детского питания / С.А. Урубков и др. // Пищевая промышленность. – 2018. – № 8. – С. 16-21.
7. de Souza PM. Application of microbial α-amylase in industry / PM de Souza, P. de Oliveira Magalhães // Braz J Microbiol. – 2010. – № 41(4). – P. 850-861. https://doi.org/10.1590/S1517-83822010000400004.
8. Биохимия зерна и продуктов его переработки: учебное пособие / под ред. С.В. Борисовой. – М-во образ. и науки России; Казан. нац. исслед. технол. ун-т. – Казань: Изд-во КНИТУ, 2016. – 100 с.

9. Ферменты в пищевой промышленности / Р.Дж. Уайтхерст, М. ван Оорт (ред.). – Пер. с англ, д-ра хим. наук С.В. Макарова. – СПб.:Профессия, 2014. – 408 с., табл.. ил. – (Серия: Ингредиенты). – С. 135-138, 228-233.
10. Шилкова О. Влияние ферментов зерна на биохимические изменения в нем при хранении / О. Шилкова, С. Белецкий, К. Гурьева // Комбикорма. – 2018. – № 9. – С. 93-95.
11. Кузнецова Е.А. Ферменты: структура, свойства и применение: учебно-методическое пособие для высшего профессионального образования / Е.А. Кузнецова, Л.В. Черепнина. – Орел: ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», 2013. – 175 с.
12. Beula Isabel J. Harnessing amylase producing novel bacterial strains from industrial waste: A bioprocessing and optimization approach / J. Beula Isabel, M. Premalatha // International Journal of Biological Macromolecules. – 2025. – Vol. 322, Part 2, 146769. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.146769.
13. Никитина Е.В. Бактериальные источники амилолитических ферментов: характеристика и нетрадиционное применение / Е.В. Никитина // Вест. технолог. универ. – 2015. – Т. 18, № 19. – С. 245-248.
14. Изучение термостабильной амилазы штамма *Bacillus paralicheniformis* / В.С. Попова и др. // Eurasian Journal of Applied Biotechnology. – 2024. – № 3. – С. 133.
15. Никитина Е.В. Биотехнологические аспекты применения амилолитических ферментов в пищевой промышленности / Е.В. Никитина, О.А. Решетник, Р.А. Губайдуллин // Вестн. Казанского технолог. унив. – 2013. – № 13. https://cyberleninka.ru/article/n/biotehnologicheskie-aspekty-primeneniya-amilolitic heskih-fermentov-v-pischevoy-promyshlennosti (дата обращения: 01.04.2026).
16. Recent trends in production and potential applications of microbial amylases: A comprehensive review / Zain Ali et al // Protein Expression and Purification. – 2025. – Vol. 227, 106640. https://doi.org/10.1016/j.pep.2024.106640.
17. A broader view: microbial enzymes and their relevance in industries, medicine, and beyond / N. Gurung et al // Biomed Res Int. – 2013. – 329121. https://doi.org/10.1155/2013/329121.
18. Fikadu Hailemichael, Seferu Tadesse. Process Optimization and Industrial Application of Microbial Amylases: A Review // GSJ. – 2022. – Vol. 10, Issue 4. – P. 2643-2648. (дата обращения 31.03.2026).
19. https://ru.wikipedia.org/wiki/Амилаза (дата обращения: 31.03.2026).
20. https://ru.wikipedia.org/wiki/Крахмал (дата обращения: 31.03.2026).
21. https://ru.wikipedia.org/wiki/Пайен,_Ансельм (дата обращения: 31.03.2026).
22. A novel high maltose-forming α-amylase from *Rhizomucor miehei* and its application in the food industry / Yu-chuan Wang et al // Food Chemistry. – 2020. – Vol. 305, 1. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125447.
23. https://propionix.ru/mikrobnaya-fermentatsiya (дата обращения: 31.03.2026).
24. An overview of the enzyme: Amylase and its industrial potentials / M. Ahmad et al // Bayero Journal of Pure and Applied Sciences. – 2020. – 12(1). – P. 352-358. https://doi.org/10.4314/bajopas.v12i1.53S.
25. Putri AZ. Microbial α-Amylases in the Industrial Extremozymes / AZ Putri, T. Nakagawa // Reviews in Agricultural Sci. – 2020. – № 8. – P. 158-169. https://dx.doi.org/10.7831/ras.8.0_158.
26. https://en.wikipedia.org/wiki/Alpha-amylase (дата обращения: 31.03.2026).
27. Characterization of a Thermostable α-Amylase from *Bacillus licheniformis* 104.K for Industrial Applications / A. Kholikov et al // *Microorganisms.* – 2025. – № 13. – P. 1757. https://doi.org/10.3390/microorganisms13081757.
28. Получение рекомбинантной α-амилазы Amy1UA7 из *subtilis* в клетках *E. coli* / М. Калимкулова и др. // Биотехнология. Теория и практика. – 2015. – № 4. – С. 57-65.
29. Microbial Alpha-Amylase Production: Progress, Challenges and Perspectives / B. Elyasi Far et al // Adv Pharm Bull. – 2020. – № 10(3). – P. 350-358. https://doi.org/10.34172/apb.2020.043.
30. α-Амилаза и её применение в разных отраслях промышленности / Ж.Б. Сулейменова и др. // Микробиология және вирусология. – 2023. – № 3(42). – С. 52-67. https://doi.org/10.53729/MV-AS.2023.03.03.
31. Applications of Microbial Enzymes in Food Industry / S. Raveendran et al // Food Technology and Biotechnology. – 2018. – № 56(1). – P. 16-30. https://doi. org/10.17113/ftb.56.01.18.5491.

32. Fernandes P. Enzymatic Processing in the Food Industry / P. Fernandes // Reference Module in Food Science. – 2018. – P. 1-11. https://doi.org/10.1016/b978-0- 08-100596-5.22341-x.
33. Определение активности амилолитических ферментов по гидролизу субстрата, иммобилизованного в полиакриламидном геле / В.О. Максутова и др. // Доклады Башкирского унив. – 2017. – Т. 2, № 5. – С. 736-740.
34. Донкова Н.В. Ферментативная активность бактерий из рода *Bacillus* при гидролизе крахмалсодержащего растительного сырья / Н.В. Донкова, С.А. Донков // Вестн. КрасГАУ. – 2021. – № 5. – С. 174-179. https://doi.org/10.36718/1819-4036-2021-5-174-179.
35. Microbial Amylolytic Enzymes in Foods: Technological Importance of the Bacillus Genus / T.C. Farias et al // Biocatal. Agric. Biotechnol. – 2021. – № 35(4). – P. 102054. https://doi.org/10.1016/j.bcab.2021.102054.
36. Obtaining and Characterizing Thermostable α-Amylases Secreted by *Bacillus subtilis*, Originating from *Bacillus amyloliquefaciens* and *Bacillus subtilis* / T. Soghomonyan et al // Fermentation. – 2024. – № 10(11). – P. 547. https://doi.org/10.3390/fermentation10110547.
37. Optimization of reaction conditions for the production of DAG using immobilized 1,3-regiospecific lipase Lipozyme RM IM / T. Watanabe et al // J. of the American Oil Chemists' Society. – 2003. – Vol. 80, № 12. – P. 1201-1207.
38. Давранов К.Д. Оценка ферментативной активности галотолерантных микроорганизмов из природных образцов приаралья / К.Д. Давранов, А.И. Кулонов, К.В. Кондрашева // Universum: химия и биология: электрон. научн. журн. – 2023. – № 7(109). [Электрон. ресурс]. https://7universum.com/ru/nature/archive/item/15738.
https://doi.org/10.32743/UNICHEM.2023.109.7.15738 (дата обращения: 30.03.2026).
39. Иштуганова К.В. Гидролитическая активность микроорганизмов пшеничных отрубей и соевого жмыха / К.В. Иштуганова, А.В. Гаричева // Пищевые системы. – 2021. – № 4(3S). – С. 93-97. https://doi.org/10.21323/2618–9771- 2021-4-3S-93-97.
40. Павлов А.Г. Амилолитическая активность изолятов бактерий *Bacillus subtilis*, выделенных из микробиоты диких животных / А.Г. Павлов // Сибирский вестник сельскохоз. науки. – 2022. – Т. 52, № 5. – С. 130-135. https://doi.org/10.26898/0370-8799-2022-5-16.
41. Биохимические параметры рекомбинантной α-амилазы Amy1UA7 / М.С. Калимкулова и др. // Наука, Биологические науки. – 2016. – № 4-1. – С. 116-119.
42. Ben L. Environmental Sources of Amylase-Producing Bacteria and Their Industrial Applications / L. Ben // J Bacteriol Parasitol. – 2024. – Vol.15, Iss.S28, № 1000111.
43. Пащенко Л.П. Технология хлебопекарного производства: Учебник / Л.П. Пащенко, И.М. Жаркова. – СПб.:«Лань», 2014. – 672 с.: ил. – С. 575-596.
44. Карпенко Д.В. Способ активации амилолитического ферментного препарата / Д.В. Карпенко, Т.А. Тихонова, К.К. Ходарев // Пиво и напитки. – 2015. – № 4. – С. 42-44.
45. The Role of Amylase in Bioethanol Production: Advances in Amylase-Producing Strains Using CRISPR/Cas9 Technology / E.L. Tesfaye et al // Fuel Commun. – 2025. – № 23. – P. 100142. https://doi.org/10.1016/j.jfueco.2025.100142.
46. Unlocking the Potential of Pomelo Albedo: A Novel Substrate for Alpha-Amylase Production Using *Bacillus licheniformis* / T.N. Tran et al // Fermentation. – 2025. – № 11. – P. 336. https://doi.org/10.3390/fermentation11060336.
47. Purification of α-Amylase from Thermophilic *Bacillus licheniformi*s SO5 by Using a Novel Method, Alternating Current Magnetic-Field Assisted Three-Phase Partitioning: Molecular Docking and Bread Quality Improvement / S. Aras et al // Food Chem. – 2025. – № 484. – P. 144258. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.144258.
48. Biochemical characteristics and potential application of a thermostable starch branching enzyme from *Bacillus licheniformis* / T. Yang et al // AMB Express. – 2023. – Vol. 20, № 13(1):8. https://doi.org/10.1186/s13568-023-01511-4.
49. Optimization and purification of a novel calcium-independent thermostable, α-amylase produced by *Bacillus licheniformis* UDS-5 / S. Suthar et al // World J Microbiol Biotechnol. – 2024. – Vol. 9, № 40(12). – P. 385. https://doi.org/10.1007/s11274-024-04188-4. PMID: 39557691.
50. Донкова Н.В. Свойства штаммов *Bacillus subtilis* как продуцентов амилаз при производстве сахаросодержащей кормовой добавки / Н.В. Донкова, С.А. Донков // Вестн. КрасГАУ. – 2020. – № 5. – С. 136-141. https://doi.org/10.36718/1819-4036-2020-5-136-141.

51. Мынбаева М.Ж. Оценка некоторых пробиотических свойств *Bacillus subtilis* / М.Ж. Мынбаева, С.С. Ануарбекова, К.Х. Алмагамбетов // Биотехнология. Теория и практика. – 2010. – № 1. – С. 53-57.
52. Мынбаева М.Ж. Изучение антагонистической активности и чувствительности к антибиотикам у бацилл, выделенных из различных экологических ниш / М.Ж. Мынбаева, С.С. Ануарбекова // Вестн. КазНПУ им. Абая, серия «Естеств.-географ. науки». – 2009. – № 4 (22). – С. 17-21.
53. Сидорова Т.М. Особенности антагонизма бактерий рода *Bacillus* по отношению к токсиногенным грибам *Fusarium* при защите растений от болезни и контаминации микотоксинами (обзор) / Т.М. Сидорова, А.М. Асатурова, В.В. Аллахвердян // Юг России: экология, развитие. – 2021. – № 16(4). – С. 86-103. https://doi.org/10.18470/1992-1098-2021-4-86-103.
54. Ленченко Е.М. Исследование антагонистических свойств и чувствительности микроорганизмов к антибактериальным препаратам / Е.М. Ленченко, Ху Бинхун, Ю.В. Ломова // Аграрная наука. – 2017. – № 6. – С. 17-22.
55. Антагонистическая активность штаммов *Bacillus pumilus*, перспективных для включения в состав пробиотического препарата для животных / И.А. Функ и др. // Вестн. Алтайского гос. аграрного унив. – 2019. – № 12(182). – С. 126-130.
56. Yim S.S. Exploiting interbacterial antagonism for microbiome engineering / S.S. Yim, H.H. Wang // Curr Opin Biomed Eng. – 2021. – № 19. – P. 100307. https://doi.org/10.1016/j.cobme.2021.100307.
57. Bacterial-Fungal Interactions: Mutualism, Antagonism, and Competition / M. Zhang et al // Life. – 2025. – № 15. – P. 1242. https://doi.org/10.3390/ life15081242.
58. Khan M.F. Recent Advances in Microbial Enzyme Applications for Sustainable Textile Processing and Waste Management / M.F. Khan // Sci. – 2025. – № *7*. – P. 46. https://doi.org/10.3390/sci7020046.
59. Леонова И.Б. Основы микробиологии: учебник и практикум для ВУЗов / И.Б. Леонова. – М.: Издательство Юрайт, 2023. – 277 с. https://urait.ru/bcode/512297 (дата обращения: 18.03.2026).
60. Isolation and Characterization of a *Thermaerobacillus caldiproteolyticus* – like Strain Producing Extracellular Amylase from the Nelumwewa Geothermal Spring, Sri Lanka / S. Bandara et al // Fermentation. – 2025. – № 11. – P. 397. https://doi.org/10.3390/fermentation11070397.
61. Lim S.J. Purification and Characterisation of Thermostable α-Amylases from Microbial Sources / S.J. Lim, S.N. Hazwani-Oslan, S.N. Oslan // BioResources. – 2020. – № 15(1). – P. 2005-2029. https://doi.org/10.15376/biores.15.1.2005-2029.
62. Jaiswal N. Thermostable α-Amylases and Laccases: Paving the Way for Sustainable Industrial Applications / N. Jaiswal, P. Jaiswal // Processes. – 2024. – № 12(7). – P. 1341. https://doi.org/10.3390/pr12071341.
63. Microbial Alpha-Amylase Production: Progress, Challenges and Perspectives / B. Elyasi Far et al // Adv Pharm Bull. – 2020. – № 10(3). – P. 350-358. https://doi.org/10.34172/apb.2020.043.
64. Яковлева А.К. Перспективы использования галофильных и галотолерантных микроорганизмов в биотехнологии / А.К. Яковлева, З.А. Канарская, А.В. Канарский // Вестн. Казанского технолог. унив. – 2017. – № 8. – С. 147-151. https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-ispolzovaniya-galofilnyh-i-galotolerantnyh-mikroorganizmov-v-biotehnologii (дата обращения: 22.03.2026).
65. Extracellular hydrolytic enzymes produced by halophilic bacteria and archaea isolated from hypersaline lake / F. Karray et al // Mol Biol Rep. – 2018. – № 45. – P. 1297-1309. https://doi.org/10.1007/s11033-018-4286-5.
66. Isolation, Identification and Enzymatic Activity of Halotolerant and Halophilic Fungi from the Great Sebkha of Oran in Northwestern of Algeria / R. Chamekh et al // Mycobiology. – 2019. – V 47, Issue 2. – P. 230-241.
67. [https://vkpm.genetika.ru] (дата обращения: 22.03.2026).
68. [https://www.atcc.org/products/15841] (дата обращения: 22.03.2026).
69. [www.rcm.kz] (дата обращения: 22.03.2026).

References

1. Fermentativnaya aktivnost' zernovykh kul'tur / S.B. Gridina i dr. // Vestn. KrasGAU. – 2014. – № 8. – S. 57-60. (In Russian).
2. Skurikhin I.M. Khimicheskii sostav pishchevykh produktov / I.M. Skurikhin, M.N. Volgarev. – Izdanie 2-e, pererabotannoe i dopolnennoe. V 2-kh knigakh. – Moskva: Agropromizdat, 1987. – 584 s. (In Russian).
3. Zainobiddinov M.Z. Analiz khimicheskogo sostava zeren pshenitsy i rzhi dlya ezhednevnogo potrebleniya / M.Z. Zainobiddinov // Ehkonomika i sotsium. – 2023. – № 12(115)-1. – S. 1108-1116. (In Russian).
4. Tipsina N.N. Biologicheskaya tsennost' produktov pererabotki yachmenya / N.N. Tipsina, O.S. Pulyaeva // Vestn. KrasGAU. – 2013. – № 8. – S. 226-229. (In Russian).
5. Artyklyev Eh. Izmenenie khimicheskogo sostava zerna pri sozrevanii / Eh. Artyklyev, A. Bairamov, Sh. Garadzhaev // Innovatsionnaya nauka. – 2023. – № 12-2. – S. 77-79. (In Russian).
6. Analiz khimicheskogo sostava i pishchevoi tsennosti zernovogo syr'ya dlya proizvodstva produktov detskogo pitaniya / S.A. Urubkov i dr. // Pishchevaya promyshlennost'. – 2018. – № 8. – S. 16-21. (In Russian).
7. de Souza PM. Application of microbial α-amylase in industry / PM de Souza, P. de Oliveira Magalhães // Braz J Microbiol. – 2010. – № 41(4). – R. 850-861. https://doi.org/10.1590/S1517-83822010000400004. (In English).
8. Biokhimiya zerna i produktov ego pererabotki: uchebnoe posobie / pod red. S.V. Borisovoi. – M-vo obraz. i nauki Rossii; Kazan. nats. issled. tekhnol. un-t. – Kazan': Izd-vo KNITU, 2016. – 100 s. (In Russian).
9. Fermenty v pishchevoi promyshlennosti / R.Dzh. Uaitkherst, M. van Oort (red.). – Per. s angl, d-ra khim. nauk S.V. Makarova. – SPb.:Professiya, 2014. – 408 s., tabl.. il. – (Seriya: Ingredienty). – S. 135-138, 228-233. (In Russian).
10. Shilkova O. Vliyanie fermentov zerna na biokhimicheskie izmeneniya v nem pri khranenii / O. Shilkova, S. Beletskii, K. Gur'eva // Kombikorma. – 2018. – № 9. – S. 93-95. (In Russian).
11. Kuznetsova E.A. Fermenty: struktura, svoistva i primenenie: uchebno-metodicheskoe posobie dlya vysshego professional'nogo obrazovaniya / E.A. Kuznetsova, L.V. Cherepnina. – Orel: FGBOU VPO «Gosuniversitet – UNPK», 2013. – 175 s. (In Russian).
12. Beula Isabel J. Harnessing amylase producing novel bacterial strains from industrial waste: A bioprocessing and optimization approach / J. Beula Isabel, M. Premalatha // International Journal of Biological Macromolecules. – 2025. – Vol. 322, Part 2, 146769. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.146769. (In English).
13. Nikitina E.V. Bakterial'nye istochniki amiloliticheskikh fermentov: kharakteristika i netraditsionnoe primenenie / E.V. Nikitina // Vest. tekhnolog. univer. – 2015. – T. 18, № 19. – S. 245-248. (In Russian).
14. Izuchenie termostabil'noi amilazy shtamma Bacillus paralicheniformis / V.S. Popova i dr. // Eurasian Journal of Applied Biotechnology. – 2024. – № 3. – S. 133. (In Russian).
15. Nikitina E.V. Biotekhnologicheskie aspekty primeneniya amiloliticheskikh fermentov v pishchevoi promyshlennosti / E.V. Nikitina, O.A. Reshetnik, R.A. Gubaidullin // Vestn. Kazanskogo tekhnolog. univ. – 2013. – № 13. https://cyberleninka.ru/article/n/biotehnologicheskie-aspekty-primeneniya-amiloliticheskih-fermentov-v-pischevoy-promyshlennosti (data obrashcheniya: 01.04.2026). (In Russian).
16. Recent trends in production and potential applications of microbial amylases: A comprehensive review / Zain Ali et al // Protein Expression and Purification. – 2025. – Vol. 227, 106640. https://doi.org/10.1016/j.pep.2024.106640. (In English).
17. A broader view: microbial enzymes and their relevance in industries, medicine, and beyond / N. Gurung et al // Biomed Res Int. – 2013. – 329121. https://doi.org/10.1155/2013/329121. (In English).
18. Fikadu Hailemichael, Seferu Tadesse. Process Optimization and Industrial Application of Microbial Amylases: A Review // GSJ. – 2022. – Vol. 10, Issue 4. – R. 2643-2648. (data obrashcheniya 31.03.2026). (In English).
19. https://ru.wikipedia.org/wiki/Amilaza (data obrashcheniya: 31.03.2026). (In Russian).
20. https://ru.wikipedia.org/wiki/Krakhmal (data obrashcheniya: 31.03.2026). (In Russian).
21. https://ru.wikipedia.org/wiki/Paien,_Ansel'm (data obrashcheniya: 31.03.2026). (In Russian).

22. A novel high maltose-forming α-amylase from Rhizomucor miehei and its application in the food industry / Yu-chuan Wang et al // Food Chemistry. – 2020. – Vol. 305, 1. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125447. (In English).
23. https://propionix.ru/mikrobnaya-fermentatsiya (data obrashcheniya: 31.03.2026). (In Russian).
24. An overview of the enzyme: Amylase and its industrial potentials / M. Ahmad et al // Bayero Journal of Pure and Applied Sciences. – 2020. – 12(1). – R. 352-358. https://doi.org/10.4314/bajopas.v12i1.53S. (In English).
25. Putri AZ. Microbial α-Amylases in the Industrial Extremozymes / AZ Putri, T. Nakagawa // Reviews in Agricultural Sci. – 2020. – № 8. – R. 158-169. https://dx.doi.org/10.7831/ras.8.0_158. (In English).
26. https://en.wikipedia.org/wiki/Alpha-amylase (data obrashcheniya: 31.03.2026). (In Russian).
27. Characterization of a Thermostable α-Amylase from Bacillus licheniformis 104.K for Industrial Applications / A. Kholikov et al // Microorganisms. – 2025. – № 13. – R. 1757. https://doi.org/10.3390/microorganisms13081757. (In English).
28. Poluchenie rekombinantnoi α-amilazy Amy1UA7 iz subtilis v kletkakh E. coli / M. Kalimkulova i dr. // Biotekhnologiya. Teoriya i praktika. – 2015. – № 4. – S. 57-65. (In Russian).
29. Microbial Alpha-Amylase Production: Progress, Challenges and Perspectives / B. Elyasi Far et al // Adv Pharm Bull. – 2020. – № 10(3). – R. 350-358. https://doi.org/10.34172/apb.2020.043. (In English).
30. α-Amilaza i ee primenenie v raznykh otraslyakh promyshlennosti / Zh.B. Suleimenova i dr. // Mikrobiologiya zhəne virusologiya. – 2023. – № 3(42). – S. 52-67. https://doi.org/10.53729/MV-AS.2023.03.03. (In Russian).
31. Applications of Microbial Enzymes in Food Industry / S. Raveendran et al // Food Technology and Biotechnology. – 2018. – № 56(1). – P. 16-30. https://doi. org/10.17113/ftb.56.01.18.5491. (In English).
32. Fernandes P. Enzymatic Processing in the Food Industry / P. Fernandes // Reference Module in Food Science. – 2018. – R. 1-11. https://doi.org/10.1016/b978-0- 08-100596-5.22341-x. (In English).
33. Opredelenie aktivnosti amiloliticheskikh fermentov po gidrolizu substrata, immobilizovannogo v poliakrilamidnom gele / V.O. Maksutova i dr. // Doklady Bashkirskogo univ. – 2017. – T. 2, № 5. – S. 736-740. (In Russian).
34. Donkova N.V. Fermentativnaya aktivnost' bakterii iz roda Bacillus pri gidrolize krakhmalsoderzhashchego rastitel'nogo syr'ya / N.V. Donkova, S.A. Donkov // Vestn. KrasGAU. – 2021. – № 5. – S. 174-179. https://doi.org/10.36718/1819-4036-2021-5-174-179. (In Russian).
35. Microbial Amylolytic Enzymes in Foods: Technological Importance of the Bacillus Genus / T.C. Farias et al // Biocatal. Agric. Biotechnol. – 2021. – № 35(4). – R. 102054. https://doi.org/10.1016/j.bcab.2021.102054. (In English).
36. Obtaining and Characterizing Thermostable α-Amylases Secreted by Bacillus subtilis, Originating from Bacillus amyloliquefaciens and Bacillus subtilis / T. Soghomonyan et al // Fermentation. – 2024. – № 10(11). – R. 547. https://doi.org/10.3390/fermentation10110547. (In English).
37. Optimization of reaction conditions for the production of DAG using immobilized 1,3-regiospecific lipase Lipozyme RM IM / T. Watanabe et al // J. of the American Oil Chemists' Society. – 2003. – Vol. 80, № 12. – P. 1201-1207. (In English).
38. Davranov K.D. Otsenka fermentativnoi aktivnosti galotolerantnykh mikroorganizmov iz prirodnykh obraztsov priaral'ya / K.D. Davranov, A.I. Kulonov, K.V. Kondrasheva // Universum: khimiya i biologiya: ehlektron. nauchn. zhurn. – 2023. – № 7(109). [Ehlektron. resurs]. https://7universum.com/ru/nature/archive/item/15738.
https://doi.org/10.32743/UNICHEM.2023.109.7.15738 (data obrashcheniya: 30.03.2026). (In Russian).
39. Ishtuganova K.V. Gidroliticheskaya aktivnost' mikroorganizmov pshenichnykh otrubeĭ i soevogo zhmykha / K.V. Ishtuganova, A.V. Garicheva // Pishchevye sistemy. – 2021. – № 4(3S). – S. 93-97. https://doi.org/10.21323/2618–9771- 2021-4-3S-93-97. (In Russian).
40. Pavlov A.G. Amiloliticheskaya aktivnost' izolyatov bakterii Bacillus subtilis, vydelennykh iz mikrobioty dikikh zhivotnykh / A.G. Pavlov // Sibirskii vestnik sel'skokhoz. nauki. – 2022. – T. 52, № 5. – S. 130-135. https://doi.org/10.26898/0370-8799-2022-5-16. (In Russian).

41. Biokhimicheskie parametry rekombinantnoi α-amilazy Amy1UA7 / M.C. Kalimkulova i dr. // Nauka, Biologicheskie nauki. – 2016. – № 4-1. – S. 116-119. (In Russian).
42. Ben L. Environmental Sources of Amylase-Producing Bacteria and Their Industrial Applications / L. Ben // J Bacteriol Parasitol. – 2024. – Vol.15, Iss.S28, № 1000111. (In English).
43. Pashchenko L.P. Tekhnologiya khlebopekarnogo proizvodstva: Uchebnik / L.P. Pashchenko, I.M. Zharkova. – SPb.:«Lan'», 2014. – 672 s.: il. – S. 575-596. (In Russian).
44. Karpenko D.V. Sposob aktivatsii amiloliticheskogo fermentnogo preparata / D.V. Karpenko, T.A. Tikhonova, K.K. Khodarev // Pivo i napitki. – 2015. – № 4. – S. 42-44. (In Russian).
45. The Role of Amylase in Bioethanol Production: Advances in Amylase-Producing Strains Using CRISPR/Cas9 Technology / E.L. Tesfaye et al // Fuel Commun. – 2025. – № 23. – R. 100142. https://doi.org/10.1016/j.jfueco.2025.100142. (In English).
46. Unlocking the Potential of Pomelo Albedo: A Novel Substrate for Alpha-Amylase Production Using Bacillus licheniformis / T.N. Tran et al // Fermentation. – 2025. – № 11. – R. 336. https://doi.org/10.3390/fermentation11060336. (In English).
47. Purification of α-Amylase from Thermophilic Bacillus licheniformis SO5 by Using a Novel Method, Alternating Current Magnetic-Field Assisted Three-Phase Partitioning: Molecular Docking and Bread Quality Improvement / S. Aras et al // Food Chem. – 2025. – № 484. – R. 144258. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.144258. (In English).
48. Biochemical characteristics and potential application of a thermostable starch branching enzyme from Bacillus licheniformis / T. Yang et al // AMB Express. – 2023. – Vol. 20, № 13(1):8. https://doi.org/10.1186/s13568-023-01511-4. (In English).
49. Optimization and purification of a novel calcium-independent thermostable, α-amylase produced by Bacillus licheniformis UDS-5 / S. Suthar et al // World J Microbiol Biotechnol. – 2024. – Vol. 9, № 40(12). – R. 385. https://doi.org/10.1007/s11274-024-04188-4. PMID: 39557691. (In English).
50. Donkova N.V. Svoistva shtammov Bacillus subtilis kak produtsentov amilaz pri proizvodstve sakharosoderzhashchei kormovoi dobavki / N.V. Donkova, S.A. Donkov // Vestn. KrasGAU. – 2020. – № 5. – S. 136-141. https://doi.org/10.36718/1819-4036-2020-5-136-141. (In Russian).
51. Mynbaeva M.Zh. Otsenka nekotorykh probioticheskikh svoistv Bacillus subtilis / M.Zh. Mynbaeva, S.S. Anuarbekova, K.Kh. Almagambetov // Biotekhnologiya. Teoriya i praktika. – 2010. – № 1. – S. 53-57. (In Russian).
52. Mynbaeva M.Zh. Izuchenie antagonisticheskoi aktivnosti i chuvstvitel'nosti k antibiotikam u batsill, vydelennykh iz razlichnykh ehkologicheskikh nish / M.Zh. Mynbaeva, S.S. Anuarbekova // Vestn. KazNPU im. Abaya, seriya «Estestv.-geograf. nauki». – 2009. – № 4 (22). – S. 17-21. (In Russian).
53. Sidorova T.M. Osobennosti antagonizma bakterii roda Bacillus po otnosheniyu k toksinogennym gribam Fusarium pri zashchite rastenii ot bolezni i kontaminatsii mikotoksinami (obzor) / T.M. Sidorova, A.M. Asaturova, V.V. Allakhverdyan // Yug Rossii: ehkologiya, razvitie. – 2021. – № 16(4). – S. 86-103. https://doi.org/10.18470/1992-1098-2021-4-86-103. (In Russian).
54. Lenchenko E.M. Issledovanie antagonisticheskikh svoistv i chuvstvitel'nosti mikroorganizmov k antibakterial'nym preparatam / E.M. Lenchenko, Khu Binkhun, Yu.V. Lomova // Agrarnaya nauka. – 2017. – № 6. – S. 17-22. (In Russian).
55. Antagonisticheskaya aktivnost' shtammov Bacillus pumilus, perspektivnykh dlya vklyucheniya v sostav probioticheskogo preparata dlya zhivotnykh / I.A. Funk i dr. // Vestn. Altaiskogo gos. agrarnogo univ. – 2019. – № 12(182). – S. 126-130. (In Russian).
56. Yim S.S. Exploiting interbacterial antagonism for microbiome engineering / S.S. Yim, H.H. Wang // Curr Opin Biomed Eng. – 2021. – № 19. – R. 100307. https://doi.org/10.1016/j.cobme.2021.100307. (In English).
57. Bacterial-Fungal Interactions: Mutualism, Antagonism, and Competition / M. Zhang et al // Life. – 2025. – № 15. – R. 1242. https://doi.org/10.3390/ life15081242. (In English).
58. Khan M.F. Recent Advances in Microbial Enzyme Applications for Sustainable Textile Processing and Waste Management / M.F. Khan // Sci. – 2025. – № 7. – R. 46. https://doi.org/10.3390/sci7020046. (In English).
59. Leonova I.B. Osnovy mikrobiologii: uchebnik i praktikum dlya VUZov / I.B. Leonova. – M.: Izdatel'stvo Yurait, 2023. – 277 s. https://urait.ru/bcode/512297 (data obrashcheniya: 18.03.2026). (In Russian).

60. Isolation and Characterization of a Thermaerobacillus caldiproteolyticus – like Strain Producing Extracellular Amylase from the Nelumwewa Geothermal Spring, Sri Lanka / S. Bandara et al // Fermentation. – 2025. – № 11. – R. 397. https://doi.org/10.3390/fermentation11070397. (In English).
61. Lim S.J. Purification and Characterisation of Thermostable α-Amylases from Microbial Sources / S.J. Lim, S.N. Hazwani-Oslan, S.N. Oslan // BioResources. – 2020. – № 15(1). – P. 2005-2029. https://doi.org/10.15376/biores.15.1.2005-2029. (In English).
62. Jaiswal N. Thermostable α-Amylases and Laccases: Paving the Way for Sustainable Industrial Applications / N. Jaiswal, P. Jaiswal // Processes. – 2024. – № 12(7). – R. 1341. https://doi.org/10.3390/pr12071341. (In English).
63. Microbial Alpha-Amylase Production: Progress, Challenges and Perspectives / B. Elyasi Far et al // Adv Pharm Bull. – 2020. – № 10(3). – P. 350-358. https://doi.org/10.34172/apb.2020.043. (In English).
64. Yakovleva A.K. Perspektivy ispol'zovaniya galofil'nykh i galotolerantnykh mikroorganizmov v biotekhnologii / A.K. Yakovleva, Z.A. Kanarskaya, A.V. Kanarskii // Vestn. Kazanskogo tekhnolog. univ. – 2017. – № 8. – C. 147-151. https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-ispolzovaniya-galofilnyh-i-galotolerantnyh-mikroorganizmov-v-biotehnologii (data obrashcheniya: 22.03.2026). (In Russian).
65. Extracellular hydrolytic enzymes produced by halophilic bacteria and archaea isolated from hypersaline lake / F. Karray et al // Mol Biol Rep. – 2018. – № 45. – P. 1297-1309. https://doi.org/10.1007/s11033-018-4286-5. (In English).
66. Isolation, Identification and Enzymatic Activity of Halotolerant and Halophilic Fungi from the Great Sebkha of Oran in Northwestern of Algeria / R. Chamekh et al // Mycobiology. – 2019. – V 47, Issue 2. – P. 230-241. (In English).
67. [https://vkpm.genetika.ru] (data obrashcheniya: 22.03.2026). (In Russian).
68. [https://www.atcc.org/products/15841] (data obrashcheniya: 22.03.2026). (In Russian).
69. [www.rcm.kz] (data obrashcheniya: 22.03.2026). (In Russian).

Информация о финансировании

Данное исследование финансировалось/финансируется Комитетом по науке Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант №AP26104701).

С.С. Ануарбекова[*], Д.А. Шаймерденова[1], Ж.М. Чаканова[1], М.Ж. Кизатова[2]
[1]«Инноватор» ғылыми-өндірістік кәсіпорын» ЖШС, Қазақстан Республикасы, Астана қ.
[2]ҰАҚ «С.Д. Асфендияров атындағы Қазақ ұлттық медицина университеті»,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.
*e-mail: sanuarbekova@rambler.ru

АМИЛАЗА ЖӘНЕ АМИЛОЛИТИКАЛЫҚ ФЕРМЕНТТЕРДІ ӨНДІРЕТІН МИКРООРГАНИЗМДЕР

Амилолитикалық ферменттер – өндірістік маңызды ферменттердің бірі, олардың өндірістік пайызы жоғары. Олардың әрекеті крахмал молекулаларының глюкозаға гидролизіне негізделген. Амилазалар күнделікті өмірде, тамақ, тоқыма, қағаз, крахмал өңдеу, фармацевтикалық өндірісте, диагностикалық және терапиялық салаларда қолданылады. Оларды өсімдіктер, жануарлар және микроорганизмдер өндіреді. Пайдаланылатын продуценттердің негізгі пайызы микроорганизмдер болып табылады, себебі микробтық амилазалар тұрақтырақ, тиімдірек және экономикалық тұрғыдан тиімдірек. Амилолитикалық ферменттердің негізгі өндірушілері - Bacillus, Lactobacillus, Klebsiella, Halobacillus және басқа туыстастарының бактериялары, Aspergillus, Penicillium, Rhizopus, Mucor, Trichoderma және басқа туыстастарының саңырауқұлақтары, әртүрлі актиномицеттер мен ашытқылар. Олардың белсенділігі ферменттерді бөліп алу, содан кейін ашыту үшін жағдайлар мен қоректік ортаны таңдау мүмкіндігіне негізделген. Бұл шолу бактериялық және саңырауқұлақ тектес гидролитикалық фермент амилазасының маңыздылығын атап көрсетеді, әртүрлі өнеркәсіптік қолданбаларда қолданылатын жаһандық дақыл штамдары мен коммерциялық препараттарды атап көрсетеді. Жоба барысында біз дәнді дақылдардан перспективалы ферментативті белсенді бактериялық және саңырауқұлақ дақылдарын бөліп алдық. Олардың ішінде Bacillus sp. туысының алты бактериялық дақылы белсенділік көрсетті. Олардын фенотиптік және генотиптік сипаттамалары анықталған.

Түйін сөздер: *бактериялар, саңырауқұлақтар, штамм, амилаза, амилолитикалық белсенділік, биотехнология өнеркәсібі.*

S. Anuarbekova[*], D. Shaimerdenova[1], Zh. Чаканова[1], M. Кизатова[2]
[1]LLP “Research and Production Enterprise «Innovator», Astana c., Kazakhstan
[2]Kazakh National Medical University named after S.D. Asfendiyarov
Almaty c., Kazakhstan,
*e-mail: sanuarbekova@rambler.ru

AMYLASE AND MICROORGANISMS PRODUCING AMYLOLYTIC ENZYMES

Amylolytic enzymes are among the significant industrial enzymes with a high percentage of production. Their action is based on the hydrolysis of starch molecules to glucose. Amylases are used in everyday life, in the food, textile, paper, starch processing industries, in the manufacture of pharmaceuticals, in diagnostics and treatment. The producers are plants, animals, and microorganisms. The main percentage of producers are microorganisms, as microbial amylases are more stable, effective and economically beneficial.The main producers of amylolytic enzymes are bacteria of the genera Bacillus, Lactobacillus, Klebsiella, Halobacillus and others, fungi of the genera Aspergillus, Penicillium, Rhizopus, Mucor, Trichoderma and others, various actinomycetes and yeasts. Their activity is based on the ability to secrete enzymes with further selection of conditions and nutrient media for fermentation. This review highlights the importance of the hydrolytic enzyme amylase of bacterial and fungal origin, global crop strains and commercial preparations used in various industrial fields. In the process of working on the project, we isolated promising enzymatically active cultures of bacteria and fungi from grain crops. Among them, 6 cultures of bacteria of the genus Bacillus sp are active. Phenotyptic and genotypic sipattamalary anktalgan. Their phenotypic and genotypic characteristics are noted.

Key words: *bacteria, fungi, strain, amylase, amylolytic activity, biotechnology industry.*

Сведения об авторах

Сандугаш Сакеновна Ануарбекова* – кандидат медицинских наук (03.00.07 – микробиология), ведущий научный сотрудник ТОО «Научно-производственное предприятие «Инноватор», г. Астана, РК; e-mail: sanuarbekova@rambler.ru. ORCID: http://orcid.org/0000-0001-8770-3160.

Даригаш Арыновна Шаймерденова – доктор технических наук, главный научный сотрудник ТОО «Научно-производственное предприятие «Инноватор», г. Астана, РК; e-mail: darigash@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8961-8955.

Жанар Меирхановна Чаканова – ведущий научный сотрудник ТОО «Научно-производственное предприятие «Инноватор», г. Астана, РК; e-mail: janara_78@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7798-128X.

Майгуль Жалеловна Кизатова – доктор технических наук, профессор кафедры фармацевтической технологии НАО «Казахский национальный медицинский университет имени С.Д. Асфендиярова», г. Алматы, РК. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6481-7410.

Авторлар туралы мәліметтер

Сандуғаш Сакеновна Ануарбекова* – медицина ғылымдарының кандидаты (03.00.07 – микробиология), «Инноватор» ғылыми-өндірістік кәсіпорын» ЖШС-нің жетекші ғылыми қызметкері, Астана қ., ҚР; e-mail: sanuarbekova@rambler.ru. ORCID: http://orcid.org/0000-0001-8770-3160.

Дариғаш Арыновна Шаймерденова – техника ғылымдарының докторы, «Инноватор» ғылыми-өндірістік кәсіпорын» ЖШС-нің бас ғылыми қызметкері, Астана қ., ҚР; e-mail: darigash@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8961-8955.

Жанар Меирхановна Чаканова – «Инноватор» ғылыми-өндірістік кәсіпорын» ЖШС-нің жетекші ғылыми қызметкері, Астана қ., ҚР; e-mail: janara_78@mail.ru. ORCID: http://orcid.org/0000-0001-7798-128X.

Майгуль Жалеловна Кизатова – техника ғылымдарының докторы, «С.Д. Асфендияров атындағы Қазақ ұлттық медицина университеті» КЕАҚ фармацевтикалық технология кафедрасының профессоры, Алматы қ., ҚР. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6481-7410.

Information about the authors

Sandugash Anuarbekova* – Candidate of Medical Sciences (03.00.07 – microbiology), Leading Researcher in LLP «Research and Production Enterprise «Innovator», Astana, RK; e-mail: sanuarbekova@rambler.ru. ORCID: http://orcid.org/0000-0001-8770-3160.

Darigash Shaimerdenova – Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher in LLP «Research and Production Enterprise «Innovator», Astana, RK; e-mail: darigash@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8961-8955.

Zhanar Chakanova – Leading Researcher in LLP «Research and Production Enterprise «Innovator», Astana, RK; e-mail: janara_78@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7798-128X.

Maigul Kizatova – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Pharmaceutical Technology of the Kazakh National Medical University named after S.D. Asfendiyarov, Almaty, RK. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6481-7410.

Поступила в редакцию 01.06.2026
Поступила после доработки 01.07.2026
Принята к публикации 01.07.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-44

BY 4.0
Check for updates

ҒТАХР: 65.47.03

Д.Н. Бакытжан[*], Э.Б. Аскарбеков[2], А.К. Кекибаева[1]
[1]Алматы технологиялық университеті,
050012, Қазақстан Республикасы, Алматы қ, Толе би көш, 100
[2]Қ.Құлажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті,
010000, Қазақстан Республикасы, Астана қ, Қайым Мұхамедханов көш, 37А
*e-mail: Erik_ab82@mail.ru

СЫРА ӨНДІРІСІ ҮШІН БИДАЙ УЫТЫНЫҢ САПАСЫН ЗЕРТТЕУ

Аңдатпа: *Зерттеу қазақстандық жоғары ақуызды бидай сорттарын сыралық уыт өндірісінде қолдану мүмкіндігін технологиялық тұрғыдан бағалауға арналған. Отандық бидайдың едәуір бөлігі ақуыз мөлшерінің жоғары болуымен сипатталатындықтан, мұндай шикізатты уыт алу процесіне тікелей енгізу әрдайым тұрақты нәтиже бермейді. Осы жұмыста «Казахстанская 10» және «Стекловидная-24» сорттары салыстырылып, дәстүрлі әдіспен қатар суландыру мен өсірудің үш тәжірибелік схемасы зертханалық жағдайда сыналды. Сынамалар 2024 жылғы өнімнен алынып, дәннің ылғалдану динамикасы, өсіру ұзақтығы, дайын уыттың органолептикалық және физика-химиялық көрсеткіштері бағаланды. Тәжірибе нәтижелері бойынша №1 схема ылғалдың жеткіліксіз жиналуына, ал №2 схема кейбір үлгілерде шамадан тыс ылғалдануға әкелетіні анықталды. Қысқа суландыру кезеңдері мен ауа үзілістерін үйлестірген № 3 схема екі сорт үшін де технологиялық тұрғыдан неғұрлым теңгерімді болды: соңғы ылғалдылық 44,4-52,2% аралығында қалыптасты, ал өсіру 96 сағатта аяқталды. Дайын уыттың экстрактивтілігі 78-79% болып, сыралық уытқа қойылатын нормативтік талаптардан жоғары нәтиже көрсетті. Екі сорт та қолдануға жарамды болғанымен, ақуыз мөлшерінің төмендігі және технологиялық тұрақтылығы бойынша «Стекловидная-24» сорты тиімдірек шикізат ретінде бағаланды. Жұмыстың ғылыми жаңалығы жергілікті жоғары ақуызды бидай үшін суландыру-өсіру режимдерінің салыстырмалы бағалануы және № 3 схеманың практикалық қолдануға негізделуімен сипатталады.*

Түйін сөздер*: бидай уыты, сыра өндірісі, қазақстандық бидай сорттары, жоғары ақуызды шикізат, суландыру схемасы, ауа үзілісі, өсіру режимі, экстрактивтілік, технологиялық жарамдылық.*

Кіріспе

Сыра өндірісінде бидай уыты негізінен өнімнің дәмдік толықтығын, көбіктұрақтылығын және суслоның құрамын қалыптастыратын қосымша немесе негізгі шикізат ретінде пайдаланылады. Алайда бидай дәнінің қауызсыз құрылымы мен полисахаридтік құрамының ерекшелігі оны арпа уытымен бірдей технологиялық режимде өңдеуге мүмкіндік бере бермейді. Суландыру кезінде су дәнге тез енгенімен, эндоспермнің біркелкі модификациялануы үшін оттегінің жеткілікті берілуі, көмірқышқыл газының шығарылуы және ылғалдың қабаттар арасында таралуы маңызды. Сондықтан бидай уытын өндіруде негізгі мәселе тек шикізатты таңдау емес, нақты сорттың физиологиялық реакциясына сәйкес келетін суландыру және өсіру режимін негіздеу болып табылады [1, 2].

Қазақстандық бидай сорттары үшін бұл мәселе ерекше мәнге ие, өйткені жергілікті климат жағдайында қалыптасқан дән көбіне жоғары ақуыздылығымен сипатталады. МЕМСТ 29294-2021 бойынша уыт өндірісіне арналған бидайдағы ақуыздың шекті мөлшері 12,2%-дан аспауы тиіс [3], ал отандық сорттарда бұл көрсеткіш жиі 13,7-15,2% аралығында кездеседі.

©Д.Н. Бакытжан, Э.Б. Аскарбеков, А.К. Кекибаева, 2026

Ақуыздың жоғары болуы дәннің ферменттік модификациясына, суслоның мөлдірлігіне және сыраның коллоидтық тұрақтылығына әсер етуі мүмкін. Осы себепті жоғары ақуызды жергілікті бидайды жарамсыз деп бірден алып тастау емес, оның технологиялық мүмкіндігін нақты тәжірибелік режимдер арқылы тексеру қажет.

Әдеби деректерде бидай мен арпа уытының сапасына генотип, өсіру ортасы және дән құрылымы әсер ететіні көрсетілген [4-9]. Соған қарамастан, Қазақстанның оңтүстік және оңтүстік-шығыс аймақтарында өсірілетін «Казахстанская 10» және «Стекловидная-24» сияқты сорттарға қатысты суландыру сатыларының ұзақтығы, ауа үзілістерінің рөлі және негізгі өсіру мерзімі бойынша жүйеленген тәжірибелік мәліметтер жеткіліксіз. Осы зерттеудегі ғылыми алшақтық жергілікті жоғары ақуызды бидайды сыралық уытқа бейімдеу үшін нақты технологиялық режимдердің салыстырмалы түрде бағаланбауымен байланысты.

Зерттеудің мақсаты – « Казахстанская 10» және «Стекловидная-24» сорттарынан сыра өндірісіне жарамды бидай уытын алу мүмкіндігін бағалау және жоғары ақуызды жергілікті шикізат үшін суландыру–өсіру кезеңдерінің неғұрлым тиімді үйлесімін анықтау.

Зерттеудің міндеттері: «Стекловидная-24» және «Казахстанская 10» бидай сорттарының физика-химиялық және технологиялық қасиеттерін бағалау; әртүрлі суландыру және өсіру режимдерінің ішінде технологиялық тұрғыдан тиімді схеманы анықтау; алынған бидай уытының органолептикалық және физика-химиялық көрсеткіштерін нормативтік талаптармен салыстыру арқылы оның сыра өндірісіне жарамдылығын бағалау.

Зерттеу нысандары мен әдістері

Зерттеу нысандары ретінде Қазақстан Республикасының оңтүстік-шығыс аймағында өндірістік егістерде кездесетін жаздық жұмсақ бидайдың екі сорты – «Стекловидная-24» және « Казахстанская 10» таңдалды (1-сурет). Бұл сорттар бірдей дақыл тобына жатса да, дәннің шынылығы, натурасы, вегетациялық ұзақтығы және технологиялық икемділігі бойынша айырмашылықтарға ие. Сондықтан оларды қатар сынау бір ғана режимнің әртүрлі шикізатқа қалай әсер ететінін бағалауға мүмкіндік берді.



Казахстанская 10



Стекловидная 24

Сурет 1 – Зерттеуге алынған отандық бидай сорттары

«Стекловидная-24» сорты люстесценс түр тармағына жататын жаздық жұмсақ бидай ретінде сипатталады. Оның дәні жоғары шынылығымен және натурасының тұрақтылығымен ерекшеленеді, бұл бастапқы күйде эндоспермнің тығыз болуын білдіреді. Мұндай қасиет суландыру кезінде ылғалдың таралу жылдамдығына әсер етуі мүмкін, бірақ дұрыс таңдалған ауа үзілістері ферменттік модификацияның біркелкі жүруіне жағдай жасайды. Осы себепті сорт тәжірибеде жоғары шынылы шикізаттың уытқа бейімделуін бағалау үшін қолданылды.

«Казахстанская 10» сорты ерте пісетін және тәлімі егіншілік аймақтарына бейімделген жаздық жұмсақ бидай ретінде алынды. Оның шынылығы «Стекловидная–-24» сортымен салыстырғанда төменірек, ал қуаңшылыққа төзімділігі жоғары. Бұл сорт жергілікті астық өндірісінде кеңірек қолданылатын шикізат типін сипаттайды және ылғалды қабылдау қарқыны мен дайын уыт сапасының ақуыз мөлшерімен байланысын салыстыру үшін енгізілді. Екі сорттың негізгі көрсеткіштері 1-кестеде берілді.

Дән үлгілері 2024 жылғы өнімнен, Алматы облысы Қарасай ауданындағы тәлімі егіншілік жағдайында өсірілген партиялардан іріктелді. Әр сорт бойынша зертханалық талдауға арналған орташа үлгі массасы 2,3-2,5 кг болды. Зерттеу басталғанға дейін үлгілер ауа-құрғақ күйде сақталып, бастапқы ылғалдылықтың тұрақтылығы бақыланды. Мұндай дайындық кейінгі

суландыру сатыларында сорттардың ылғалды қабылдау айырмашылығын салыстыруға мүмкіндік берді.

Кесте 1 – Зерттеу нысаны ретінде алынған бидай сорттарының шаруашылық-биологиялық сипаттамасы

Көрсеткіш	«Стекловидная-24»	Казахстанская 10
Ботаникалық түр тармағы	лютесценс	эритроспермум
Вегетациялық кезең, тәулік	82-90	78-85
Өсімдік биіктігі, см	85-105	80-100
1000 дән массасы, г	38-44	36-41
Натурасы, г/л	782-805	770-795
Шынылығы, %	67-74	52-61
Жапырылуға төзімділік, балл	4,5-4,8	4,6-4,8
Қуаңшылыққа төзімділік, балл	4,3-4,5	4,7

Сорттарды таңдау ақуыз мөлшері мен дән құрылымындағы айырмашылықтарды салыстыруға негізделді. МЕМСТ 29294-2021 стандарты уыт өндірісіне арналған бидайдағы ақуыз мөлшерін 12,2%-дан асырмауды ұсынады, ал зерттеуге алынған жергілікті шикізат бұл шектеуге жақын немесе одан жоғары болуы мүмкін. Сондықтан тәжірибе жоғары ақуызды дәнді технологиялық режим арқылы өңдеуге бейімдеуге болатынын тексеруге бағытталды. «Стекловидная-24» сорты эндосперм тығыздығы жоғары үлгі ретінде, ал «Казахстанская 10» сорты орташа шынылығы бар аймақтық шикізат ретінде қарастырылды.

Зерттеу жұмыстары Алматы технологиялық университетінің «Нан өнімдері мен қайта өңдеу өндірістерінің технологиясы» кафедрасына қарасты «Ашыту өндірістері мен шарап жасау технологиясы» оқу зертханасында және Тағам қауіпсіздігі ғылыми-зерттеу институтының зертханалық базасында орындалды. Технологиялық кезеңдер бірізді жүргізілді: дәнді қабылдау және тазалау, залалсыздандыру, таңдалған схема бойынша суландыру, ауа үзілістерін сақтау, өсіру, кептіру, өскіндерді бөлу және дайын уыттың сапасын бағалау.

Сапа көрсеткіштері қолданыстағы нормативтік құжаттар талаптарына сәйкес анықталды. Ақуыздың массалық үлесі SupNIR 2720 аспабында жақын инфрақызыл спектроскопия әдісімен өлшенді. Дәннің ылғалдылығы әрбір негізгі суландыру кезеңінен кейін бақыланды, себебі бұл көрсеткіш кейінгі өну қарқыны мен уыттың модификациялану деңгейін бағалаудың негізгі индикаторы ретінде пайдаланылды.

Тәжірибелік үлгілерді салыстырмалы талдау үшін кодтау жүйесі қолданылды. Кодтау сорт атауын және қолданылған технологиялық схеманы бір мезгілде көрсетуге мүмкіндік берді: мысалы, «К1-С3» белгісі «Казахстанская 10» сортының № 3 схема бойынша алынған үлгісін, ал «С24-С3» белгісі «Стекловидная-24» сортының сол схема бойынша алынған үлгісін білдіреді. Сынамалардың толық сипаттамасы 2-кестеде берілді.

Кесте 2 – Бидай дәнін өсіру кезіндегі тәжірибелік сынамаларды кодтау және нөмірлеу схемасы

Сынама нөмірі (коды)	Бидай сорты	Өсірудің технологиялық схемасы	Сипаттамасы / Схема шарттары
Сынама № 1 (К1-С1)	Казахстанская 10	Схема № 1	Қысқа суландыру (суландыру ұзақтығы мен ауа үзілістері өзгертілген)
Сынама № 2 (К1-С2)		Схема № 2	Балама схема №2 (суландыру ұзақтығы мен ауа үзілістері өзгертілген)
Сынама № 3 (К1-С3)		Схема № 3	Балама схема №3 (көп сатылы суландыру және ұзартылған ауа үзілістері)
Сынама № 4 (С24-С1)	Стекловидная 24	Схема № 1	Қысқа суландыру (суландыру ұзақтығы мен ауа үзілістері өзгертілген)
Сынама № 5 (С24-С2)		Схема № 2	Балама схема №2 (суландыру ұзақтығы мен ауа үзілістері өзгертілген)
Сынама № 6 (С24-С3)		Схема № 3	Балама схема №3 (көп сатылы суландыру және ұзартылған ауа үзілістері)

Дәнді суландыру алдында барлық үлгілер 0,02%-дық калий перманганаты ($KMnO_4$) ерітіндісінде 1 сағат бойы залалсыздандырылып, кейін ағын сумен толық шайылды. Суландыру кезінде дән мен судың арақатынасы 1:2 көлемдік қатынаста сақталды. Су температурасы 14-16°C деңгейінде ұсталып, әр суландыру кезеңінен кейін толық ауыстырылып отырды. Өсіру барысында дән қабатының қалыңдығы 5-7 см болды. Дән әрбір 6 сағат сайын араластырылып, көмірқышқыл газы шығарылып отырды. Кептіру үш фазада жүргізілді: бірінші кезеңде 45°C температурада 4 сағат, екінші кезеңде 60°C температурада 6 сағат, соңғы кезеңде 80°C температурада 2 сағат кептірілді. Кептіру соңында уыттың соңғы ылғалдылығы 5%-дан аспады.

Зерттеу нәтижелері

Бидай дәнінен уыт өндіру режимін оңтайландыру мақсатында зертханалық жағдайда төрт түрлі технологиялық тәсіл бойынша салыстырмалы сынақтар жүргізілді. Дәстүрлі бидай уытын алу әдістемесі және үш тәжірибелік схема [10]. Дәстүрлі әдістеме базалық бағдар ретінде алынды, ал зерттеу схемалардың айырмашылығы – суландыру кезеңдерінің ұзақтығы мен ауа үзілістерінің санында. Барлық тәсілдерде өсіру температурасы 15°C деңгейінде тұрақтандырылды. Схемалардың толық сипаттамасы 3-кестеде келтірілген.

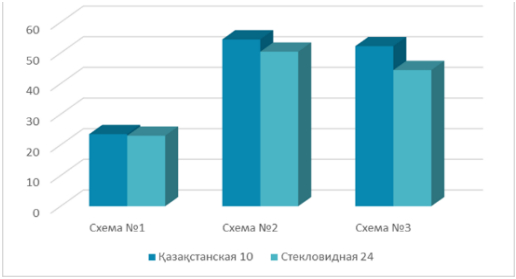
Кесте 3 – Зерттеуге алынған уыт суландыру схемаларының параметрлері

Кезең	Дәстүрлі әдіс	Схема № 1	Схема № 2	Схема № 3
Дезинфекция, сағ	1			
1-ші суландыру, сағ	24-48	2	4	2
1-ші ауа үзілісі, сағ	–	27	3	19,5
2-ші суландыру, сағ	–	3	3	3
2-ші ауа үзілісі, сағ	–	–	–	3
3-ші суландыру, сағ	–	–	–	3
Негізгі өсіру, сағ	120	~49	~100	96

Әр үлгіге берілген кодтар нәтижелерді кестелер мен суреттермен байланыстырып талдауға мүмкіндік берді. Мысалы, «К1-С3» және «С2-С3» үлгілері бір технологиялық схемада алынғанымен, соңғы ылғалдылықтарының айырмашылығы сорттық ерекшеліктің су сіңіру динамикасына ықпалын көрсетеді.

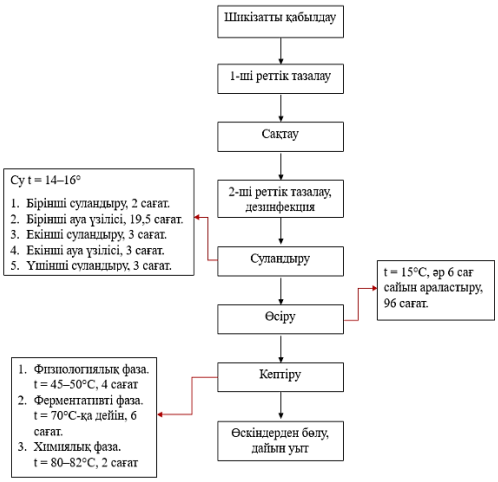
Суландыру схемаларының тиімділігі әр сатыдан кейінгі ылғалдылық өзгерісі арқылы бағаланды. Бұл көрсеткіш тәжірибеде шешуші болып саналды, себебі төмен ылғал ферменттік процестердің баяу жүруіне, ал артық ылғал дәннің тыныс алу режимінің бұзылуына және қабаттың қызып кету қаупіне әкелуі мүмкін.

2-суретте берілген соңғы ылғалдылық мәндері үш тәжірибелік схеманың әсерін салыстыруға мүмкіндік береді. №1 схема ылғал жинауды жеткілікті деңгейге жеткізбеді, №2 схема кейбір үлгілерде артық ылғалдану қаупін көрсетті, ал №3 схема екі сорт үшін де технологиялық жағынан қолайлы аралықты қамтамасыз етті.



Сурет 2 – Әртүрлі суландыру схемалары бойынша қол жеткізілген соңғы ылғалдылықты салыстыру

№ 3 схема бойынша ұсынылған технологиялық тізбек 3-суретте жинақталды. Схемада шикізатты қабылдаудан бастап дайын уытты өскіндерден бөлуге дейінгі сатылар көрсетілген, бұл тәжірибелік режимді тек жеке операция ретінде емес, толық технологиялық процесс ретінде бағалауға мүмкіндік береді.



Сурет 3 – Схема №3 бойынша бидай уытын өндірудің принципиалды-технологиялық схемасы

Дайын уыттың сапасын бағалау үшін 4-кестедегі органолептикалық және физика-химиялық көрсеткіштер пайдаланылды. Бұл кезеңде негізгі назар ылғалдылық, экстрактивтілік, ақуыз мөлшері, шынылық және 1000 дән массасы сияқты сыра өндірісі үшін маңызды белгілерге аударылды.

Кесте 4 – Бидай уытының сапа көрсеткіштері

Көрсеткіштер	«Стекловидная-24»	«Казахстанская-10»	Норматив (сыралық уыт үшін)
Органолептикалық көрсеткіштер			
Түсі	Ашық-сары, біркелкі	Ашық-сары	Ашық-сарыдан алтын түске дейін
Иісі	Таза, уытқа тән, бөгде иіссіз		Уытқа тән, бөгде иіссіз
Дәмі	Жеңіл тәтті, жағымды		Тәттілеу, ащы емес
Қоспалар	-	-	Болмауы тиіс
Физика-химиялық көрсеткіштер			
Ылғалдылығы, %	5,2	5,4	5,0-8,1
Абсолюттік масса (1000 дән), г	31,4	32,9	≥ 30
Шынылық, %	4,5	6	≤ 10
Экстрактивтілік, %	78	79	≥ 75
Ақуыз мөлшері, %	12,74	13,89	9–13
Клетчатка, %	2,3	2,5	3–5
Қанттану ұзақтығы, мин	15	20	≤ 15
Суслоның мөлдірлігі	Мөлдір	Сәл опалесценциясы бар	Мөлдір немесе сәл опалесценциялы
Кольбах саны (еріген ақуыз үлесі), %	39,5	36,2	36-43

Ғылыми нәтижелерді талқылау

Суландыру және өсіру режимдерінің әсерін талдау дәннің тек су сіңіру қабілетін емес, оның кейінгі ферменттік өзгерістерге дайындық деңгейін де көрсетеді. Бидай дәнінде қауыздың болмауы алғашқы ылғалдануды жеңілдетеді, алайда тұрақты уыт сапасы үшін ылғалдың эндосперм бойымен біркелкі таралуы және ауа үзілістерінде тыныс алу өнімдерінің шығарылуы қажет. Осы тұрғыдан алғанда, зерттелген үш схема бір-бірінен технологиялық теңгерімі бойынша ерекшеленді.

Дәстүрлі технологияда суландыру 24-48 сағатқа, ал негізгі өсіру шамамен 120 сағатқа созылады. Мұндай режим сенімді бақылау нұсқасы ретінде қолданылды, бірақ өндірістік тұрғыдан ұзақ циклге және жоғары энергия шығынына әкеледі. Сондықтан тәжірибелік схемалар процесті қысқартумен қатар дайын уыт сапасын төмендетпеу талабымен бағаланды.

№ 1 схема ең қысқа нұсқа болды: 2 сағаттық суландырудан кейін 27 сағаттық ауа үзілісі және 3 сағаттық екінші суландыру жүргізілді, ал негізгі өсіру шамамен 49 сағатқа созылды. Бұл режим уақытты үнемдегенімен, 2-суретте көрсетілгендей, соңғы ылғалдылық 20-27% деңгейінен аспады. Мұндай мөлшер бидай уыты үшін жеткіліксіз, себебі ферменттердің белсендірілуі мен эндоспермнің жұмсаруы толық жүрмейді.

№ 2 схема алғашқы қарағанда ылғалды біркелкі жинауға бағытталғанымен, тәжірибеде артық ылғалдану белгісін көрсетті. Бұл нұсқада бірінші суландыру 4 сағатқа созылып, қысқа ауа үзілісінен кейін екінші суландыру жүргізілді; негізгі өсіру шамамен 100 сағат болды. Соңғы ылғалдылық «Казахстанская 10» сортында 54,4%-ға, «Стекловидная-24» сортында 50,4%-ға жетті. Мұндай мәндер дәннің тыныс алу режимін қиындатып, қабаттың тығыздалуы мен технологиялық тұрақсыздық қаупін арттыруы мүмкін.

№ 3 схема қысқа суландыру кезеңдерін ұзартылған және қысқа ауа үзілістерімен үйлестіру арқылы ерекшеленді. Бірінші 2 сағаттық суландырудан кейін 19,5 сағаттық ауа үзілісі берілді, содан соң 3 сағаттық екінші суландыру, 3 сағаттық ауа үзілісі және 3 сағаттық үшінші суландыру жүргізілді. Бұл құрылым дәннің бірден шамадан тыс ісінуіне жол бермей, ылғалдың ішкі қабаттарға таралуына және оттегімен қамтамасыз етілуіне жағдай жасады.

Соңғы ылғалдылық деректері №3 схеманың артықшылығын нақты көрсетті: «Казахстанская 10» сортында 52,2%, ал «Стекловидная-24» сортында 44,4% тіркелді. Бұл диапазон № 1 схемадағы жеткіліксіз ылғалдану мен № 2 схемадағы артық ылғалдану арасындағы технологиялық теңгерімді сипаттайды. Сонымен қатар, өсіру кезеңінің 96 сағатқа дейін қысқаруы дәстүрлі 120 сағаттық нұсқамен салыстырғанда процесті ықшамдауға мүмкіндік берді.

3-суретте берілген технологиялық тізбек № 3 схеманың тәжірибелік режимнен өндірістік операциялар жүйесіне қалай енгізілетінін көрсетеді. Шикізатты қабылдау, екі сатылы тазалау, залалсыздандыру, үш сатылы суландыру, екі ауа үзілісі, өсіру, кептіру және өскіндерді бөлу бір-бірімен байланысты кезеңдер ретінде қарастырылды. Бұл байланыс дайын уыт сапасының тек бір параметрге емес, барлық операциялардың реттілігіне тәуелді екенін көрсетеді.

Әдеби деректер бойынша бидай уытын өндіру кезінде дәннің соңғы ылғалдылығы шамамен 42-46% аралығында болған жағдайда ферменттік жүйенің қалыптасуы анағұрлым тиімді жүреді, ал 50%-дан жоғары ылғалдылық дәннің тыныс алу қарқындылығын арттырып, микробиологиялық тәуекелді жоғарылатады [3, 4]. № 2 схема бойынша алынған 54,4% ылғалдылық технологиялық тұрғыдан шамадан тыс суландыруды көрсетеді. Мұндай жағдайда эндосперм құрылымының шамадан тыс жұмсаруы байқалып, кейінгі кептіру кезінде энергия шығыны көбейеді. Ал № 3 схема бойынша алынған нәтижелер екі сорт үшін де технологиялық процестің тұрақтылығын қамтамасыз етті. «Стекловидная-24» сортындағы 44,4% көрсеткіші әдебиетте ұсынылған оңтайлы диапазонға сәйкес келеді, ал «Казахстанская 10» сортындағы 52,2% көрсеткіші дәннің жоғары ақуыздылығына байланысты суды көбірек байланыстыру қабілетімен түсіндіріледі.

Дәнді бастапқы тазалау ірі қоспалар мен зақымдалған түйірлерді бөлу үшін жүргізілді. Сұрыптау кезінде 2,5 мм елек үстіндегі қалдықтың кемінде 90% болуы ескерілді, өйткені өлшемі жақын дәндер суды біркелкі қабылдайды және өсіру кезінде біркелкі модификацияланады. Залалсыздандырудың 1 сағаттық кезеңі микробиологиялық тәуекелді төмендету және кейінгі суландыруды тұрақты жағдайда бастау үшін қолданылды.

Бірінші суландыру кезінде залалсыздандырылған дән 14-16 °С температурадағы суда 2 сағат ұсталды. Осы қысқа кезеңнің өзінде «Казахстанская 10» ылғалдылығы 43,2%-ға, ал «Стекловидная-24» ылғалдылығы 32,6%-ға жетті. Айырмашылық екі сорттың дән құрылымы мен шынылығы әртүрлі екенін көрсетеді: тығыз эндосперм ылғалды баяу қабылдайды, сондықтан кейінгі ауа үзілісінің маңызы артады.

Бірінші ауа үзілісі 19,5 сағатқа созылды және № 3 схеманың негізгі реттеуші кезеңі болды. Бұл уақытта дән су ішінде қалмай, оттегімен байланыста болды; тыныс алу процесі белсеніп, көмірқышқыл газы сыртқа шығарылды. Ұзартылған ауа үзілісі ылғалдың дән ішінде қайта таралуына мүмкіндік беріп, беткі қабаттың шамадан тыс ісінуін шектеді.

Екінші суландыру 3 сағат жүргізілгеннен кейін ылғалдылық «Казахстанская 10» сортында 45,0%-ға, ал «Стекловидна-24» сортында 35,2%-ға көтерілді. Бұл өсім бірінші суландырумен

салыстырғанда баяуырақ болды, яғни ауа үзілісінен кейін дән ылғалды біртіндеп қабылдаған. Мұндай динамика көпсатылы суландырудың артықшылығын көрсетеді.

Екінші ауа үзілісі 3 сағатқа созылды. Оның міндеті ұзақ тынығудан кейінгі дән қабатын қайта желдету, көмірқышқыл газының жиналуын азайту және соңғы суландыру алдында физиологиялық белсенділікті тұрақтандыру болды. Казахстанская Үшінші суландыру ылғалдылықты қажетті деңгейге жеткізді: «Казахстанская 10» үшін 52,2%, «Стекловидная–24» үшін 44,4%. Осы сатыдан кейін дәннің сыртқы бетінде артық су жиналмай, ісінуі біркелкі байқалды. Бұл №3 схеманың дәнді өсіру кезеңіне дайындауда тиімді болғанын көрсетеді.

Суландырылған дән өсіру камерасына ауыстырылып, 96 сағат бойы 15°С температурада ұсталды. Қабат әр 6 сағат сайын араластырылды, бұл тамыршалардың өзара шатысуын, жергілікті қызуды және көмірқышқыл газының жиналуын болдырмауға бағытталды. Өсіру соңында өскін ұзындығы 10-15 мм, тамыршалар ұзындығы 12-18 мм деңгейіне жетті, бұл дәннің технологиялық модификацияланғанын сипаттайды.

Өсіруден кейін жасыл уыт үш фазалы кептіруге жіберілді. Кептірудің мақсаты ферменттік өзгерістерді тоқтату ғана емес, дайын өнімнің сақтау тұрақтылығын қамтамасыз ету болды. Соңғы ылғалдылық 3,5-5,0% деңгейіне жеткен кезде процесс аяқталып, уыт салқындатылды және өскін бөлгіш машинада тамырша қалдықтарынан тазартылды. № 3 схема бойынша суландырудың жалпы ұзақтығы 31,5 сағат, өсіру ұзақтығы 96 сағат болды.

4-кестедегі нәтижелер дайын уыт сапасын кешенді бағалауға мүмкіндік береді. Салыстыруда жеке көрсеткіштің ең жоғары мәні емес, олардың нормативтік талаптарға сәйкестігі және пивоварение процесінде бір-бірімен үйлесуі ескерілді.

Органолептикалық бағалау екі сорттан алынған уыттың негізгі талаптарға сәйкес екенін көрсетті: түсі ашық-сары, иісі уытқа тән, бөгде иіс пен дәм байқалмады. Ылғалдылық «Стекловидная-24» үлгісінде 5,2%, «Казахстанская 10» үлгісінде 5,4% болды, яғни сақтау кезінде тұрақтылықты қамтамасыз ететін нормативтік аралықта сақталды.

Экстрактивтілік бойынша екі үлгі де жақсы нәтиже көрсетті: «Стекловидная-24» уытында 78%, «Казахстанская 10» уытында 79%. Бұл көрсеткіштер нормативтік ең төменгі деңгейден жоғары, сондықтан екі сорт та суслоға жеткілікті мөлшерде құрғақ заттардың өтуін қамтамасыз ете алады. Алайда 1 пайыздық тармақ айырмашылығы сортты таңдау үшін жалғыз шешуші белгі бола алмайды.

1000 дән массасы «Казахстанская 10» үлгісінде 32,9 г, «Стекловидная-24» үлгісінде 31,4 г болды, бұл екі сорттың да жеткілікті толық қалыптасқанын көрсетеді. Ақуыз мөлшері бойынша айырмашылық маңыздырақ: «Стекловидная-24» уытында 12,74%, ал «Казахстанская 10» уытында 13,89% анықталды. «Казахстанская 10» экстрактивтілігі сәл жоғары болғанымен, ақуыздың жоғарылығы сыраның мөлдірлігі мен коллоидтық тұрақтылығына теріс әсер етуі мүмкін. ГОСТ 29294-2021 стандартындағы 9-13% ақуыз және 3-5% клетчатка нормативтері негізінен арпа уытына тән базалық көрсеткіштер болып табылады. Бидай дәнінің морфологиялық ерекшелігіне байланысты (қауыздың болмауы) дайын бидай уытындағы клетчатка мөлшері табиғи түрде төмен болады (2,3-2,5%), бұл сыра қайнатуда экстрактивтіліктің жоғарылауына оң әсерін тигізеді және бидай уытының сапасын төмендетпейді.

Жиынтық бағалау осы себепті «Стекловидная-24» сортын неғұрлым қолайлы шикізат ретінде көрсетуге мүмкіндік береді. Оның артықшылығы бір ғана көрсеткішке емес, ақуыз мөлшерінің нормативтік аралыққа жақындығы, өңдеуден кейінгі төмен шынылық, органолептикалық тұрақтылық және жеткілікті экстрактивтілік сияқты белгілердің үйлесуіне негізделді. «Казахстанская 10» сорты да жарамды, бірақ ақуыз мөлшерін төмендетуге немесе технологиялық режимді қосымша бейімдеуге қажеттілік болуы мүмкін. Ал «Казахстанская 10» сортының ақуыз мөлшері ұсынылған нормативтің жоғарғы шегінен сәл жоғары болғанымен, оның экстрактивтілігі 79% құрады, бұл сыра өндірісі үшін қолайлы көрсеткіш болып табылады. Жоғары ақуыз мөлшері сүзу жылдамдығына және суслоның мөлдірлігіне әсер етуі мүмкін. Сондықтан бұл сортты өндірісте пайдаланған кезде ақуыздық модификацияны күшейтетін ұзартылған өсіру режимін немесе арпалық уытпен араластырып қолдану ұсынылады.

Қорытынды

1. Зерттеу нәтижелері суландыру мен өсіру режимдерінің бидай дәнінің ылғалдану динамикасына және дайын уыт сапасына тікелей әсер ететінін көрсетті. №1 схема 20-27%

деңгейіндегі соңғы ылғалдылықпен шектеліп, уыт өндіру үшін жеткіліксіз болды; №2 схема 50,4-54,4% деңгейіне жетіп, артық ылғалдану қаупін көрсетті; №3 схема 44,4-52,2% аралығындағы неғұрлым теңгерімді нәтижені қамтамасыз етті.
2. № 3 технологиялық схема қысқа суландыру кезеңдері мен ауа үзілістерін үйлестіру арқылы дәннің біркелкі ылғалдануына жағдай жасады. Бұл схема бойынша суландырудың жалпы ұзақтығы 31,5 сағат, негізгі өсіру ұзақтығы 96 сағат, ал суландыру мен өсіру кезеңдерінің жиынтық ұзақтығы 127,5 сағат болды. Дәстүрлі 120 сағаттық өсіру кезеңімен салыстырғанда бұл режим технологиялық циклді ықшамдауға мүмкіндік береді.
3. Дайын уыттардың негізгі сапа көрсеткіштері сыралық уытқа қойылатын талаптарға сәйкес келді: ылғалдылық 5,2-5,4%, экстрактивтілік 78-79%, 1000 дән массасы 31,4-32,9 г аралығында болды. Органолептикалық белгілері бойынша екі үлгі де бөгде иіссіз және ашық-сары түсті уыт ретінде сипатталды.
4. Сорттарды кешенді салыстыру «Стекловидная-24» үлгісінің технологиялық тұрғыдан қолайлырақ екенін көрсетті. «Казахстанская 10» уытында экстрактивтілік 79% болып сәл жоғары болғанымен, ақуыз мөлшері 13,89% деңгейінде қалды. «Стекловидная-24» уытында ақуыз мөлшері 12,74% болып, нормативтік талаптарға жақынырақ нәтиже берді; сондықтан бұл сорт сыралық бидай уытын өндіруге тиімді шикізат ретінде ұсынылады.

Әдебиеттер тізімі

1. Shewry P.R. Wheat grain proteins: past, present, and future / P.R. Shewry // Cereal Chemistry. – 2023. – Vol. 100, № 4. – P. 821-838. https://doi.org/10.1002/cche.10585Место для ввода текста..
2. Shevkani K. A comparative review of protein and starch characteristics and end-use quality of soft and hard wheat / K. Shevkani, M. Katyal, N. Singh // Journal of Cereal Science. – 2024. – Vol. 116. – Art. 103876. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2024.103876.
3. GOST 29294-2021. Solod pivovarennyi. Tekhnicheskie usloviya. – M.: Standartinform, 2021. – 31 s. (in Russian).
4. The influence of texture type and grain milling degree on the attenuation limit, protein content, and degradation in wheat wort / V. Krstanović et al // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13, № 19. – Art. 10626. https://doi.org/10.3390/app131910626.
5. Ramanan M. Effects of genotype and environment on productivity and quality in Californian malting barley / M. Ramanan, S.J. Finnie, M. Gastl // Agronomy Journal. – 2023. – Vol. 115, № 4. – P. 1802-1818. https://doi.org/10.1002/agj2.21358.
6. Otero E.A. On-field assessment of the environmental modulation of malting quality in barley crops / E.A. Otero, C. Miralles, R. Savin // Field Crops Research. – 2021. – Vol. 271. – Art. 108252. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108252.
7. Belcar J. The influence of selected winter wheat cultivars grown in Poland and the growing season on the quality of wheat beers produced from them / J. Belcar, J. Gorzelany // Foods. – 2025. – Vol. 14, № 3. – Art. 601. https://doi.org/10.3390/foods14030601.
8. Fang Y. Genetic Analysis and Molecular Breeding Applications of Malting Quality QTLs in Barley / Y. Fang, X. Zhang, D. Xue // Frontiers in Genetics. – 2019. – Vol. 10. – Art. 352. https://doi.org/10.3389/fgene.2019.00352.
9. Rani H. Quality attributes for barley malt: The backbone of beer / H. Rani, R.D. Bhardwaj // Journal of Food Science. – 2021. – Vol. 86(8). – P. 3322-3340. https://doi.org/10.1111/1750-3841.15858.
10. Alyab'ev B.A. Obosnovanie i razrabotka tekhnologii pshenichnogo soloda i piva iz pshenitsy primorskoi selektsii : dis. ... kand. tekhn. nauk : 05.18.07 / B.A. Alyab'ev ; Dal'nevost. feder. un-t. – Vladivostok, 2022. – 192 s. https://dalrybvtuz.ru/nfiles/articles/33960.pdf. (in Russian).

Д.Н. Бакытжан*, Э.Б. Аскарбеков[2], А.К. Кекибаева[1]
[1]Алматинский технологический университет,
050012, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Толе би, 100
[2]Казахский университет технологии и бизнеса им. К. Кулажанова,
010000, Республика Казахстан, г. Астана, ул. Кайыма Мухамедханова, 37А
*e-mail: Erik_ab82@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ПШЕНИЧНОГО СОЛОДА ДЛЯ ПИВОВАРЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Работа посвящена технологической оценке возможности получения пивоваренного пшеничного солода из казахстанских сортов пшеницы, отличающихся повышенным содержанием белка. Актуальность исследования связана с тем, что местное зерновое сырье не всегда соответствует требованиям, предъявляемым к пшенице для солодоращения, однако корректно подобранный режим замачивания и проращивания может повысить его технологическую пригодность. В качестве объектов исследования использованы сорта «Казахстанская 10» и «Стекловидная-24». В лабораторных условиях были сопоставлены традиционная технология и три экспериментальные схемы, различающиеся продолжительностью водных стадий, воздушных пауз и основного проращивания. Оценивались динамика увлажнения зерна, продолжительность процесса, органолептические признаки и физико-химические показатели готового солода. Установлено, что схема №1 не обеспечивала достаточного накопления влаги, тогда как схема №2 приводила к избыточному увлажнению отдельных образцов. Наиболее сбалансированной оказалась схема №3, при которой конечная влажность зерна составила 44,4-52,2%, а продолжительность проращивания – 96 часов. Экстрактивность полученного солода находилась на уровне 78-79%, что выше минимального нормативного значения для пивоваренного солода. Оба сорта могут рассматриваться как пригодные для получения солода, однако «Стекловидная-24» показала более предпочтительное сочетание признаков благодаря более низкому содержанию белка, допустимому уровню стекловидности после обработки и устойчивым технологическим характеристикам. Научная новизна работы состоит в сравнительной оценке режимов замачивания и проращивания применительно к местным высокобелковым сортам пшеницы, а практическая значимость – в обосновании схемы, пригодной для дальнейшей адаптации в производстве пшеничного солода.

Ключевые слова: *пшеничный солод, пивоваренное производство, казахстанские сорта пшеницы, высокобелковое сырье, схема замачивания, воздушная пауза, режим проращивания, экстрактивность, технологическая пригодность.*

D.N. Bakytzhan[1]*, E.B. Askarbekov[2], A.K. Kekibayeva[1]
[1]Almaty Technological University,
100 Tole Bi Street, Almaty 050012, Republic of Kazakhstan
[2]K. Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business,
37A Kaiym Mukhamedkhanov Street, Astana 010000, Republic of Kazakhstan
*e-mail: Erik_ab82@mail.ru

STUDY OF WHEAT MALT QUALITY FOR BREWING PRODUCTION

This study provides a technological assessment of the suitability of Kazakh wheat varieties for brewing malt production, with particular attention to grain characterized by an increased protein content. The relevance of the work is determined by the fact that locally grown wheat does not always meet the protein requirements usually applied to raw material for malting; nevertheless, an appropriately selected steeping and germination regime may improve its processing suitability. The wheat varieties Kazakhstanskaya 10 and Steklovidnaya 24 were used as the research objects. A conventional malting method and three experimental schemes were compared under laboratory conditions. The schemes differed in the duration of steeping stages, air rests, and the main germination period. The assessment included the moisture accumulation pattern during steeping, the duration of germination, and the organoleptic and physicochemical characteristics of the finished malt. The results showed that Scheme No. 1 did not provide sufficient moisture accumulation, whereas Scheme № 2 led to excessive hydration in some samples. Scheme No. 3 was the most balanced option: the final grain moisture content reached 44.4-52.2%, and germination was completed within 96 hours. The extract content of the obtained malt was 78-79%, exceeding the minimum regulatory requirement for brewing malt. Both varieties were suitable for malt production; however, Steklovidnaya 24 demonstrated a more favorable combination of quality indicators due to its lower protein content, acceptable post-malting vitreousness, and more stable technological performance. The scientific novelty of the study lies in the comparative evaluation of steeping and germination regimes for local high-protein wheat varieties. Its practical significance is the substantiation of a regime that can be further adapted for wheat malt production under industrial conditions.

Key words: *wheat malt, brewing production, Kazakh wheat varieties, high-protein raw material, steeping scheme, air rest, germination regime, extract content, technological suitability.*

Авторлар туралы мәліметтер

Дидар Нуртуғанұлы Бакытжан* – Алматы технологиялық университетінің «Нан өнімдері және қайта өңдеу өндірістерінің технологиясы» кафедрасының докторанты, Алматы қ., Қазақстан; e-mail: didar_99_kz@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-2286-1680.

Эрик Бирликович Аскарбеков – PhD, қауымдастырылған профессор, Қ. Құлажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті, Астана қ., Қазақстан; e-mail: Erik_ab82@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9544-0820.

Анара Канбековна Кекибаева – PhD, Алматы технологиялық университетінің "Нан өнімдері және қайта өңдеу өндірістерінің технологиясы " кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Қазақстан Республикасы, e-mail: kekibaevaa@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3639-1341.

Сведения об авторах

Дидар Нуртуғанұлы Бакытжан* – докторант кафедры «Технология хлебопродуктов и перерабатывающих производств», Алматинский Технологический Университет, г. Алматы, Казахстан; e-mail: didar_99_kz@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-2286-1680.

Эрик Бирликович Аскарбеков – PhD, ассоциированный профессор, Казахский университет технологии и бизнеса им. К. Кулажанова, Астана, Казахстан; e-mail Erik_ab82@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9544-0820.

Анара Канбековна Кекибаева – PhD, ассоциированный профессор кафедры «Технология хлебопродуктов и перерабатывающих производств», Алматинский технологический университет, Республика Казахстан; e-mail: kekibaevaa@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3639-1341.

Information about the authors

Didar Bakytzhan* – Doctoral student, Almaty Technological University, Department of Bakery Products and Processing Technologies, Almaty, Kazakhstan; e-mail: didar_99_kz@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-2286-1680.

Eric Askarbekov – PhD, Associate Professor, K. Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan; e-mail Erik_ab82@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9544-0820.

Anara Kekibaeva – PhD, Associate Professor of the Department of «Technology of Grain Products and Processing Industries», Almaty Technological University, Republic of Kazakhstan; e-mail: kekibaevaa@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3639-1341.

Редакцияға енуі 17.06.2026
Өңдеуден кейін түсуі 02.07.2026
Жариялауға қабылданды 18.08.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-45

МРНТИ: 65.31.91

CC BY 4.0
Check for updates

А.К. Суйчинов, Ж.С. Есимбеков, Г.А. Капашева*, З.Т. Смагулова
[1]Қазақ қайта өңдеу және тағам өнеркәсіптері ғылыми зерттеу институты (Семей филиалы),
071410, Қазақстан Республикасы, Семей қ, Байтұрсынова 29 к-сі
*e-mail: gena.89.89@mail.ru

БИДАЙ КЕБЕГІНЕН ТАҒАМДЫҚ ҚОСПА АЛУ ТЕХНОЛОГИЯСЫН ӘЗІРЛЕУ ЖӘНЕ ОНЫҢ ФИЗИКА-ХИМИЯЛЫҚ ЖӘНЕ ФУНКЦИОНАЛДЫ-ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН БАҒАЛАУ

Аңдатпа: *Бұл мақалада екінші реттік шикізат болып табылатын бидай кебегін терең өңдеу арқылы жақсартылған физика-химиялық және функционалды-технологиялық қасиеттері бар тағамдық қоспа алу технологиясы қарастырылған. Бидай кебегін өңдеу процесі 0,05 М лимон қышқылы ерітіндісінде (pH 4,8 ± 0,1) 45°C температурада 30 минут бойы ультрадыбыспен өңдеу (35-40 кГц) арқылы жүзеге асырылды. Өңделген массаны фракцияларға бөлгеннен кейін, оның қатты бөлігі бейтарап pH мәніне дейін жуылып, лиофильді кептіруден өткізілді және ұнтақталды.*

Осы әдіспен алынған тағамдық қоспаның химиялық құрамы: ақуыз мөлшері 15 г, май 3,5 г, көмірсу 12 г, ал талшық үлесі 40% болды. Сонымен қатар, алынған қоспа жоғары ылғал ұстау қабілетімен 185,5% және май ұстау қабілетімен 343,2% ерекшеленеді. Дегенмен бұл оның айқын технологиялық қасиеттерін және тағамдық жүйелер құрылымын тұрақтандыру қабілетін дәлелдейді.

©А.К. Суйчинов, Ж.С.Есимбеков, Г.А. Капашева, З.Т. Смагулова, 2026

Ұсынылып отырған әдіс бидай кебегінен жақсартылған технологиялық сипаттамалары бар тағамдық қоспа алуға мүмкіндік беріп отыр. Әзірленген тағамдық қоспа тағам өнімдері технологиясында, сонымен қатар сүт өнімдерінде пайдалануға болады. Бұл өнімнің тағамдық құндылығын арттырады және өнімнің сапасын жақсартып, ассортиментін кеңейтеді.

Түйін сөздер: *бидай кебегі, антинутриенттер, ультрадыбыстық өңдеу, лиофильді кептіру, тағамдық қоспа.*

Кіріспе

Функционалды қоректік заттармен байытылған тамақ технологиялары қазіргі уақытта ерекше өзекті болып табылады. Бұл қазіргі өмірдің жалпы жоғары талғамына сай, адам ағзасына оң әсер ететін, оның биологиялық нормасын қалпына келтіретін және әл-ауқатының жалпы жақсаруына қабілетті өнімдерге деген қажеттіліктің жоғарылауымен байланысты [1].

Көптеген елдерде қазірдің өзінде өте үлкен көлемде өнімнің ассортименті және тағамдық талшықтары жоғары, соның ішінде бидай кебегі шығарылады. Кебек көбінесе бидай дәндерін ұсақтау кезіндегі қалдығы. Осы қалдықты көбінесе жем-шөп ретінде ғана пайдаланылады. Кебектің мөлшері әр түрлі болады, ол астықтың жалпы массасынан 4-25% немесе одан да көп бөлігін құрайды. Қатты бидай жұмсақ бидайға қарағанда кебектің едәуір аз пайызын береді. Кебек ұн және жарма қалдықтарынан алынатын жемге жатады. Дәннің түріне қарай кебектер бидай, қара бидай, сұлы, күріш, қарақұмық, тары түріне қарай ажыратылады. Осылардың арасында ең құндысы бидай кебегі болып табылады. Дәнді өңдеу әдісіне байланысты кебек үлкен (өрескел) және ұсақ (жұқа) болады. Кебек бидаймен салыстырғанда айтарлықтай фосфорға 80%, В дәрумендер тобына, әсіресе пантотен қышқылдарына айтарлықтай бай. Бидай кебегі көбінесе тағамдық талшықтардан тұрады. Олар 28-30% гемицеллюлозадан, шамамен 10% целлюлозадан, 3% лигнин және 2% пектин, құнды тағамдық заттар: өсімдік ақуызы, крахмал, В, Е тобы дәрумендері т.б. тұрады [2, 3].

Бидай кебегіндегі талшық көмірсудің сіңуін баяулатады және қандағы глюкозаның өсу үрдісін тежейді. Осыған байланысты бидай кебегін үнемі жеу қант диабетімен ауыратын адамдарға пайдалы, өйткені бұл инсулин мөлшерін едәуір азайтуға мүмкіндік береді. Бидай кебегі ас қорыту жүйесінің үйлесімді жұмысы үшін қажет және онкологиялық аурулардың алдын алуда тиімді. Бидай кебегіне ерекше бай талшық кеуекті құрылымымен көп мөлшерде суды ұстай алады [4, 5]. Бидай кебегінің осындай құндылығына қарамастан тағам өнімдерін өндіруде пайдаланылмайды.

Осыған байланысты бидай кебегін терең өңдеу арқылы тағамдық қоспалар алу және олардың қасиеттерін зерттеу өзекті ғылыми-практикалық міндет болып табылады. Осы бағытта ең перспективті болып астық өңдеу өндірісінде екінші реттік шикізатты пайдалану болып табылады. Жыл сайын дәнді дақылдардың өңдеу барысындағы көлемі көптеген жанама өнімдердің пайда болуымен бірге жүреді. Яғни бұл құнды биоресурс өзінің бай қоректік құрамына қарамастан, жануарларға арналған жем-шөп базасы ретінде ұтымсыз пайдаланады [6].

Ал бидай кебегі бұл диеталық талшықтардың, ақуыздардың, минералдардың және фенолдық қосылыстардың жоғары құрамымен сипатталатын құнды жанама өнімі болып табылады. Сонымен қатар, оларды тағамдық технологияларда, соның ішінде ашытылған сүт өнімдерін өндіруде кеңінен қолданылуы минералды элементтердің биожетімділігін төмендетуге және ақуыздың сіңімділігін нашарлатуға қабілетті. Фит қышқылы, протеаза ингибиторлары және полифенол қосылыстары сияқты қоректік заттарға қарсы заттардың болуымен шектеледі [7]. Әдебиет мәліметтеріне сәйкес, лимон қышқылы мен ультрадыбыстық өңдеуді кешенді қолдану фитин қышқылының ыдырауын жеделдетіп, фермент тежегіштерінің белсенділігін төмендетеді. [8].

Осыған байланысты, бидай кебегін терең және аралас әдістермен өңдеу арқылы функционалдық қасиеттері жоғары тағамдық қоспалар алу өзекті ғылыми-практикалық міндет болып табылады. Желілік құрылымды кебек сүт негізімен жақсы үйлесім тауып, тұрақты тағамдық жүйелер түзуге мүмкіндік береді.

Жұмыстың мақсаты бидай кебегінен тағамдық қоспаны алу технологиясын әзірлеу және осы өнімнің физика-химиялық, функционалды-технологиялық қасиеттерін бағалау болып табылады.

Зерттеу нысандары мен әдістері:

Зерттеу нысаны ретінде өсімдік шикізаты әрі екінші айнымалы өнімі болып табылатын бидай кебегі алынды. Қосымша материал ретінде тазартылған су және лимон қышқылы пайдаланылды.

Тағамдық қоспаны алу әдісі

Тағамдық қоспаны алу барысында, бастапқы деңгейде бидай кебегінен антинутриттік қосылыстарды кетіру үшін ультрадыбыстың көмегімен өңдеудің аралас әдісі қолданылды.

Ең алдымен 0,05 М лимон қышқылының ертінідісі дайындалды. Яғни, 1 литр тазартылған суда 9,61 г сусыз лимон қышқылы (немесе 10,51 г моногидрат) ерітілді. Келесі деңгейде ерітіндінің pH мәні 1М NaOH көмегімен 4,8 ± 0,1-ге дейін жеткізілді.

0,5-1,0 мм фракциясы бар 500 г бидай кебегі алынды, оның әрқайсысы 100 г-нан бес тең бөлікке бөлінді. Әр бөлікке дайындалған ерітіндінің бір литрі қосылды. Содан кейін қоспа шайқағышта 5 минут бойы араластырылды.

Одан кейін суспензияны ваннада 45 ± 2°C температурада және 35-40 кГц жиілікте, 30 минут бойы ультрадыбыстық зерттеуден өтті. Ультрадыбыстық өңдеуден кейін 10-15 минутқа тұндырылды. Кейін сұйық фаза бөлініп алынып қағаз сүзгіден өткізілді.

Қатты қалдық ретінде өңделген кебек болды. Оны бейтарап pH мәні 6,4-6,8 жеткенше тазартылған суда жуылып, ары қарай – 40°C темпретурада 6-8 сағат бойы мұздатқышта мұздатылды. Мұздатылған өнімді вакуумда 35°C температурада кептірілді. Кептірілген кебекті ұнтақтап, одан кейін оны әрі қарай талдау үшін контейнерлерге салынды. Осы бидай кебегінен тағамдық қоспаны алу кезеңдерінің сұлбасы 1 суретте көрсетілген.



Сурет 1 – Бидай кебегінен тағамдық қоспаны алудың технологиялық кезеңдерінің сұлбасы

Судың белсенділігін анықтау

Су белсенділігі LabTouch-aw құралы (Италия) арқылы анықталынып өлшенді [9].

pH анықтау. Ортаның белсенді қышқылдығы (pH) электродты ерітіндіге батыру және құрал шкаласына pH мәнін жазу арқылы Seven2Go™ pH өлшегішін пайдаланып потенциометриялық түрде анықталды. Ерітінді (сулы сығынды) ұнтақталған өнім мен судан дайындалды (1:10 қатынасында). pH 20°C температурада 30 минут бойы инфузиядан кейін өлшенді [10].

Бидай кебегінің үлгілерінің органолептикалық қасиеттері (түсі, иісі, дәмі және қытырлақтығы) МЕСТ 27558-2022 бойынша талаптарына сәйкес жүргізілді [11].

Функционалдық және технологиялық қасиеттерді анықтау

Бидай кебегінен жасалған тағамдық қоспаның мұздатылған кептірілген ұнтағының функционалдық және технологиялық қасиеттері су ұстау қабілеті (СҰҚ), май ұстау қабілеті (МҰҚ), май эмульсиялау қабілеті (ЭҚ) және эмульсия тұрақтылығы (ЭТ) Амин Алван және т.б. сипаттаған әдісті қолдана отырып анықталды [12].

Бидай кебегіндегі күл мөлшері МЕСТ 27494-2016 стандарты бойынша үдеткіштерді қолданбай (негізгі әдіс) күлдетілген дәнмен анықталды [13].

Өнімнің түс сипаттамаларын анықтау

Өнімнің түс сипаттамаларын CR-400 хромаметрін (Konica Minolta, Жапония) пайдалану арқылы анықталды [14].

Статистикалық талдау

Өлшеу нәтижелері Microsoft Excel 2016 бағдарламасын пайдаланып өңделді. Талдау нәтижелері $p \leq 0,05$ кезінде статистикалық тұрғыдан маңызды болды. Деректер орташа ± стандартты ауытқу ретінде көрсетілген.

Зерттеу нәтижелерін талқылау

Бидай кебегінің өңдеуге дейінгі және өңдеуден кейінгі физика-химиялық және органолептикалық қасиеттерін зерттеу

Екінші айнымалы бидай кебегінен тәжірибе жүзінде алынған тағамдық қоспаның енді физика-химиялық және органолептикалық қасиеттері зерттелінді. Бидай кебегін өңдеуге дейінгі және өңдеуден кейінгі сыртқы түрі 2 суретте көрсетілген.



Өңдеуге дейінгі бидай кебегі



Өңдеуден кейінгі бидай кебегі

Сурет 2 – Бидай кебегінің өңдеуге дейінгі және өңдеуден кейінгі сыртқы көрінісі

Бидай кебегінен алынған тағамдық қоспаның физика-химиялық көрсеткіштері (1 кестеде) көрсетілген. Зерттеу нәтижесінде бидай кебегінің су белсенділік мөлшері 0,4558-ден 0,0943-ке дейін төмендегінін көрдік. Бұл бидай кебегін өңдеуден кейінгі ылғалдылықтың азайғанын растайды. Ал pH мәні өнімнің өңдеуден кейін 1,33 дейін артып, бейтараптандырылған ортаны көрсетті. Құрғақ кебектің өнімділігі 500г-нан 150,5г-ға дейін төмендеді, себебі сұйық фазаның бір бөлігі бөлінді. Бидай кебегінің органолептикалық көрсепткіштері, яғни бидайдың хош иісі және ұсақталған құмды құрылымы сақталған. Осы көрсеткіштер өнімнің сапасының сақталуын растайды. Ал өнімнің күл мөлшері 4,56 %-дан 3,47 %-ға дейін төмендеді. Бұл бидай кебегін өңдеу кезінде минералдардың жойылуын көрсетті. Осы зерттеу барысында алынған нәтижелер екінші айнымалы бидай кебегін өңдеу әдісі арқылы алынған тағамдық қоспаның тиімділігін көрсетеді.

Кесте 1 – Бидай кебегінің өңдеуге дейінгі және кейінгі салыстырмалы сипаттамалары.

Көрсеткіштер	Дейінгі	Кейінгі
Су белсенділігі a_w	0,4558±0,012	0,0943±0,002
Суспензияның pH мәні 1:10 құрайды	5,07±0,13	6,4±0,17
Құрғақ кебек өнімділігі	500 г (100%)	150,5 г (30,1 %)
Органолептикасы	Бидай иісті, ұнтақталған ұн, құм түсті	Иісі бидай тәріздес, онша айқын емес, құрылымы біркелкі, ұсақталған, түсі ақшыл
Күлі	4,56±0,12	3,47±0,09

Бидай кебегінен алынған тағамдық қоспаның химиялық құрамын талдау нәтижелері 2-кестеде көрсетілген.

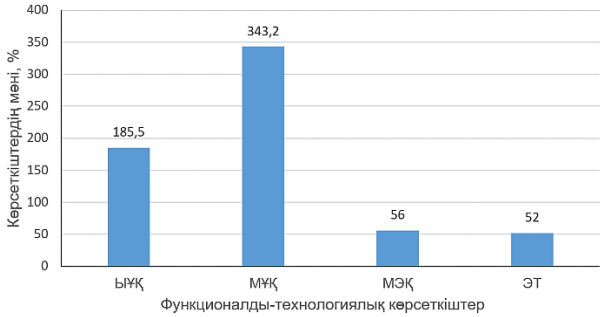
Бидай кебегінен алынған тағамдық қоспаның химиялық құрамын зерттеу барысында оның құрамындағы ақуыз мөлшері 15 г болса, ал майдың массалық үлесі 3,5 г көрсетті. Сонымен қатар тағамдық қоспаның құрамындағы көмірсудің мөлшері 12 г болса, талшықтың мәні 40% болды. Осы алынған зерттеу нәтижелері бойынша ақуыз бен талшық жоғары болуы, осы өнімді қоректік заттар көзі ретінде етеді. Себебі бұл көрсеткіштер әсіресе сүт өнімдерін өндіруде маңызды болып келеді.

Кесте 2 – Бидай кебегінен алынған тағамдық қоспаның химиялық құрамы

Көрсеткіштердің атауы, өлшем бірліктері	Мәндері
Ақуыздың массалық үлесі, г	15±0,40
Майдың массалық үлесі, г	3,5±0,09
Көмірсулардың массалық үлесі, г	12±0,32
Талшық, %	40±1,12
Энергетикалық құндылығы, ккал	140

Бидай кебегінен алынған тағамдық қоспаның функционалды және технологиялық қасиеттерін зерттеу

Осы аталған көрсеткіштер бойынша зерттеу нәтижесі мынадай болды. Яғни, тағамдық қоспаның ылғалды ұстау қабілетінің мәні (ЫҰҚ) 185,5±4,2% болса, ал майды ұстау қабілетінің мәні (МҰҚ) 343,2±6,5% деңгейін көрсетті. Бұл мәндер бойынша өнімнің жақсы су байланыстығы мен майды жақсы байланыстыратынын көре аламыз. Өнімнің майды эмульсиялау қабілеті (МЭҚ) 56±1,2% болса, эмульсия тұрақтылығының мәні (ЭТ) 52±1,1% көрсеткішіне жетті. Осы аталған зерттеу нәтижесі бойынша бидай кебегінен алынған тағамдық қоспаның функционалды және технологиялық қасиеттерін жоғары бағалауға болады. Осы көрсеткіштер арқылы тағамдық қоспаны басқа өнімдермен араластырып қосуға болатын қабілеттін көруге болады (3 сурет).



Ескерту: ЫҰҚ – ылғал ұстау қабілеті; МҰҚ – май ұстау қабілеті; МЭҚ – майды эмульсиялау қабілеті; ЭТ – эмульсия тұрақтылығы

Сурет 3 – Бидай кебегінен алынған тағамдық қоспаның функционалдық және технологиялық қасиеттерінің көрсеткіштері

Бидай кебегінің өңдеуге дейінгі және кейінгі түсінің өзгеруін зерттеу

Тәжірибелік зерттеудің соңғы деңгейінде бидай кебегінің өңдеуге дейінгі және кейінгі түсінің өзгересінің нәтижесін 3 кестеден көруге болады. Бидай кебегінен алынған тағамдық қоспаның түсі ашықтанғанын байқауға болады. Бидай кебегі өңдеуден кейін қызыл реңінің төмендегенін осы a* 7,05-тен 4,72-ге дейін азайғанынан пайымдауға болады. Ал b* мәні 0,48 -ге дейін төмендеді. Бидай кебегінні өңдеуден кейінгі түсінің өзгерісі оның физика-химиялық және органолептикалық көрсеткіштеріне оңтайлы әсер ететінін растайды.

Кесте 3 – Бидай кебегінің өңдеуге дейін және кейінгі түс сипаттамаларының өзгеруі

Атауы	Түсі (L*)		Түсі (a*)		Түсі (b*)	
	дейін	кейін	дейін	кейін	дейін	кейін
Бидай кебегі	67,93	70,30	7,05	4,72	20,91	20,43

Ғылыми нәтижелерді талқылау

Әзірленген тағамдық қоспаның функционалды-технологиялық қасиеттерін халықаралық аналогтармен салыстырмалы талдау оның жоғары технологиялық мүмкіндіктерін көрсетті. Зерттеу барысында алған қоспаның май ұстау қабілеті (МҰҚ) 343,2% көрсеткішті құрады. Алынған нәтиже Лиу және оның әріптестері [15] бидай кебегінің талшықты кешендерін ферменттік өңдеу бойынша жүргізген зерттеу нәтижелерімен (3,95 г/г немесе 395%) сәйкес келеді. Май ұстау қабілетінің жоғары болуы өңдеу барысында кебек құрылымындағы су тартпайтын орталықтардың беткі қабатқа көбірек шығуымен байланысты.

Ал ылғал ұстау қабілетіне (ЫҰҚ) келетін болсақ, әзірленген қоспамыздың көрсеткіші 185,5% болды. Бұл мән Ақташ-Ақйылдыз және әріптестері [16] анықтаған өңделмеген бидай кебегінің ылғалды ұстау қабілетінен (4,5 г/г немесе 450%) төмен. Мұндай айырмашылық біздің зерттеуімізде қолданылған лимон қышқылы мен ультрадыбыстың бірлескен әсерінен кебек құрылымындағы гидрофильді құрылым ішінара қайта ұйымдасуымен, сондай-ақ лиофильді кептіру процесінің ерекшеліктерімен түсіндіріледі. Сонымен қатар, Лиу және Ақташ-Ақйылдыз зерттеулерінде көрсетілгендей, кебекті ферменттік, қышқылдық немесе ультрадыбыстық әдістермен өңдеу оның тығыз талшықты құрылымын өзгертіп, кеуекті әрі борпылдақ микроқұрылымның қалыптасуына ықпал етеді [15, 16].

Осылайша, алынған тағамдық қоспаның химиялық және функционалдық көрсеткіштерін халықаралық дереккөздермен салыстыру біз ұсынған қышқылдық-ультрадыбыстық әдістің кебек құрамындағы бағалы тағамдық талшықтарды (40,0%) жоғары мөлшерде сақтай отырып, оның технологиялық қасиеттерін мақсатты түрде өзгертуге мүмкіндік беретінін дәлелдейді.

Қорытынды

Зерттеу жұмысының нәтижесінде бидай кебегін қышқылдық-ультрадыбыстық өңдеу арқылы функционалдық-технологиялық қасиеттері жоғары тағамдық қоспа әзірленді. Сонымен қатар өнімді алу кезеңдері және дайын өнімді алып, оның физика-химиялық және функционалды-технологиялық қасиеттерін зерттеу барысының нәтижелері көрсетілді. Тәжірибелік зерттеу өнімді лимон қышқылы мен ультрадыбыста өңдеу өнімнің физика-химиялық қасиетіне айтарлықтай жақсартқаны байқалды. Оны өңдеуден кейінгі өнімнің күл мөлшері айтарлықтай 0,36-ға дейін төмендегенінен байқауға болады. Тағамдық қоспада талшықтың мәні 40%, суды сақтау қабілеті 185,5 %, майды сақтау қабілеті 343,2% болды. Осы көрсеткіштер арқылы өнімнің функционалды және технологиялық қасиеттерін жоғары бағалауға болады. Жалпы бидай кебегінен алынған тағамдық қоспаның тәжірибелік зерттеу нәтижесі оң көрсеткіштерді көрсетті және перспективалы болып келеді. Ұсынылған технология бойынша бидай кебегін тиімді пайдалануға және оның тағамдық құндылығын арттыруға мүмкіндік береді.

Список литературы

1. Крутков Е.А. Разработка и исследование технологии творожных продуктов с отрубями пшеницы: специальность 05.18.04 «Технология мясных, молочных, рыбных продуктов и холодильных производств»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Е. А. Крутков. – Кемерово, 2002. – 156 с.
2. Петрухин И.В. Корма и кормовые добавки: справочник / И.В. Петрухин. – Москва: Росагропромиздат, 1989. – 526 с.
3. Хохрин С. Н. Корма и кормление животных / С.Н. Хохрин. – Санкт-Петербург: Лань, 2002. – 512 с.
4. El-Sayed M.M. Functional food ingredients derived from plant materials / M.M. El-Sayed // Journal of Food Science and Technology. – 2021.
5. Пищевая химия / А.П. Нечаев и др. – Санкт-Петербург : ГИОРД, 2004. – 640 с.
6. Пищевые волокна / М.С. Дудкин и др. – Киев: Урожай, 1988. – 152 с.
7. Биотехнологическое применение пшеничных отрубей: обзор / Г.Ф. Курбанов и др. // Пищевые системы. – 2025. – Т. 8, № 2. – С. 204-212.
8. Максимюк В.А. Анализ сырья и разработка технологии творожного продукта, обогащенного пшеничными отрубями / В.А. Максимюк, Е.И. Решетник // Технология производства и переработки сельскохозяйственной продукции: сборник научных трудов ДальГАУ. – Благовещенск: ДальГАУ, 2013. – Вып. 12. – С. 63.

9. Mazı B.G. Ultrasound-assisted soaking and solution effects on the anti-nutritional quality and physical properties of legume seeds / B.G. Mazı, K. Çağlayan // Food Science & Nutrition. – 2025. – Vol. 13, № 4. – Art. e70152. https://doi.org/10.1002/fsn3.70152.
10. ГОСТ ISO 21807-2015. Микробиология пищевой продукции и кормов. Определение активности воды. – Введ. 2017-07-01. – Москва: Стандартинформ, 2016. – 3 с.
11. СТ РК ИСО 2917-2009. Мясо и мясные продукты. Определение pH. Контрольный метод. – Введ. 2010-07-01. – Астана: Госстандарт Республики Казахстан, 2010. – 16 с.
12. ГОСТ 27558-2022. Мука и отруби. Методы определения цвета, запаха, вкуса и хруста. – Введ. 2023-03-01. – Москва: Стандартинформ, 2022. – 8 с.
13. Альван Амин. Функциональные свойства белковых продуктов из семян кунжута / Альван Амин // Известия вузов. Пищевая технология. – 1999. – № 2-3. – С. 17-18.
14. ГОСТ 27494-2016. Мука и отруби. Методы определения зольности. – Москва: Стандартинформ, 2017. – 8 с.
15. ГОСТ 33479-2015. Продукты переработки фруктов и овощей. Определение цвета колориметрическим методом. – Москва: Стандартинформ, 2016. – 12 с.
16. Modification of insoluble and soluble dietary fibers of wheat bran by snail enzyme / X. Liu et al // Food Science and Human Wellness. – 2021. – Vol. 10, № 3. – P. 352-360. https://doi.org/10.1016/j.fshw.2021.02.027.
17. Aktas-Akyildiz E. Effect of extrusion treatment on enzymatic hydrolysis of wheat bran / E. Aktas-Akyildiz, M.T. Masatcioglu, H. Köksel // Journal of Cereal Science. – 2020. – Vol. 93. – Art. 102941. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2020.102941.

References

1. Krutkov E.A. Razrabotka i issledovanie tekhnologii tvorozhnykh produktov s otrubyami pshenitsy: spetsial'nost' 05.18.04 «Tekhnologiya myasnykh, molochnykh, rybnykh produktov i kholodil'nykh proizvodstv»: dissertatsiya na soiskanie uchenoi stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk / E. A. Krutkov. – Kemerovo, 2002. – 156 s. (in Russian).
2. Petrukhin I.V. Korma i kormovye dobavki : spravochnik / I.V. Petrukhin. – Moskva: Rosagropromizdat, 1989. – 526 s. (in Russian).
3. Khokhrin S. N. Korma i kormlenie zhivotnykh / S.N. Khokhrin. – Sankt-Peterburg: Lan', 2002. – 512 s. (in Russian).
4. El-Sayed M.M. Functional food ingredients derived from plant materials / M.M. El-Sayed // Journal of Food Science and Technology. – 2021. (in English).
5. Pishchevaya khimiya / A.P. Nechaev i dr. – Sankt-Peterburg: GIORD, 2004. – 640 s. (in Russian).
6. Pishchevye volokna / M.S. Dudkin i dr. – Kiev: Urozhai, 1988. – 152 s. (in Russian).
7. Biotekhnologicheskoe primenenie pshenichnykh otrubei: obzor / G.F. Kurbanov i dr. // Pishchevye sistemy. – 2025. – T. 8, № 2. – S. 204-212. (in Russian).
8. Maksimyuk V.A. Analiz syr'ya i razrabotka tekhnologii tvorozhnogo produkta, obogashchennogo pshenichnymi otrubyami / V.A. Maksimyuk, E.I. Reshetnik // Tekhnologiya proizvodstva i pererabotki sel'skokhozyaistvennoi produktsii: sbornik nauchnykh trudov Dal'GAU. – Blagoveshchensk: Dal'GAU, 2013. – Vyp. 12. – S. 63. (in Russian).
9. Mazı B.G. Ultrasound-assisted soaking and solution effects on the anti-nutritional quality and physical properties of legume seeds / B.G. Mazı, K. Çağlayan // Food Science & Nutrition. – 2025. – Vol. 13, № 4. – Art. e70152. https://doi.org/10.1002/fsn3.70152. (in English).
10. GOST ISO 21807-2015. Mikrobiologiya pishchevoi produktsii i kormov. Opredelenie aktivnosti vody. – Vved. 2017-07-01. – Moskva: Standartinform, 2016. – 3 s. (in Russian).
11. ST RK ISO 2917-2009. Myaso i myasnye produkty. Opredelenie rN. Kontrol'nyi metod. – Vved. 2010-07-01. – Astana: Gosstandart Respubliki Kazakhstan, 2010. – 16 s. (in Russian).
12. GOST 27558-2022. Muka i otrubi. Metody opredeleniya tsveta, zapakha, vkusa i khrusta. – Vved. 2023-03-01. – Moskva: Standartinform, 2022. – 8 s. (in Russian).
13. Al'van Amin. Funktsional'nye svoistva belkovykh produktov iz semyan kunzhuta / Al'van Amin // Izvestiya vuzov. Pishchevaya tekhnologiya. – 1999. – № 2-3. – S. 17-18. (in Russian).
14. GOST 27494-2016. Muka i otrubi. Metody opredeleniya zol'nosti. – Moskva: Standartinform, 2017. – 8 s. (in Russian).
15. GOST 33479-2015. Produkty pererabotki fruktov i ovoshchei. Opredelenie tsveta kolorimetricheskim metodom. – Moskva: Standartinform, 2016. – 12 s. (in Russian).

16. Modification of insoluble and soluble dietary fibers of wheat bran by snail enzyme / X. Liu et al // Food Science and Human Wellness. – 2021. – Vol. 10, № 3. – P. 352-360. https://doi.org/10.1016/j.fshw.2021.02.027. (in English).
17. Aktas-Akyildiz E. Effect of extrusion treatment on enzymatic hydrolysis of wheat bran / E. Aktas-Akyildiz, M.T. Masatcioglu, H. Köksel // Journal of Cereal Science. – 2020. – Vol. 93. – Art. 102941. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2020.102941. (in English).

Материалдар 2025-2027 жылдарға арналған AP26104789 «Функционалды ақуыз-көмірсу концентраттарын қолдана отырып, ашытылған сүт және ірімшік өнімдерін өндіру технологиясын әзірлеу және тәжірибелік енгізу» ғылыми жобасының гранттық қаржыландыруы аясында дайындалды.

А.К. Суйчинов, Ж.С. Есимбеков, Г.А. Капашева*, З.Т. Смагулова
[1]Семейский филиал ТОО «Казахский научно-исследовательский институт перерабатывающей и пищевой промышленности»,
071410, Казахстан, Семей, ул. Байтурсынова 29
*e-mail: gena.89.89@mail.ru

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ПИЩЕВОЙ ДОБАВКИ ИЗ ПШЕНИЧНЫХ ОТРУБЕЙ И ОЦЕНКА ЕЁ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ И ФУНКЦИОНАЛЬНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

В данной статье рассматривается технология получения пищевой добавки с улучшенными физико-химическими и функционально-технологическими свойствами путем глубокой переработки вторичного сырья пшеничных отрубей. Процесс обработки пшеничных отрубей осуществлялся в 0,05 М растворе лимонной кислоты (pH 4,8 ± 0,1) при температуре 45°C с использованием ультразвуковой обработки (35-40 кГц) в течение 30 минут. После разделения обработанной массы на фракции ее твердая часть промывалась до нейтрального значения pH, подвергалась лиофильной сушке и измельчалась.

Химический состав пищевой добавки, полученной данным методом, характеризуется следующим содержанием: белок 15 г, жир 3,5 г, углеводы 12 г, а доля пищевых волокон составила 40%. Кроме того, полученная добавка отличается высокой влагоудерживающей способностью (ВУС) 185,5% и жироудерживающей способностью (ЖУС) 343,2%. Эти показатели доказывают ее выраженные технологические свойства и способность стабилизировать структуру пищевых систем.

Предложенный метод позволяет получить из пшеничных отрубей пищевую добавку с улучшенными технологическими характеристиками. Разработанная пищевая добавка может быть использована в технологии пищевых продуктов, в том числе в производстве молочных продуктов. Это повышает пищевую ценность готовых изделий, улучшает их качество и расширяет ассортимент.

Ключевые слова: *пшеничные отруби, антинутриенты, ультразвуковая обработка, лиофильная сушка, пищевая добавка.*

A.K. Suychinov, Zh.S. Yesimbekov, G.A. Kapasheva*, Z.T. Smagulova
Kazakh Scientific Research Institute of Processing and Food Industry
(Semey branch), 29 Baitursynova str., Semey, 071410, Republic of Kazakhstan
*e-mail: gena.89.89@mail.ru

DEVELOPMENT OF A TECHNOLOGY FOR OBTAINING A FOOD ADDITIVE FROM WHEAT BRAN AND EVALUATION OF ITS PHYSICOCHEMICAL AND FUNCTIONAL-TECHNOLOGICAL PROPERTIES

This article considers the technology for producing a food additive with improved physicochemical, functional, and technological properties through the advanced processing of wheat bran, a secondary raw material. The processing of wheat bran was carried out in a 0.05 M citric acid solution (pH 4.8 ± 0.1) at a temperature of 45°C using ultrasound-assisted treatment (35-40 kHz) for 30 minutes. After fractionating the treated mass, its solid residue was washed to a neutral pH, subjected to freeze-drying (lyophilization), and ground into powder.

The chemical composition of the food additive obtained by this method is characterized by the following content: protein 15 g, fat 3.5 g, carbohydrates 12 g, and the dietary fiber share was 40%. Furthermore, the resulting additive is distinguished by a high water-holding capacity (WHC) of 185.5% and an oil-holding

capacity (OHC) of 343.2%. These indicators confirm its pronounced technological properties and capacity to stabilize the structure of food systems.

The proposed method enables the production of a food additive with improved technological characteristics from wheat bran. The developed food additive can be applied in food product technologies, including the dairy industry. This increases the nutritional value of end products, enhances their quality, and expands the product range.

Key words: *wheat bran, antinutrients, ultrasonic treatment, freeze-drying, food additive.*

Автор туралы ақпарат

Ануарбек Казисович Суйчинов – қауымдастырылған профессор, PhD, «Қазақ қайта өңдеу және тағам өнеркәсіптері ғылыми зерттеу институты» ЖШС Семей филиалы, Қазақстан Республикасы, Семей қ., директор; e-mail: asuychinov@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4862-3293.

Жәнібек Серікбекұлы Есимбеков – қауымдастырылған профессор, PhD, «Қазақ қайта өңдеу және тағам өнеркәсіптері ғылыми зерттеу институты» ЖШС Семей филиалы, Қазақстан Республикасы, Семей қ., жоба жетекшісі; e-mail: ezhanibek@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8556-9954.

Гүлдана Әділғазықызы Қапашева* – техника ғылымдарының магистрі; «Қазақ қайта өңдеу және тағам өнеркәсіптері ғылыми зерттеу институты» ЖШС Семей филиалы, Қазақстан Республикасы, Семей қ., ғылыми қызметкер; e-mail: gena.89.89@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-0735-9783.

Зәуреш Тұрсынханқызы Смагулова – техника ғылымдарының магистрі; «Қазақ қайта өңдеу және тағам өнеркәсіптері ғылыми зерттеу институты» ЖШС Семей филиалы, Қазақстан Республикасы, Семей қ., ғылыми қызметкер; e-mail: zaure665@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2676-8208.

Сведения об авторах

Ануарбек Казисович Суйчинов – ассоц. профессор, PhD; Семейский филиал ТОО «Казахский научно-исследовательский институт перерабатывающей и пищевой промышленности», Республика Казахстан, г. Семей, директор; e-mail: asuychinov@gmail.com.
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4862-3293.

Жанибек Серикбекович Есимбеков – ассоц. профессор, PhD; Семейский филиал ТОО «Казахский научно-исследовательский институт перерабатывающей и пищевой промышленности», Республика Казахстан, г. Семей, научный руководитель; e-mail: ezhanibek@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8556-9954.

Гулдана Адильгазыевна Капашева* – магистр технических наук; Семейский филиал ТОО «Казахский научно-исследовательский институт перерабатывающей и пищевой промышленности», Республика Казахстан, г. Семей, научный сотрудник; e-mail: gena.89.89@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-0735-9783.

Зауреш Турсынхановна Смагулова – магистр технических наук; Семейский филиал ТОО «Казахский научно-исследовательский институт перерабатывающей и пищевой промышленности», Республика Казахстан, г. Семей, научный сотрудник; e-mail: zaure665@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2676-8208.

Information about the authors

Anuarbek Kazisovich Suychinov – assoc. Professor, PhD; Kazakh Research Institute of Processing and Food Industry (Semey Branch), Republic of Kazakhstan, Semey, director; e-mail: asuychinov@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4862-3293.

Zhanibek Serikbekovich Yessimbekov – assoc. Professor, PhD, Kazakh Research Institute of Processing and Food Industry (Semey Branch), Republic of Kazakhstan, Semey, Project Manager; e-mail: ezhanibek@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8556-9954.

Guldana Adilgazievna Kapasheva* – Master of Technical Sciences; Kazakh Research Institute of Processing and Food Industry (Semey Branch), Republic of Kazakhstan, Semey, researcher; e-mail: gena.89.89@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-0735-9783.

Zauresh Tursynkhanovna Smagulova – Master of Technical Sciences; Kazakh Research Institute of Processing and Food Industry (Semey Branch), Republic of Kazakhstan, Semey, researcher; e-mail: zaure665@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2676-8208.

Редакцияға енуі 11.06.2026
Өңдеуден кейін түсуі 26.06.2026
Жариялауға қабылданды 29.06.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-46

МРНТИ: 65.01.11

З.К. Конарбаева
Южно-Казахстанский исследовательский университет имени М. Ауэзова,
160012, Республика Казахстан, г. Шымкент, пр. Тауке хана, 5
[2]Филиал НАО «Южно-Казахстанский университет имени М. Ауэзова»
Республика Узбекистан, г. Чирчик
e-mail: z.konarbayeva@auezov.edu.kz, pvo_ukgu@mail.ru

ТЕКСТУРНО-МОДИФИЦИРОВАННЫЕ ПИЩЕВЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПАЦИЕНТОВ С БОКОВЫМ АМИОТРОФИЧЕСКИМ СКЛЕРОЗОМ: ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ

Аннотация: *В статье рассмотрены технологические аспекты нутритивной поддержки пациентов с боковым амиотрофическим склерозом (БАС) при сочетании гиперметаболизма и дисфагии. Показано, что гиперметаболизм повышает энергетические и белковые потребности организма, а дисфагия требует адаптации текстурных характеристик пищи. Методологической основой исследования послужили анализ, систематизация и обобщение научных публикаций, посвященных особенностям нутритивной поддержки пациентов с БАС, а также современным подходам к разработке специализированных пищевых продуктов. Проанализированы подходы к разработке текстурно-модифицированных продуктов, включая гомогенизацию, регулирование вязкости, структурирование и стабилизацию дисперсных систем. Рассмотрены требования к пищевым системам, предназначенным для пациентов с нарушениями глотания, включая обеспечение структурной стабильности, контролируемой вязкости и безопасности потребления. Обоснована необходимость формирования однородной консистенции, контролируемого размера частиц и псевдопластических реологических свойств, обеспечивающих безопасность глотания. Предложена модель специализированного продукта, объединяющая нутритивные и технологические параметры. Определены основные требования к специализированным продуктам, включая энергетическую плотность, содержание белка, консистенцию, реологические характеристики и структурную стабильность. Практическая значимость работы заключается в обосновании подходов к созданию продуктов с заданными реологическими свойствами для пациентов с нарушениями глотания.*

Ключевые слова: *текстурно-модифицированные пищевые системы, нутритивная поддержка, реологические свойства, дисфагия, пищевая инженерия, гиперметаболизм, боковой амиотрофический склероз.*

Введение

Боковой амиотрофический склероз (БАС) относится к тяжелым нейродегенеративным заболеваниям, характеризующимся прогрессирующим поражением двигательных нейронов и утратой мышечной функции. Одним из наиболее значимых клинических проявлений заболевания является дисфагия, приводящая к нарушению процесса приема пищи и повышению риска аспирации [1, 2].

Наряду с этим у пациентов с БАС часто наблюдается гиперметаболизм, сопровождающийся повышенными энергетическими затратами организма. В сочетании с ограничением потребления пищи вследствие дисфагии это приводит к развитию нутритивной недостаточности, которая негативно влияет на течение заболевания и качество жизни пациентов [3-5].

Для нутритивной поддержки требуется разработка специализированных пищевых продуктов, способных обеспечить одновременно безопасность глотания, высокую пищевую ценность и технологическую стабильность. При этом ключевым требованием является сочетание повышенной энергетической плотности с адаптированными текстурными характеристиками [6].

Анализ современных подходов к нутритивной поддержке пациентов с БАС показывает, что существующие решения, как правило, ориентированы либо на компенсацию

©З.К. Конарбаева, 2026

энергетического дефицита, либо на обеспечение безопасного глотания. Однако комплексный учет гиперметаболизма и дисфагии в рамках единой технологической модели пищевого продукта остается недостаточно разработанным. Поэтому необходима разработка текстурно-модифицированных продуктов, учитывающих одновременно повышенные метаболические потребности и требования к реологическим характеристикам пищевых систем. В статье систематизированы данные о роли гиперметаболизма при БАС и рассмотрены технологические подходы к разработке текстурно-модифицированных продуктов с заданными реологическими свойствами [2, 7].

Материалы и методы

Методологической основой исследования является анализ и обобщение научных публикаций, посвященных вопросам нутритивной поддержки пациентов с боковым амиотрофическим склерозом, особенностям гиперметаболизма, а также технологическим аспектам разработки специализированных пищевых продуктов [2-5].

В процессе исследования были использованы методы сравнительного анализа и систематизации научных данных, позволяющие выявить основные закономерности формирования нутритивных потребностей пациентов и требований к пищевым системам. Проведен анализ современных подходов к разработке текстурно-модифицированных продуктов с учетом их структурных и реологических характеристик [7-9].

Особое внимание уделено интерпретации результатов исследований в области пищевых технологий, направленных на формирование однородных и стабильных дисперсных систем, обеспечивающих безопасность и удобство потребления при нарушениях глотания [11, 12].

Результаты исследования

Нутритивные особенности пациентов с БАС

У пациентов с боковым амиотрофическим склерозом риск нутритивной недостаточности высок из-за одновременного действия дисфагии и гиперметаболизма: эти факторы усиливают друг друга и ведут к выраженному дефициту энергии и нутриентов [2-5]. При дисфагии приходится менять консистенцию пищи, так как неоднородная текстура повышает риск аспирации и осложняет глотание, поэтому в клинике используют текстурно-модифицированные продукты с гомогенной структурой и заданной вязкостью [6-9].

Гиперметаболизм требует увеличения энергетической плотности рациона, что связано с повышенными энергозатратами организма, однако ограниченные возможности потребления пищи не дают компенсировать данный дефицит за счет увеличения объема питания. В результате возникает противоречие между потребностью в повышенном поступлении нутриентов и ограничениями, связанными с процессом глотания, что служит основанием для разработки специализированных пищевых продуктов, сочетающих высокую питательную ценность, концентрированность и безопасную текстуру [3,4].

Гиперметаболизм и нутритивные потребности

Гиперметаболизм относится к характерным особенностям течения бокового амиотрофического склероза и проявляется увеличением энерготрат организма в среднем на 10-30%, что сопровождается повышением энергозатрат и формированием дефицита энергии и нутриентов. Следствием становится усиление катаболических процессов, ускоренная потеря мышечной массы и развитие белково-энергетической недостаточности [3-5]. Указанные изменения существенно повышают потребность организма в энергии и нутриентах, поэтому в данных условиях к организации питания предъявляют повышенные требования, где ключевыми критериями выступают высокая энергетическая плотность рациона, достаточное содержание белка и концентрация нутриентов в минимальном объеме пищи [2].

Особое значение приобретает сочетание высокой нутритивной ценности с адаптированными текстурными характеристиками продуктов [7], поскольку ограниченный объем потребления пищи при дисфагии затрудняет компенсацию энергетического дефицита [6]. Разработка концентрированных пищевых систем, обеспечивающих поступление энергии и нутриентов в малом объеме, становится необходимой. Для специализированных продуктов рекомендуется энергетическая плотность на уровне не менее 1,5-2,0 ккал/мл при одновременном повышенном содержании белка [2].

Таким образом, нутритивная поддержка пациентов с БАС должна основываться на создании продуктов, сочетающих высокую энергетическую и биологическую ценность с безопасной и контролируемой текстурой, обеспечивающей возможность их потребления при нарушениях глотания.

Дисфагия как ограничивающий фактор

Несмотря на ключевую роль гиперметаболизма в формировании нутритивных потребностей, существенным ограничением эффективной нутритивной поддержки пациентов с БАС остается дисфагия [2, 6]. Нарушение глотания значительно осложняет процесс приема пищи и снижает возможность адекватного обеспечения организма необходимыми нутриентами.

Дисфагия требует изменения традиционных подходов к организации питания, включая модификацию консистенции продуктов, исключение пищевых систем с неоднородной структурой, а также строгий контроль их реологических характеристик, прежде всего вязкости и текучести; особое значение имеет обеспечение однородности и стабильности пищевых систем, поскольку наличие твердых включений или расслоение повышает риск аспирации и снижает безопасность потребления [7-10].

По этой причине при разработке специализированных продуктов требуется учитывать одновременно метаболические потребности, связанные с гиперметаболизмом, и функциональные ограничения вследствие нарушения глотания, что диктует комплексный подход, объединяющий нутритивные и технологические решения [3, 4, 6].

Текстурно-модифицированные продукты

Текстурно-модифицированные продукты составляют основу нутритивной поддержки пациентов с дисфагией, так как именно их структурные характеристики определяют безопасность и возможность потребления пищи; разработка таких продуктов предусматривает учет комплекса факторов, включая реологические свойства, стабильность системы и однородность структуры, а ключевыми требованиями выступают формирование однородной дисперсной структуры, контроль вязкости и текучести, а также предотвращение расслаивания и образования твердых включений, что обеспечивает снижение риска аспирации и повышение безопасности питания [2, 6-8, 11].

С технологической точки зрения наиболее перспективными считаются пюреобразные, гомогенизированные и суспензионные системы, дающие возможность создавать продукты с заданными реологическими параметрами; значимую роль играют процессы гомогенизации, измельчения и стабилизации, направленные на формирование устойчивых пищевых систем. В качестве технологической модели могут рассматриваться продукты детского питания, в которых уже реализованы принципы высокой однородности, безопасности и контролируемой текстуры, однако продукты для пациентов с БАС, в отличие от детского питания, должны обладать повышенной энергетической плотностью и содержанием белка, что требует дополнительной технологической адаптации рецептур и процессов; разработка текстурно-модифицированных продуктов для пациентов с дисфагией представляет собой сложную задачу, требующую сочетания требований к нутритивной ценности и структурно-механическим характеристикам пищевых систем [2, 5, 9, 12, 13].

Реологические свойства пищевых систем

Реологические характеристики пищевых систем играют ключевую роль в обеспечении безопасности и эффективности нутритивной поддержки пациентов с дисфагией, поскольку именно они определяют поведение продукта в процессе глотания [7].

К основным параметрам, подлежащим контролю, относятся вязкость, однородность и структурная устойчивость системы [8]. Данные характеристики обеспечивают формирование предсказуемого течения продукта, предотвращают его расслоение и способствуют снижению риска аспирации.

Наиболее предпочтительным является псевдопластический характер течения, при котором продукт сохраняет структуру в состоянии покоя и разжижается при механическом воздействии, облегчая процесс глотания. Такой тип реологического поведения является наиболее предпочтительным, поскольку продукт сохраняет достаточную вязкость в состоянии покоя, обеспечивая контроль над болюсом, и одновременно разжижается при механическом воздействии, облегчая процесс глотания [11].

С позиций пищевой технологии для регулирования реологических характеристик систем целесообразно применять гидроколлоиды, поскольку они дают возможность задавать требуемые параметры вязкости и текучести. Среди гидроколлоидов значимую роль играет ксантановая камедь за счет выраженных псевдопластических свойств; ее использование обеспечивает формирование стабильных систем, предотвращающих седиментацию и расслоение, при сохранении оптимального баланса между вязкостью и текучестью [12, 11].

Введение гидроколлоидов также повышает устойчивость пищевых систем в процессе хранения, что выступает важным фактором при разработке специализированных продуктов для нутритивной поддержки пациентов с дисфагией [12].

Технологические подходы к разработке продуктов

Учитывая особенности гиперметаболизма и дисфагии, разработка специализированных пищевых продуктов требует комплексного применения технологических решений для обеспечения высокой пищевой ценности и адаптированных текстурных характеристик. Одним из ключевых этапов выступает формирование структуры продукта, где пюреобразные системы рассматриваются как дисперсные пищевые системы с контролируемым размером частиц и высокой степенью гомогенности, так как обеспечение однородной структуры дает возможность минимизировать риск аспирации и повысить безопасность потребления [2, 6, 9].

Значимую роль в технологии занимает процесс гомогенизации, эффективность которого определяется режимами обработки при повышенном давлении. Повышение давления способствует уменьшению размера частиц, формированию более устойчивой дисперсной системы и предотвращению расслоения, что обеспечивает необходимую однородность, стабильность продукта и улучшение его текстурных характеристик. Регулирование вязкости относится к критическим этапам разработки и достигается использованием технологических компонентов, включая крахмалы, гидроколлоиды и белковые системы. Комбинированное применение таких компонентов позволяет создавать продукты с заданными реологическими параметрами и оптимальным соотношением вязкости и текучести. В качестве технологической базы могут рассматриваться принципы производства продуктов детского питания, где уже реализованы требования к высокой однородности и безопасности текстуры, при этом технологии для пациентов с БАС нуждаются в адаптации, связанной с повышением энергетической плотности и содержания белка, а также увеличением концентрации нутриентов в ограниченном объеме [2, 5, 8, 11-13].

Сравнительный анализ показывает, что энтеральные смеси и пюреобразные продукты обладают различными функциональными характеристиками (табл. 1): первые обеспечивают поступление нутриентов в жидкой форме, однако имеют ограниченный контроль текстуры и сниженное сенсорное восприятие, тогда как пюреобразные продукты характеризуются более высоким уровнем контроля реологических свойств и разнообразием рациона [7, 9].

Таблица 1 – Сравнительная характеристика энтеральных смесей и пюреобразных продуктов

Параметр	Энтеральные смеси	Пюреобразные продукты
Консистенция	Жидкая	Пюре
Контроль текстуры	Ограничен	Высокий
Органолептическое восприятие	Снижено	Более естественное
Разнообразие	Ограничено	Высокое

Особенности упаковки

Упаковка специализированных пищевых продуктов для пациентов с БАС является важным элементом технологической системы, поскольку она должна обеспечивать не только сохранность продукта, но и удобство его потребления с учетом ограниченной моторики пациентов [16].

Для специализированных продуктов рациональны формы упаковки, позволяющие употреблять продукт непосредственно без дополнительной подготовки. Это дой-паки, порционные контейнеры и упаковки, адаптированные для прямого потребления, применение которых сокращает число манипуляций и уменьшает физическую нагрузку на пациента [17].

К основным требованиям к упаковке относят герметичность, необходимую для защиты от микробиологического загрязнения и окислительных процессов, и сохранение стабильности

текстуры продукта в течение срока хранения, поскольку предотвращение расслоения и изменения реологических свойств определяет безопасность потребления [16].

Конструкция упаковки должна предусматривать удобство дозирования и контролируемую подачу продукта, что критично при дисфагии. Технические решения в виде мягких упаковок с узким дозирующим отверстием или систем с регулируемым потоком обеспечивают более безопасное и контролируемое потребление, поэтому упаковка специализированных продуктов выступает неотъемлемым элементом технологического решения, отвечающим за сохранение реологических характеристик, безопасность и удобство использования [17].

Обсуждение результатов

Модель текстурно-модифицированного продукта для пациентов с БАС

Анализ метаболических и функциональных нарушений у пациентов с боковым амиотрофическим склерозом позволяет обосновать модель специализированного пищевого продукта, сочетающую компенсацию гиперметаболизма и коррекцию дисфагии [3-6]. Концептуальная схема формирования такого продукта представлена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Модель формирования текстурно-модифицированного продукта для пациентов с боковым амиотрофическим склерозом

Предложенная модель позволяет систематизировать требования к специализированным продуктам и может использоваться в качестве основы при разработке пищевых систем для пациентов с дисфагией. Ее применение обеспечивает интеграцию нутритивных и технологических подходов в рамках единой концепции продукта. Основные требования к специализированным пищевым продуктам для пациентов с БАС представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Требования к специализированным пищевым продуктам для пациентов с БАС

Показатель	Требование	Обоснование
Энергетическая плотность	1,5-2,0 ккал/мл	Компенсация гиперметаболизма
Содержание белка	≥15-20 % от ЭЦ	Предотвращение катаболизма
Консистенция	Пюреобразная или гомогенизированная	Безопасность глотания
Размер частиц	<500 мкм	Снижение риска аспирации
Вязкость	Средняя или повышенная	Контроль болюса
Реология	Псевдопластическая	Облегчение глотания
Стабильность	Отсутствие расслоения	Безопасность и качество

Разрабатываемый продукт должен соответствовать комплексу взаимосвязанных требований, охватывающих нутритивные и реологические характеристики [2-7]. К основным параметрам модели относят энергетическую плотность не менее 1,5-2,0 ккал/мл, содержание белка не менее 15-20% от общей энергетической ценности, пюреобразную или гомогенизированную консистенцию и размер частиц менее 500 мкм.

Реологические характеристики продукта определяют безопасность глотания. Вязкость должна соответствовать уровням, рекомендованным для дисфагии, а псевдопластическое поведение системы обеспечивает сохранение структуры в состоянии покоя и снижение сопротивления при механическом воздействии, что облегчает глотание [7-11].

Структурная стабильность продукта предусматривает отсутствие расслоения и сохранение однородности в течение срока хранения и достигается подбором технологических параметров и стабилизирующих компонентов [12]. Технологические подходы к формированию свойств пищевых систем представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Технологические подходы к формированию свойств пищевых систем

Процессы	Технологические приемы	Достигаемый параметр
Измельчение	Механическое диспергирование	Размер частиц <500 мкм
Гомогенизация	Обработка при повышенном давлении	Однородность системы
Структурирование	Применение гидроколлоидов	Формирование текстуры, соответствующей уровням IDDSI
Регулирование вязкости	Варьирование концентрации загустителей	Достижение безопасной вязкости для глотания
Стабилизация	Использование эмульгаторов, стабилизаторов	Предотвращение расслоения при хранении
Упаковка	Асептическая фасовка в порционную тару	Обеспечение микробиологической стабильности

Таблица составлена автором на основе литературных данных [8-12].

Дальнейшие работы должны быть направлены на обоснование рецептур с регламентированными реологическими параметрами и их клиническую апробацию при нутритивной поддержке пациентов с БАС. Целесообразна разработка продуктов, объединяющих высокую энергетическую плотность и текстуру, модифицированную для разных стадий дисфагии. Такой подход обеспечивает индивидуализацию нутритивной поддержки.

Заключение

Нутритивная поддержка при боковом амиотрофическом склерозе требует учета двух факторов: гиперметаболизма и дисфагии. Гиперметаболизм определяет потребность в повышенной энергетической и белковой плотности рациона. Дисфагия диктует требования к текстурным и реологическим характеристикам продуктов. В связи с этим актуальна разработка текстурно-модифицированных пищевых систем с высокой нутритивной ценностью и контролируемыми структурно-механическими свойствами. Представленная модель специализированного продукта обобщает требования к составу и структуре. Она может быть использована как основа при проектировании функциональных пищевых продуктов для пациентов с нарушениями глотания. Обоснованы технологические подходы к созданию продуктов с заданными реологическими характеристиками. Дальнейшие исследования должны включать разработку рецептур и их клиническую апробацию.

Список литературы

1. Amyotrophic lateral sclerosis / E.L. Feldman et al // The Lancet. – 2022. – Vol. 400, № 10360. – P. 1363-1380. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(22)01272-7.
2. ESPEN guideline: clinical nutrition in neurology / R. Burgos et al // Clinical Nutrition. – 2018. – Vol. 37, № 1. – P. 354-396. https://doi.org/10.1016/j.clnu.2017.09.003.
3. Factors correlated with hypermetabolism in patients with amyotrophic lateral sclerosis / J.C. Desport et al // American Journal of Clinical Nutrition. – 2001. – Vol. 74, № 3. – P. 328-334.
4. Energy metabolism in amyotrophic lateral sclerosis / L. Dupuis et al // The Lancet Neurology. – 2011. – Vol. 10, № 1. – P. 75-82. https://doi.org/10.1016/S1474-4422(10)70224-6.
5. Nutritional and metabolic support in patients with amyotrophic lateral sclerosis / M. Muscaritoli et al // Nutrition. – 2012. – Vol. 28, № 10. – P. 959-966. https://doi.org/10.1016/j.nut.2012.01.011.
6. Texture-modified food for dysphagic patients: a review on the rheology and technological aspects / D. Raheem et al // International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2021. – Vol. 18, № 10. – Art. 5125. https://doi.org/10.3390/ijerph18105125.

7. Hadde E.K. Texture and texture assessment of thickened fluids and texture-modified foods for dysphagia management / E.K. Hadde, J. Chen // Journal of Food Engineering. – 2021. – Vol. 292. – Art. 110248. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110248.
8. Influence of thickening agents on rheological properties and sensory perception of texture-modified foods and beverages: a review / Schmidt H. de O.S. et al // Foods. – 2021. – Vol. 10, № 10. – Art. 2457. https://doi.org/10.3390/foods10102457.
9. Texture modification technologies and their opportunities for the production of dysphagia foods: a review / S. Sungsinchai et al // International Journal of Food Science & Technology. – 2019. – Vol. 54. – P. 2912-2921.
10. Complete IDDSI Framework: Detailed Definitions. Version 2.0 / International Dysphagia Diet Standardisation Initiative (IDDSI). – 2019. https://iddsi.org (date of access: 26.08.2026).
11. Food polysaccharides and roles of rheology and tribology in rational design of thickened liquids for oropharyngeal dysphagia / P. Methacanon et al // Journal of Texture Studies. – 2021. – Vol. 52. – P. 678-689. https://doi.org/10.1111/jtxs.12627.
12. Funami T. Next target for food hydrocolloid studies: texture design of foods using hydrocolloid technology / T. Funami // Food Hydrocolloids. – 2011. – Vol. 25, № 8. – P. 1904-1914. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.03.010.
13. Milk proteins: chemistry, functionality and diverse industrial applications / G.A. Nayik et al // Food Science & Nutrition. – 2024. https://doi.org/10.1080/23311932.2024.2377686.
14. Oat β-glucan: physico-chemical characteristics in relation to its blood-glucose and cholesterol-lowering properties / Q. Wang et al // British Journal of Nutrition. – 2014. – Vol. 112, suppl. 2. – P. S4-S13. https://doi.org/10.1017/S0007114514002256.
15. Textural classification of commercial foodstuffs for dysphagia using back-extrusion test / M.T. Murillo-Arbizu et al // Foods. – 2025. – Vol. 14, № 21. – Art. 3741. https://doi.org/10.3390/foods14213741.
16. Robertson G.L. Food Packaging: Principles and Practice / G.L. Robertson. – 3rd ed. – Boca Raton : CRC Press, 2012. – 733 p. https://doi.org/10.1201/b21347.
17. Easy to open? Exploring the “openability” of hospital food and beverage packaging by older adults / A.F. Bell et al // Appetite. – 2016. – Vol. 98. – P. 125-132. https://doi.org/10.1016/j.appet.2015.12.004.

З.К. Конарбаева
М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан зерттеу университеті,
160012, Қазақстан Республикасы, Шымкент қ., Тәуке хан даңғылы, 5
Шыршық қаласындағы «М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті» КеАҚ филиалы, Өзбекстан Республикасы
e-mail: z.konarbayeva@auezov.edu.kz, pvo_ukgu@mail.ru

БҮЙІРЛІК АМИОТРОФИЯЛЫҚ СКЛЕРОЗЫ БАР ПАЦИЕНТТЕРГЕ АРНАЛҒАН ТЕКСТУРАСЫ ӨЗГЕРТІЛГЕН ТАҒАМДЫҚ ЖҮЙЕЛЕР: ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ ТӘСІЛДЕР

Мақалада гиперметаболизм мен дисфагия қатар байқалатын бүйірлік амиотрофиялық склерозы (БАС) бар пациенттерді нутритивтік қолдаудың технологиялық аспектілері қарастырылған. Гиперметаболизм ағзаның энергия мен ақуызға деген қажеттілігін арттыратыны, ал дисфагия тағамның текстуралық сипаттамаларын бейімдеуді талап ететіні көрсетілген. Зерттеудің әдіснамалық негізін БАС бар пациенттерді нутритивтік қолдау ерекшеліктеріне, сондай-ақ мамандандырылған тағам өнімдерін әзірлеудің заманауи тәсілдеріне арналған ғылыми жарияланымдарды талдау, жүйелеу және жалпылау құрады. Текстурасы өзгертілген өнімдерді әзірлеу тәсілдері, оның ішінде гомогенизациялау, тұтқырлықты реттеу, құрылым қалыптастыру және дисперстік жүйелерді тұрақтандыру мәселелері талданды. Жұтыну бұзылыстары бар пациенттерге арналған тағамдық жүйелерге қойылатын талаптар, соның ішінде құрылымдық тұрақтылықты, бақыланатын тұтқырлықты және тұтыну қауіпсіздігін қамтамасыз ету шарттары қарастырылды. Жұтыну қауіпсіздігін қамтамасыз ететін біртекті консистенцияны, бөлшектердің бақыланатын өлшемін және

псевдопластикалық реологиялық қасиеттерді қалыптастыру қажеттілігі негізделді. Нутритивтік және технологиялық параметрлерді біріктіретін мамандандырылған өнімнің моделі ұсынылды. Мамандандырылған өнімдерге қойылатын негізгі талаптар, оның ішінде энергия сыйымдылығы, ақуыз мөлшері, консистенциясы, реологиялық сипаттамалары және құрылымдық тұрақтылығы айқындалды. Жұмыстың практикалық маңыздылығы жұтыну бұзылыстары бар пациенттерге арналған алдын ала берілген реологиялық қасиеттері бар өнімдерді әзірлеу тәсілдерін негіздеумен сипатталады.

Түйін сөздер: *текстурасы өзгертілген тағамдық жүйелер, нутритивтік қолдау, реологиялық қасиеттер, дисфагия, тамақ инженериясы, гиперметаболизм, бүйірлік амиотрофиялық склероз.*

Z. Konarbayeva
M. Auezov South Kazakhstan Research University,
160012, Republic of Kazakhstan, Shymkent, Tauke khan avenue, 5
Branch of NPJSC «M. Auezov South-Kazakhstan University» in Chirchik, Republic of Uzbekistan
e-mail: z.konarbayeva@auezov.edu.kz, pvo_ukgu@mail.ru

TEXTURE-MODIFIED FOOD SYSTEMS FOR PATIENTS WITH AMYOTROPHIC LATERAL SCLEROSIS: TECHNOLOGICAL APPROACHES

This article examines the technological aspects of nutritional support for patients with amyotrophic lateral sclerosis (ALS) under conditions of combined hypermetabolism and dysphagia. Hypermetabolism has been shown to increase the body's energy and protein requirements, while dysphagia necessitates the adaptation of food texture characteristics. The methodological basis of the study consisted of the analysis, systematization, and generalization of scientific publications devoted to the nutritional support of ALS patients, as well as modern approaches to the development of specialized food products. Approaches to the development of texture-modified products, including homogenization, viscosity control, structuring, and stabilization of dispersed systems, were analyzed. The requirements for food systems intended for patients with swallowing disorders were considered, including structural stability, controlled viscosity, and consumption safety. The necessity of forming a homogeneous consistency, controlled particle size, and pseudoplastic rheological properties ensuring safe swallowing was substantiated. A model of a specialized product integrating nutritional and technological parameters was proposed. The main requirements for specialized products, including energy density, protein content, consistency, rheological characteristics, and structural stability, were identified. The practical significance of the study lies in substantiating approaches to the development of products with predetermined rheological properties for patients with swallowing disorders.

Key words: *texture-modified food systems, nutritional support, rheological properties, dysphagia, food engineering, hypermetabolism, amyotrophic lateral sclerosis.*

Сведения об авторе

Зулфия Кемелхановна Конарбаева – PhD, ассоциированный профессор, заместитель директора филиала НАО «Южно-Казахстанский университет имени М. Ауэзова» в городе Чирчик, Республика Узбекистан; e-mail: z.konarbayeva@auezov.edu.kz, pvo_ukgu@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5469-455X.

Автор туралы мәліметтер

Зулфия Кемелхановна Конарбаева – PhD, қауымдастырылған профессор, Шыршық қаласындағы «М.Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті» КеАҚ филиалы, Өзбекстан Республикасы; z.konarbayeva@auezov.edu.kz, pvo_ukgu@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5469-455X.

Information about the author

Zulfiya Konarbayeva – PhD, Associate Professor, Deputy Director of the Branch of M. Auezov South Kazakhstan University (Non-profit Joint Stock Company), Chirchik, Republic of Uzbekistan; e-mail: z.konarbayeva@auezov.edu.kz, pvo_ukgu@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5469-455X.

Поступила в редакцию 02.06.2026
Поступила после доработки 21.08.2026
Принята к публикации 24.08.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-47

BY 4.0
Check for updates

ҒТАХР: 62.09.37

Ж.Д. Асқар, Ш.А. Абжанова, Ә.У. Байбекова, Н.С. Төкен, А.Н. Құрманәлі*
Алматы технологиялық университеті,
050012, Қазақстан Республикасы, Алматы, Төле би к-сі, 100
*e-mail: aktoty.kurmanali@mail.ru

ШЫРҒАНАҚ ЖЕМІСТЕРІНЕН БИОЛОГИЯЛЫҚ БЕЛСЕНДІ ЗАТТАРДЫ УЛЬТРАДЫБЫСТЫҚ ЭКСТРАКЦИЯ АРҚЫЛЫ БӨЛІП АЛУ ӘДІСІН ОҢТАЙЛАНДЫРУ

Аңдатпа: *Мақалада Іле Алатауының (Қазақстан) тау бөктерінде өсетін шырғанақ (Hippophae L.) жемістерінің жабайы түрінен ультрадыбыстық экстракция арқылы сығынды алу жағдайлары қарастырылды. Экологиялық-географиялық шығу тегіне, сорттарына байланысты шырғанақ жидектері биохимиялық құрамымен айтарлықтай ерекшеленеді. Қазақстан аумағында өсетін шырғанақтың жабайы және мәдени жемістері құрамы жағынан бай және қол жетімді өсімдік шикізатты ретінде аса бағаланады. Шырғанақ жемістерінің құрамында аскорбин қышқылы, токоферолдар, каротиноидтар, флавоноидтар, органикалық қышқылдар, полиқанықпаған май қышқылдары, таниндер және полисахаридтер бар. Зерттеуде шикізат пен еріткіш 1:5 және 1:10 қатынасында 30%, 50% және 70% болатын этанол концентрациясында алынған алты үлгіге салыстырмалы бағалау жүргізілді. Құрғақ заттардың шығымы гравиметриялық әдіспен анықталды. Сығынды құрамындағы полифенолдардың мөлшерін Фолин-Чокальтеу реактиві есебінде спектофотометрлік әдіспен жасалды және галл қышқылының эквивалентімен есептелді. Сығындылардың антиоксиданттық белсенділігі FRAP және DPPH әдістерімен анықталды. Зерттеу нәтижелері ультрадыбыстық экстракция тиімділігі шикізат пен еріткіш қатынасына айтарлықтай тәуелді екенін көрсетті. Құрғақ заттардың ең жоғары шығымы 1:10 шикізат пен еріткіш қатынасында 70% этанолды қолданғанда байқалды, ал жалпы полифенолдар мен антиоксиданттық белсенділіктің ең жоғары мәндеріне 1:5 шикізат пен еріткіш қатынасында 70% этанолды қолданғанда қол жеткізілді. Алынған ғылыми деректер шырғанақ жемісі негізіндегі табиғи антиоксидант пен функционалдық өнімдерді өндірудің өнеркәсіптік технологияларын жасауға практикалық негіз бола алады.*

Түйін сөздер: *шырғанақ жемісі, ультрадыбыстық экстракциясы, полифенолдар, антиоксиданттық белсенділік, сығынды.*

Кіріспе

Қазіргі уақытта өсімдік шикізатының биологиялық белсенді компоненттерін және олардың адам денсаулығын нығайтуды қамтамасыз ететін ағзаға әсерін зерттеуге көп көңіл бөлінеді. Жеміс-жидек өнімдерін қолдану саласы дәрумендер, минералды заттар және полиқанықпаған май қышқылдарының ағза үшін маңызы туралы білімнің артуына, сондай-ақ оларды өңдеу кезінде биологиялық құнды компоненттердің сақталуын қамтамасыз ететін технологияларға қызығушылықтың өсуіне байланысты қарқынды дамып келеді. Жидектердің құрамындағы қоректік заттардың тұтынуды арттыру үшін, шырғанақ жемісінен құрамы бай сығынды алу өзекті болып саналады [1].

Шырғанақ *(Hippophae L.)* − қысқа сабақты, сары жемістері бар тармақталған тікенді бұта. Қазақстан жерінде шырғанақ жемісінің жабай және мәдени түрлері кездеседі. Бұта түрінде шырғанақ екі метрге дейін, ағаш түрінде 3,5 метрге дейін өседі. Ылғал сүйгіш, қысқа төзімді, жеміс беру ұзақтығы 15 жылға дейін, шамамен бір бұтаға 10 кг дейін өнім бере алады [2]. Көптеген әдеби дереккөздерде шырғанақ жемістері үйлесімді пайдалы элементтер (темір, каротин, В, С, Е дәрумендері, фолий қышқылы, антиоксиданттық қосылыстар, липидтер, фенолдық қосылыстар) жиынтығы бар екені айтылған. Шырғанақ жемістерін ежелден тағамдық және емдік өсімдік ретінде қолданылған. Ғалымдардың зерттеулерінде шырғанақ жемістері мен өсімдік бөліктері де жүйелі түрде антиоксидантты, қабынуға қарсы ісікке қарсы, күйзеліске қарсы, тромбоздың алдын алатын, иммундық жүйені нығайтатын, антимикробтық қасиеттері бар екені айтылған [3]. Бұл шырғанақ жемісінен алынған сығындылардың әртүрлі

©Ж.Д. Асқар, Ш.А. Абжанова, Ә.У. Байбекова, Н.С. Төкен, А.Н. Құрманәлі, 2026

тіндердің зақымдануы мен сырқатына, асқазан ішек жолдарының, бауыр мен бүйрек ауруларын еміне шипасы бар екенін көрсетеді. Жемістердің пайдалы құрамын бұзбай олардың сақталуын қамтамассыз ету арқылы оңтайлы экстракция жағдайын таңдау негізгі мәселе болып табылады [4].

Зерттеудің мақсаты – Іле Алатауында өсетін шырғанақ өсімдігінің жабайы түрлерінен ультрадыбыстық экстракция арқылы биологиялық белсенді заттарды бөліп алудың оңтайлы әдісін зерттеу. Сығындылардың құрамындағы жалпы полифенолдардың мөлшерін және антиоксиданттық қасиетін анықтау.

Зерттеу әдістері. Іле Алатауында (Қазақстан) өсетін шырғанақтың жабайы жемістері 2025 жылдың қыркүйек айында экологиялық таза аймақтан теріп алынды. Жиналған жемістер бөгде қоспалардан зертханалық жағдайда тазартылды. Жуылған жемістерді кептіргіш шкафта 50°C температурада 24 сағат бойы кептірілді. Кепкен жемістер ЛЗМ-1 зертханалық диірменінде ұсақталып, шамамен 200-400 мкм бөлшек өлшеміне дейін жеткізіліп, негізгі шикізат ретінде пайдаланылды. Экстракция үшін 30, 50 және 70 % (көлемдік үлесі бойынша) сулы этанол ерітінділері пайдаланылды. Шикізат пен экстрагенттің қатынасы 1:5 және 1:10 болды. Ультрадыбыстық экстракция әдісі үшін генератор жиілігі 35 кГц және қуаты 150 Вт болатын ТТС «Сапфир» құрылғысы қолданылды. Экстракция үрдісі 50°C температурада, 30 минут аралықта жүргізілді. Экстракция үрдісінен кейін алынған қоспаны бөлу үшін РЕ-6900 маркалы зертханалық центрифугасы қолданылды (центрифугалау 5000 айн/мин жылдамдықта, 10 минут бойы, 20°C температурада жүргізілді). Центрифугалаудан кейін сұйық фаза қатты тұнбадан бөлініп алынды. Алынған сұйықтықтан артық этанол IKA RV 10 digital айналмалы буландырғышында (50°C, 200 мбар, 45-60 мин) буландырып шығарылды. Нәтижесінде концентрлі қою сығынды алынды.

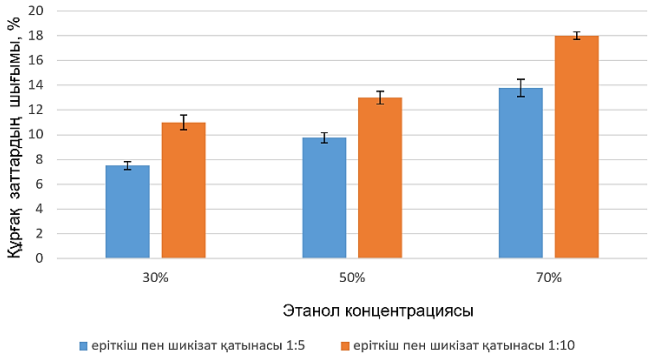
Құрғақ заттардың шығымын анықтау үшін қою сығындының аликвотасы алынып, гравиметриялық әдіспен МЕМСТ Р 51437-99 стандартына сәйкес тұрақты массаға дейін кептірілді. Құрғақ заттардың мөлшері массаның айырмасы бойынша есептелді [5]. Полифенолды қосылыстар Фолин–Чокальтеу реактивін қолдана отырып, спектрофотометриялық әдіспен анықталды. Калибрлеу графигін құру үшін гал қышқылының бастапқы сулы ерітіндісі (200 мг/1000 мл) дистилденген сумен әртүрлі концентрацияларға дейін сұйылтылды. Талдау барысында стандартты ерітіндіге 4,00 мл дистилденген су, 0,25 мл Фолин-Чокальтеу реактиві және 0,25 мл натрий карбонатының қаныққан сулы ерітіндісі қосылды. Нәтижелер галл қышқылының эквиваленті (мг ГҚЭ/г) түрінде көрсетілді [6]. Әрбір тәжірибе үш қайталауда орындалды.

Сығынды құрамындағы антиоксиданттық белсенділік DPPH (2,2-дифенил-1-пикрилгидразил) радикалын тежеу әдісімен анықталды. Зерттелетін үлгінің аликвоталары (0,05; 0,10; 0,40; 0,80; 1,00 және 2,00 мл) 100 мл дистилденген суда дайындалды. Әрбір ерітіндінің 0,2 мл көлемі 2,0 мл DPPH ерітіндісіне қосылып, 20°C температурада қараңғы жерде 30 минут бойы ұсталды. Кейін 517 нм толқын ұзындығында оптикалық тығыздығы өлшенді. Антирадикалдық белсенділік IC_{50} (50 % бос радикалды бейтараптандыратын концентрация, мг/мл) түрінде көрсетілді. Барлық тәжірибелер үш мәрте қайталанып жүргізілді [7, 8].

Салыстырмалы антиоксиданттық белсенділік FRAP әдісімен анықталды. Талдау үшін 300 mM ацетат буферінен (pH 3,6), 10 mM TPTZ ерітіндісінен және 20 mM $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ ерітіндісінен 10:1:1 көлемдік қатынаста дайындалған FRAP реактиві пайдаланылды. Реактив 37 °C температурада 10 минут инкубацияланды. Зерттелетін үлгінің 0,1 мл көлеміне 3,0 мл дистилденген су және 1,0 мл FRAP реактиві қосылды. Қоспа 37 °C температурада 4 минут ұсталғаннан кейін, оптикалық тығыздығы 593 нм толқын ұзындығында өлшенді. Trolox стандартты ерітінділерінің 0-1,0 mM концентрациялар диапазонында калибрлеу қисығы құрылып, зерттелетін үлгілердің антиоксиданттық белсенділігі осы калибрлеу қисығының сызықтық регрессия теңдеуі бойынша есептелді. Нәтижелер mM Trolox эквиваленті (mM TE) түрінде көрсетілді [9,10]. Әрбір тәжірибе үш қайталауда орындалды.

Зерттеу нәтижелері және оларды талдау. Экстракцияның әртүрлі жағдайларында құрғақ заттардың шығуын анықтау нәтижелері 1-суретте көрсетілген. Этанол концентрациясының жоғарылауы экстракция тиімділігін арттырып, құрғақ заттардың шығуы ұлғайғанын көрсетті. Ең жоғарғы көрсеткіш 70 % этанол концентрациясы және 1:10 шикізат пен еріткіш қатынасында байқалды. Төменгі көрсеткіш 30% этанол концентрациясы және 1:5

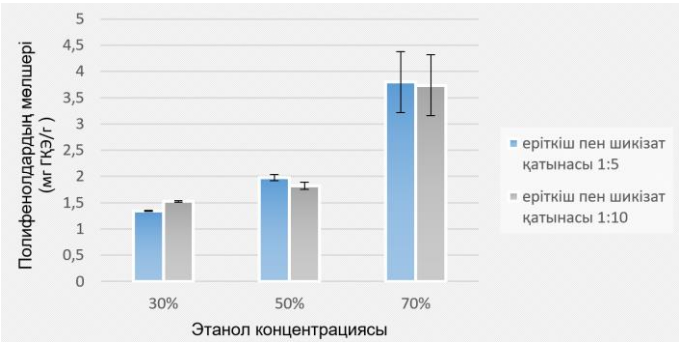
шикізат пен еріткіш қатынасында байқалды. Еріткіш пен шикізаттың арақатынасы ұлғайған сайын шикізат пен еріткіш арасындағы заттардың тасымалдану қарқындылығы артады.



Сурет 1 – Этанол концентрациялары мен шикізат пен еріткіш қатынастарына байланысты экстракция шығымы

Нәтижесінде биологиялық белсенді қосылыстардың жасуша құрылымынан ерітіндіге өтіп, экстракция шығымы ұлғаяды. 1:10 қатынасында байқалған жоғары көрсеткіштер осы заңдылықпен түсіндіріледі [9]. Өнеркәсіптік жағдайда еріткіш мөлшерін арттыру экстракция шығымының пропорционалды өсуіне әрдайым әкелмейді. Еріткішті буландыру, тазарту және қайта қалпына келтіру процестеріне жұмсалатын энергия шығындарын ескергенде, 1:5 қатынасы технологиялық және экономикалық тұрғыдан неғұрлым тиімді нұсқа болып табылады.

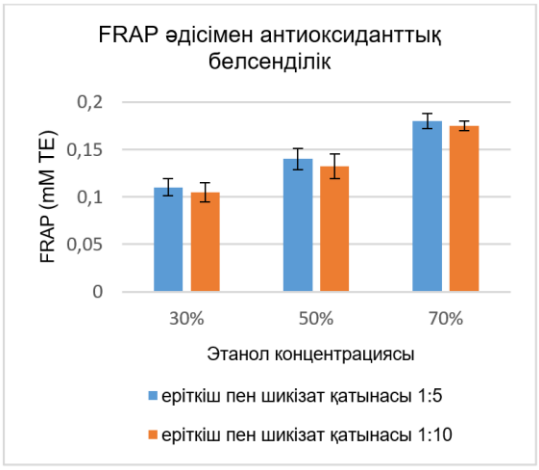
2 – суретте көрсетілгендей, полифенолдардың мөлшері де этанол концентрациясына байланысты. 70%-дық этанолды қолдану кезінде және шикізат пен экстрагент қатынасы 1:5 болған жағдайда жалпы полифенолдардың жоғары мөлшері – 3,800 ± 0,580 мг ГҚЭ/г құрады. Бұл көрсеткіш 30%-дық этанолмен алынған үлгідегі мәннен шамамен 2,8 есе жоғары болды. Талдау нәтижелерінде екі қатынаста да (1:5 және 1:10) 70%-дық этанол жоғары нәтижелерді байқалды. Фенолдық қосылыстарды бөліп алу үшін құрамында 70% сулы этанол оңтайлы еріткіштер ретінде қарастырылып, өсімдік жасушаларынан тиімді бөлініп шығуына ықпал етеді [11].



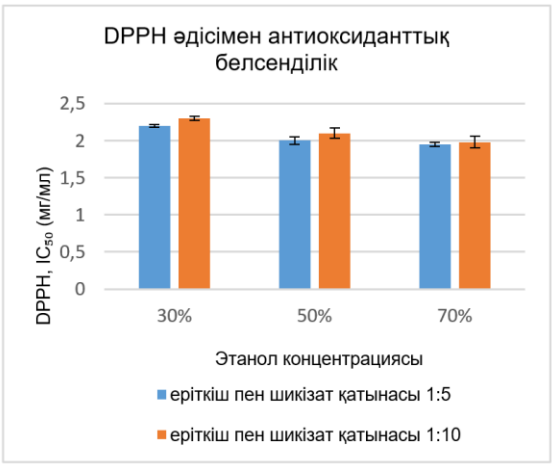
Сурет 2 – Сығындының құрамындағы полифенолдардың мөлшері

Сығынды құрамындағы антиоксиданттық белсенділікті анықтау үшін FRAP әдісі және DPPH әдісі жүргізілді. 3 – суретте FRAP әдісі бойынша алынған үлгілердің мөлшері көрсетілген. FRAP әдісі бойынша жоғары антиоксиданттық белсенділік 70%-дық этанол концентрациясында және 1:5 шикізат пен еріткіш қатынасында анықталды. Бұл үлгіде көрсеткіш 0,180 ± 0,008 mM TE құрайды, яғни 30% – дық этанол концентрациясымен салыстырғанда шамамен 1,6 есе жоғары мән көрсетті. 4 – суретте DPPH әдісі бойынша анықталған антирадикалдық белсенділік нәтижелері IC_{50} (мг/мл) көрсетілген. Төмен IC_{50} мәні 70% -дық этанолдың концентрациясында және 1:5 шикізат пен еріткіш қатынасында анықталып, 1,95 ± 0,03 мг/мл құрады. Этанол концентрациясының артуымен IC_{50} мәні төмендеп, антирадикалдық белсенділік жоғарылағаны байқалды. Екі әдіс бойынша да 70% -дық этанолдың концентрациясында 1:5 шикізат пен еріткіш қатынасында жоғары

антиоксиданттық белсенділік байқалды. FRAP әдісі антиоксиданттардың Fe^{3+} иондарын Fe^{2+} иондарына дейін тотықсыздандыру қабілетін сипаттайды, ал DPPH әдісі бос радикалдарды бейтараптандыру қабілетін бағалайды [12].



Сурет 3 − Сығынды құрамындағы FRAP әдісімен анықталған антиоксиданттық белсенділік мәні



Сурет 4 – Сығынды құрамындағы DPPH әдісімен анықталған антиоксиданттық белсенділік мәні

Қорытынды. 70%-дық этанол зерттелген көрсеткіштер бойынша тиімді экстрагент болды. Құрғақ заттардың ең жоғары шығымы 1:10 қатынасында байқалды және 18,0 ± 0,3% құрады, алайда жалпы полифенолдар мөлшері (3,80 ± 0,58 мг ГҚЭ/г) мен антиоксиданттық белсенділік (FRAP әдісі бойынша 0,180 ± 0,008 mM TE) жоғары мәндерге 1:5 қатынасында анықталды. DPPH әдісі бойынша төмен IC_{50} мәні 1,95 ± 0,03 мг/мл болды, бұл 70%-дық этанолмен 1:5 қатынасында алынған сығындының ең жоғары антирадикалдық белсенділікке ие екенін көрсетті. Өнеркәсіптік қолдану кезінде еріткіш шығынын азайту және жоғары биологиялық белсенділікті қамтамасыз ету мақсатында 70% этанол және 1:5 шикізат пен еріткіш қатынасы оңтайлы технологиялық параметр ретінде ұсынылады.

Әдебиеттер тізімі

1. Облепиха крушиновидная (Hippophae Rhamnoides L.) – Источник биоактивных веществ / А.Б. Хасенова и др. // Вестник Алматинского технологического университета. – 2020. – № 1. – P. 82-88.
2. Ершова И.В. Содержание биологически активных фенольных соединений в плодах облепихи (Hippophaë rhamnoides L.) в условиях юга Западной Сибири / И.В. Ершова // Современное садоводство – Contemporary horticulture. 2025. – № 3. – С. 98-109.
3. Comparative assessment of phytochemical profiles, antioxidant and antiproliferative activities of sea buckthorn (Hippophaë rhamnoides L.) berries / R. Guo et al // Food Chemistry. – 2017. – Vol. 221. – P. 997-1003. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.11.063.
4. Optimization of ultrasound-assisted enzymatic extraction of flavonoids from sea buckthorn pomace (Hippophae rhamnoides L.): chemical composition and biological activity / W. Suo et al // Foods. – 2025. – Vol. 14(10). – P. 1656. https://doi.org/10.3390/foods14101656.
5. ГОСТ Р 51437-99. Соки фруктовые и овощные. Гравиметрический метод определения массовой доли общих сухих веществ по убыли массы при высушивании. – М.: Стандартинформ, 2018.
6. Нилова Л.П. Антиоксидантные комплексы облепихи крушиновидной (Hippophaë rhamnoides L.) северо-запада России / Л.П. Нилова, С.М. Малютенкова // Вестник ВГУИТ (Proceedings of VSUET). – 2021. – Т. 83, № 1. – С. 108-114. https://doi.org/10.20914/2310-1202-2021-1-108-114.
7. Применение ультразвуковой экстракции для выделения флавоноидов из листьев облепихи крушиновидной / Н. Каловава и др. // Биофармацевтический журнал. – 2024. – Т. 16, № 1. – С. 13-19. https://doi.org/10.30906/2073-8099-2024-16-1-13-19.

8. Phenolic compounds, antioxidant activity, antiproliferative activity and bioaccessibility of sea buckthorn (Hippophaë rhamnoides L.) berries as affected by in vitro digestion / R. Guo et al // Food & Function. – 2017. – Vol. 8, № 11. – P. 4229-4240. https://doi.org/10.1039/c7fo00917h.
9. Еремеева Н.Б. Изучение содержания антиоксидантов и их активности в концентрированных экстрактах из ягод клюквы (Vaccinium oxycoccos), облепихи (Hippophae rhamnoides L.), ежевики (Rubus fruticosus), калины (Viburnum opulus L.) и рябины (Sorbus aucuparia L.) / Н.Б. Еремеева, Н.В. Макарова // Химия растительного сырья. – 2021. – № 4. – С. 157-164. https://doi.org/10.14258/jcprm.2021049365.
10. Ultrasound assisted extraction of food and natural products: Mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications / F. Chemat et al // Ultrasonics Sonochemistry. – 2017. – Vol. 34. – P. 540-560. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.06.035.
11. Optimizing the Solvent Selection of the Ultrasound-Assisted Extraction of Sea Buckthorn (Hippophae rhamnoides L.) Pomace: Phenolic Profiles and Antioxidant Activity / D. Wu et al // Foods. – 2024. – Vol. 13, № 3. – Art. 482. https://doi.org/10.3390/foods13030482.
12. Health promoting properties and sensory characteristics of phytochemicals in berries and leaves of sea buckthorn (Hippophaë rhamnoides) / X. Ma et al // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. – 2022. – Vol. 62, № 14. – P. 3798-3816. https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1869921.

References

1. Oblepikha krushinovidnaya (Hippophae Rhamnoides L.) – Istochnik bioaktivnykh veshchestv / A.B. Khasenova i dr. // Vestnik Almatinskogo tekhnologicheskogo universiteta. – 2020. – № 1. – R. 82-88. (In Russian).
2. Ershova I.V. Soderzhanie biologicheski aktivnykh fenol'nykh soedinenii v plodakh oblepikhi (Hippophaë rhamnoides L.) v usloviyakh yuga Zapadnoi Sibiri / I.V. Ershova // Sovremennoe sadovodstvo – Contemporary horticulture. 2025. – № 3. – S. 98-109. (in Russian).
3. Comparative assessment of phytochemical profiles, antioxidant and antiproliferative activities of sea buckthorn (Hippophaë rhamnoides L.) berries / R. Guo et al // Food Chemistry. – 2017. – Vol. 221. – P. 997-1003. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.11.063. (in English).
4. Optimization of ultrasound-assisted enzymatic extraction of flavonoids from sea buckthorn pomace (Hippophae rhamnoides L.): chemical composition and biological activity / W. Suo et al // Foods. – 2025. – Vol. 14(10). – P. 1656. https://doi.org/10.3390/foods14101656. (in English).
5. GOST R 51437-99. Soki fruktovye i ovoshchnye. Gravimetricheskii metod opredeleniya massovoi doli obshchikh sukhikh veshchestv po ubyli massy pri vysushivanii. – M.: Standartinform, 2018. (in Russian).
6. Nilova L.P. Antioksidantnye kompleksy oblepikhi krushinovidnoi (Hippophaë rhamnoides L.) severo-zapada Rossii / L.P. Nilova, S.M. Malyutenkova // Vestnik VGUIT (Proceedings of VSUET). – 2021. – T. 83, № 1. – S. 108-114. https://doi.org/10.20914/2310-1202-2021-1-108-114. (in Russian).
7. Primenenie ul'trazvukovoi ehkstraktsii dlya vydeleniya flavonoidov iz list'ev oblepikhi krushinovidnoi / N. Kalovava i dr. // Biofarmatsevticheskii zhurnal. – 2024. – T. 16, № 1. – S. 13-19. https://doi.org/10.30906/2073-8099-2024-16-1-13-19. (in Russian).
8. Phenolic compounds, antioxidant activity, antiproliferative activity and bioaccessibility of sea buckthorn (Hippophaë rhamnoides L.) berries as affected by in vitro digestion / R. Guo et al // Food & Function. – 2017. – Vol. 8, № 11. – P. 4229-4240. https://doi.org/10.1039/c7fo00917h. (in English).
9. Eremeeva N.B. Izuchenie soderzhaniya antioksidantov i ikh aktivnosti v kontsentrirovannykh ehkstraktakh iz yagod klyukvy (Vaccinium oxycoccos), oblepikhi (Hippophae rhamnoides L.), ezheviki (Rubus fruticosus), kaliny (Viburnum opulus L.) i ryabiny (Sorbus aucuparia L.) / N.B. Eremeeva, N.V. Makarova // Khimiya rastitel'nogo syr'ya. – 2021. – № 4. – S. 157-164. https://doi.org/10.14258/jcprm.2021049365. (in Russian).
10. Ultrasound assisted extraction of food and natural products: Mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications / F. Chemat et al // Ultrasonics Sonochemistry. – 2017. – Vol. 34. – P. 540-560. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.06.035. (in English).
11. Optimizing the Solvent Selection of the Ultrasound-Assisted Extraction of Sea Buckthorn (Hippophae rhamnoides L.) Pomace: Phenolic Profiles and Antioxidant Activity / D. Wu et al // Foods. – 2024. – Vol. 13, № 3. – Art. 482. https://doi.org/10.3390/foods13030482. (in English).

12. Health promoting properties and sensory characteristics of phytochemicals in berries and leaves of sea buckthorn (Hippophaë rhamnoides) / X. Ma et al // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. – 2022. – Vol. 62, № 14. – P. 3798-3816. https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1869921. (in English).

Ж.Д. Аскар, Ш.А. Абжанова, А.У. Байбекова, Н.С. Токен, А.Н. Курманали*
Алматинский технологический университет,
050012, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Толе би, 100
*e-mail: aktoty.kurmanali@mail.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТОДА ВЫДЕЛЕНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ ИЗ ПЛОДОВ ОБЛЕПИХИ С ПОМОЩЬЮ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ЭКСТРАКЦИИ

В статье рассмотрены условия получения экстрактов из дикорастущих плодов облепихи (Hippophae L.), произрастающей в предгорьях Заилийского Алатау (Казахстан), с использованием ультразвуковой экстракции. В зависимости от эколого-географического происхождения и сортовых особенностей ягоды облепихи существенно различаются по биохимическому составу. Дикорастущие и культурные формы облепихи, произрастающие на территории Казахстана, высоко ценятся как богатое и доступное растительное сырьё. Плоды облепихи содержат аскорбиновую кислоту, токоферолы, каротиноиды, флавоноиды, органические кислоты, полиненасыщенные жирные кислоты, дубильные вещества и полисахариды.

В исследовании проведено сравнительное изучение шести образцов, полученных при соотношении сырья и растворителя 1:5 и 1:10, а также при концентрации этанола 30%, 50% и 70%. Выход сухих веществ определяли гравиметрическим методом. Содержание полифенолов в экстрактах определяли спектрофотометрическим методом с реактивом Фолина-Чокальтеу и выражали в эквивалентах галловой кислоты. Антиоксидантная активность экстрактов оценивалась методами FRAP и DPPH. Результаты исследования показали, что эффективность ультразвуковой экстракции существенно зависит от соотношения сырья и растворителя. Установлено, что наивысший выход сухих веществ достигается при соотношении сырья и растворителя 1:10 с использованием 70% этанола, тогда как максимальное содержание полифенолов и антиоксидантная активность достигаются при соотношении сырья и растворителя 1:5 с использованием 70% этанола. Полученные данные могут служить практической основой для разработки промышленных технологий производства натуральных антиоксидантов и функциональных продуктов на основе плодов облепихи.

Ключевые слова: *облепиха, ультразвуковая экстракция, полифенолы, антиоксидантная активность, экстракт.*

Zh.D. Askar, Sh.A. Abzhanova, A.U. Baybekova, N.S. Token, A.N. Kurmanali*
Almaty Technological University,
100 Tole bi Street, 050012, Almaty, Republic of Kazakhstan
*e-mail: aktoty.kurmanali@mail.ru

OPTIMIZATION OF THE METHOD OF ISOLATION OF BIOLOGICALLY ACTIVE SUBSTANCES FROM SEA BUCKTHORN FRUITS BY ULTRASONIC EXTRACTION

The article examines the conditions for obtaining extracts from wild-growing sea buckthorn fruits (Hippophae L.) collected in the foothills of the Ile Alatau (Kazakhstan) using ultrasound-assisted extraction. Depending on their eco-geographical origin and varietal characteristics, sea buckthorn berries significantly differ in their biochemical composition. Wild and cultivated forms of sea buckthorn growing in Kazakhstan are highly valued as a rich and accessible plant raw material. Sea buckthorn fruits contain ascorbic acid, tocopherols, carotenoids, flavonoids, organic acids, polyunsaturated fatty acids, tannins, and polysaccharides.

The study presents a comparative analysis of six samples obtained at solid-to-solvent ratios of 1:5 and 1:10, using ethanol concentrations of 30%, 50%, and 70%. The dry matter yield was determined by the gravimetric method. The total polyphenol content in the extracts was measured spectrophotometrically using the Folin-Ciocalteu reagent and expressed as gallic acid equivalents. The antioxidant activity of the extracts was evaluated using FRAP and DPPH methods.The results showed that the efficiency of ultrasound-assisted extraction is strongly dependent on the solid-to-solvent ratio. The highest dry matter yield was achieved at a 1:10 solid-to-solvent ratio using 70% ethanol, whereas the maximum polyphenol content and antioxidant activity were achieved at a 1:5 solid-to-solvent ratio using 70% ethanol. The obtained data can serve as a practical basis for developing industrial technologies for producing natural antioxidants and functional products based on sea buckthorn fruits.

Key words: *sea buckthorn, ultrasonic extraction, polyphenols, antioxidant activity, extract.*

Авторлар туралы мәліметтер

Жанель Досжанқызы Асқар – магистрант, Алматы технологиялық университеті, «Қолданбалы биотехнология» кафедрасы, Алматы, Қазақстан; e-mail: zhishchanova@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-3266-1486.

Шолпан Аманкелдыкызы Абжанова – техника ғылымдарының кандидаты, профессор, Алматы технологиялық университеті, Қолданбалы биотехнология кафедрасы, Алматы, Қазақстан; e-mail: sholpan-ab@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3209-6855.

Әйгерім Уакитқызы Байбекова – магистр, Алматы технологиялық университеті, Қолданбалы биотехнология кафедрасы, Алматы, Қазақстан; e-mail: aiko_1995kz@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4070-5844.

Нұргүл Сәкенқызы Төкен – 1 курс докторанты, Алматы технологиялық университеті, «Қолданбалы биотехнология» кафедрасы, Алматы, Қазақстан; e-mail: nurgul_token@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-5587-591X.

Ақтоты Нұрданқызы Құрманәлі* – 2 курс докторанты, ассистент, Алматы технологиялық университеті, Қолданбалы биотехнология кафедрасы, Алматы, Қазақстан; e-mail: aktoty.kurmanali@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-8118-1321.

Сведения об авторах

Жанель Досжанкызы Аскар – магистрант, кафедра «Прикладная биотехнология», Алматинский технологический университет, Алматы, Казахстан; e-mail:zhishchanova@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-3266-1486.

Шолпан Аманкелдыкызы Абжанова – кандидат технических наук, профессор кафедры «Прикладная биотехнология», Алматинский технологический университет, Алматы, Казахстан; e-mail:sholpan-ab@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3209-6855.

Айгерим Уакиткызы Байбекова – магистр, кафедра «Прикладная биотехнология», Алматинский технологический университет, Алматы, Казахстан; e-mail: aiko_1995kz@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4070-5844.

Нургуль Сакенкызы Токен – докторант 1 курса, кафедра «Прикладная биотехнология», Алматинский технологический университет, Алматы, Казахстан; e-mail: nurgul_token@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-5587-591X.

Актоты Нурданкызы Курманали* – докторант 2 курса, ассистент кафедры «Прикладная биотехнология», Алматинский технологический университет, Алматы, Казахстан; e-mail: aktoty.kurmanali@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-8118-1321.

Information about the authors

Zhanel Doszhanqyzy Askar – 1st year master's student, Almaty Technological University, Department of Applied Biotechnology, Almaty, Kazakhstan; e-mail: zhishchanova@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-3266-1486.

Sholpan Amankeldikyzy Abzhanova – Candidate of Technical Sciences, Professor, Almaty Technological University, Department of Applied Biotechnology, Almaty, Kazakhstan; e-mail:sholpan-ab@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3209-6855.

Aigerim Uakitkyzy Baibekova – Master's degree, Almaty Technological University, Department of Applied Biotechnology, Almaty, Kazakhstan; e-mail:aiko_1995kz@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4070-5844.

Nurgul Sakenkyzy Token – doctoral student, Almaty Technological University, Department of Applied Biotechnology, Almaty, Kazakhstan; e-mail:nurgul_token@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-5587-591X.

Aktoty Nurdankyzy Kurmanali* – doctoral student, assistant, Almaty Technological University, Department of Applied Biotechnology, Almaty, Kazakhstan; e-mail:aktoty.kurmanali@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-8118-1321.

Редакцияға енуі 02.06.2026
Өңдеуден кейін түсуі 29.06.2026
Жариялауға қабылданды 30.06.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-48

ҒТАХР: 65.01.81

Р.У. Ашакаева*, Г.Т. Жуманова[2], Б.М. Кулуштаева[2], Ж.Т. Букабаева[1], Б.К. Оспанова[1]
[1]Alikhan Bokeikhan University,
071400, Қазақстан Республикасы, Семей қ.,Мәңгілік ел көшесі, 11
[2]Шәкәрім университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ, Глинки көшесі 20 А
*e-mail: ryskulkamara@mail.ru

ШҰЖЫҚ ӨНІМІНІҢ ҚҰРАМЫНДАҒЫ ОРГАНОЛЕПТИКАЛЫҚ, ФИЗИКА-ХИМИЯЛЫҚ, МИКРОБИОЛОГИЯЛЫҚ КӨРСЕТКІШТЕРІН АНЫҚТАУ

Аңдатпа: *Бұл мақалада шұжық өнімдерінің барлық көрсеткіштері, сапасы мен қауіпсіздігін бағалаудың кешенді әдістері қарастырылды. Зерттеу барысында шұжық өнімдерінің органолептикалық қасиеттері, физика-химиялық құрамы және микробиологиялық тұрақтылығы талданды. Сонымен қатар, өндіріс процесіндегі сыни бақылау нүктелерін HACCP жүйесі арқылы тағам қауіпсіздігін қамтамасыз ету.*

Шұжық өнімдері бұл халықтың күнделікті қолданатын тағамдарының бірі сондықтан олардың сапасы мен қауіпсіздігі жоғары талаптарға сәйкес болуы керек. Дайын өнімнің сапасын бағалауда ең алдымен органолептикалық көрсеткіштер маңызды. Оларға: өнімнің сыртқы түрі, түсі, иісі, дәмі және консистенциясы жатады. Шұжық өнімінің сапалы болуына сыртқы сапасы беті таза, қабығы бүтін, түсі біркелкі, өзіне тән иісі мен дәмі дұрыс болуымен қатар, консистенциясы тығыз әрі серпімді болуы өнімнің дұрыс сапалы екенін және жақсы технологиямен дайындалғанын көрсетеді.

Шұжық өнімінің физика-химиялық көрсеткіштерә бқл тағамдық құндылығы мен сақтау тұрақтылығын сипаттайды. Оларға: ылғал мөлшері, ақуыз, май, тұздың массалық үлесі, сондай-ақ pH көрсеткіші жатады. Шұжық өнімдерінде ылғал мөлшерінің жоғары болуы өнімнің тез бұзылуына әкелуі мүмкін сонымен қатар, тұздың белгілі бір деңгейде болуы микробиологиялық тұрақтылықты, ал ақуызжәне май мөлшері негізінен өнімнің энергетикалық құндылығын арттырады.

Тағамнің қауіпсіздігін бағалауда микробиологиялық көрсеткіштері негізгі рол атқарады. Дайын өнімнің құрамында мезофильді аэробты, факультативті анаэробты микроорганизмдер және ішек таяқшалары тобы бактериялары, патогенді микроорганизмдер, сальмонеллалар болмауы керек. Егерде бұл көрсеткіштердің нормадан ауытқуы, өнімнің санитарлық талаптарға сәйкес келмеуі өнімді тұтынуға болмайтынын дәлелдейді. Сондықтан тағам қауіпсіздігін қамтамасыз етуде, HACCP жүйесі жоспарын енгізу, өндірістегі қауіпті факторларды анықтау, бақылау жүргізілуі керек. Шұжық өнімдерінің сапасы мен қауіпсіздігін қамтамасыз етіп, нәтежесінде тұтынушылар денсаулығы қорғалады.

Түйін сөздер: *тағам қауіпсіздігі, ет шикізаты, HACCP, сыни нүктелер, шұжық өнімдері, органолептикалық және микробиологиялық көрсеткіштері.*

Кіріспе

Қазіргі таңда Қазақстан Республикасының агроөнеркәсіптік кешенін дамыту жөніндегі ұлттық жобалар аясында отандық өнімдердің бәсекеге қабілеттілігін арттыру басым бағыт болып табылады. Ет өнімдері, оның ішінде шұжықтар, халықтың күнделікті тұтынатын негізгі тағамдарының бірі. Сондықтан, олардың тағамдық құндылығы мен қауіпсіздігін қамтамасыз ету – өзекті мәселе. Сондықтан осы заманда жоғары сапалы бәсекеге қабілетті шұжық өнімдерін өндіру үшін, азық-түлік қоспаларын пайдаланусыз өнімді өндіруді елестету мүмкін емес, бірақ технологиялық үрдістердің қарқындылығын арттыру арқылы, шұжық түрлерін пайдалану, өнімге деген сұранысты қалыптастыру, кезінде алдымен органолептикалық және физика-химиялық көрсеткіштері маңызды, яғни бұл тұтынушылар үшін жартылай шұжықтың химиялық құрамы мен тағамдық құндылығы екінші орында тұрады [1]. Дайын өнімді 5 баллдық шкала жүйемен шұжық өнімнің жалпы сапасын, шырындылығын, дәмі, иісі түсін бағалау жүргізіліп, ол сенсорлық қасиеттері, түсі, түрі, хош иісі, дәмі және басқа да сипаттарының жиынтығына негізделген.

Органолептикалық бағалау негізінен сапалық әдістерге сыртқы түрі, түсі, консистенциясы, дәмі және иісі негізделген. Шұжық өнімінің органолептикалық көрсеткіштерін

©Р.У. Ашакаева, Г.Т. Жуманова, Б.М. Кулуштаева, Ж.Т.Букабаева, Б.К. Оспанова, 2026

бағалау: дәмі мен иістің ауытқулары немсе өткір иісі болуы мен қосса, өнімде ащы иіс пен бөгде иіс немесе дәмінің өзгеруі оның ішінде қышқыл болуы, тұзды, түрінің өзгеруіне байланысты. Дайын өімнің сыртқы түрінің ерекше көзге көрінетін ақауларына: түсі өзгергендігі, кеуіп немесе бүріскен, серпімділітің болмауы немесе қаттылықтың болуымен, консистенциясындағы ақаулары болуымен сипатталады [2].

Органолептикалық көрсеткіштер өнім сапасын бағалауда маңызды рөл атқарады және бірнеше негізгі төмендегідей параметрлермен сипатталады:

Сыртқы түрі: өнімнің визуалды қабылдануын сипаттайды және оның формасы, бетінің күйі, өлшемдерінің біркелкілігі мен жалпы дизайны арқылы анықталады.

Түсі немес реңі: жарықтың әсерінен қалыптасатын және өнімнің сыртқы көрінісін сипаттайтын маңызды сапа белгісі болып табылады.

Консистенциясы: өнімнің құрылымдық қасиеттерін көрсетеді және тактильді сезім арқылы анықталады. Ол өнімнің тығыздығы, серпімділігі, тұтқырлығы және біртектілігімен сипатталады.

Иісі: иіс сезу рецепторлары арқылы қабылданатын көрсеткіш, оның қарқындылығы өнімнен бөлінетін ұшқыш заттардың мөлшері мен құрамына байланысты.

Дәмі: өнім сапасын бағалауда шешуші көрсеткіштердің бірі, ол тілдегі дәм рецепторларының әсері арқылы анықталады және өнімнің жалпы сапасын сипаттайды.

Бұл параметрлер негізінен органолептикалық көрсеткіштердің жиынтығы өнімнің сапасын кешенді бағалауға мүмкіндік береді [3].

Тағам өнімдерінің сапасы мен қауіпсіздігін қамтамасыз ету тамақ өнеркәсібінің басым бағыттарының бірі болып табылады. Әсіресе ет және ет өнімдері, соның ішінде шұжық өнімдері жоғары биологиялық құндылығымен қатар, микробиологиялық тұрғыдан тәуекелі жоғары өнімдер қатарына жатады. Шұжық өнімдері негізінен ақуызға, майға және экстрактивті заттарға бай болып келеді [4]. Олардың сапасы мен қауіпсіздігі шикізат сапасына, технологиялық өңдеу режимдеріне және сақтау шарттарына тікелей байланысты. Сондықтан өнім сапасын бағалау органолептикалық, физика-химиялық және микробиологиялық көрсеткіштерді кешенді зерттеу арқылы жүзеге асырылады. Шұжық өндірісінде HACCP жүйесін қолдану, ең алдымен шикізатты қабылдаудан бастап, шұжықтың дайын өнімдерін сақтау кезеңіне дейінгі барлық негізгі технологиялық сатыларды бақылауға негізделеді. Барлық технологиялық кезеңдердегі термиялық өңдеу, салқындату және сақтау аралықтарында сыни бақылау нүктелері ерекше маңызға ие. Бұл кезеңдерде белгіленген параметрлердің сақталуы, дайын өнімнің микробиологиялық қауіпсіздігін қамтамасыз етеді[5]. Осыған байланысты шұжық өнімдерінің сапасын органолептикалық, физика-химиялық және микробиологиялық көрсеткіштер арқылы бағалай отырып, HACCP жүйесінің тағам қауіпсіздігін қамтамасыз етудегі тиімділігін негіздеу болып табылады.

Зерттеу әдістері:

Зерттеу нысаны ретінде шұжық өнімдерінің сапасын бағалау, Кеден одағының «Тағам өнімдерінің қауіпсіздігі туралы» техникалық регламентіне сәйкес жүргізілді [6]. Мұнда: органолептикалық әдіс (өнімнің түсі, дәмі, иісі және консистенциясын бағалауға), физика-химиялық әдіс (ылғалдылық, ақуыз, май мөлшерін және қоспалар әсерін анықтауға), микробиологиялық әдіс (патогенді микроорганизмдердің болуын және өнімнің сақтау мерзіміне төзімділігін тексеру) арналған зерттеу әдістері (кесте 1).

Кесте 1 – Шұжық өнімдерін зерттеу бағытттары

Зерттеу бағыты	Анықталатын көрсеткіштері	Қолданылған әдістері
Органолептикалық	Сыртқы түрі, түсі, иісі, дәмі, консистенциясы	Сарапшылар тобының 5 балдық шкаласы
Физика-химиялық	Ылғал мөлшері	Кептіру әдісі
	Ақуыз мөлшері	Кьельдаль әдісі
	Май мөлшері	Сокслет әдісі (экстракциялау)
	Ас тұзы	Титриметриялық әдіс
	pH көрсеткіші	Потенциометриялық әдіс (pH-метр)
Микробиологиялық	МАФАнМ саны	ГОСТ 10444.15-94
	Ішек таяқшалары (БГКП)	ГОСТ31747-2012
	Патогенді микроорганизмдер	Стандартты қоректік орталарда өсіру

Зерттеу нәтижелері:

Шұжық өнімдерінің зерттеу нәтижелерін салыстырғанда ГОСТ 9959-2015 стандартынның талаптарындағы көрсеткіштердің маңызы, олардың нормативтік және техникалық құжаттама талаптарына сәйкестігін көрсетті.

Органолептикалық көрсеткіштерін талдау бұл дайын өнімнің сапасына баға беру әдісі ретінде артықшылығы тез және бір уақытта өнімнің органолептикалық қасиеттерінің кешені дәмі, иісі, түсі, шырындылығын көрсету мүмкіндігі болып табылады[7].

Зерттелеген жартылай ысталған шұжықтың органолептикалық көрсеткіштерді толықтыру үшін нәтижелерді кешенді көрсеткіштердің жиынтығынан органолептикалық көрсеткіштерді 5 баллдық шкаламен қарастыра отырып, сараптау нәтижелері бойынша жоғары көрсеткішке ие болды (кесте 2).

Кесте 2 – Дайын өнімнің физика-химиялық көрсеткіштері

Физика-химиялық көрсеткіштері	Дайын өнім
Ылғалдылығы,%	58,80
Ақуыздың массалық үлесі,%	22,90
Майлылығы,%	17,40
Күлділігі,%	0,90
pH	5,57

Дайын өнімнің микробиологиялық көрсеткіштерін анықтау кезінде тағамдық улану, жұқпалы ауруларға шалдығу, микробиологиялық қауіптің негізгі көздерін тудыратын бактериялар, вирустар болып келеді. Қауіпсіз шұжық өнімдерін өндіру, кез келген өнеркәсіптері үшін басты талап болып табылады.

Шұжық өнімдері жылдам микробиологиялық бұзылуға жақын, тағамдық улану мен қауіпті екенін ескере отырып қауіпсіз сапалы өнім алуды қамтамасыз ету. Ол үшін микробиологиялық талаптар мен тағам қауіпсізідігі шарты қатаң сақталуы тиіс. Шұжық өнімінің микробиологиялық көрсеткіштері 3-кестеде келтірілген.

Кесте 3 – Дайын шұжықтың микробиологиялық көрсеткіштері

Микробиологиялық көрсеткіштер атаулары	Зерттеу әдісінің ГОСТ	Зерттеу нәтижелері	Нормалық көрсеткіштері
МАжФАнМ КОЕ/г	ГОСТ 10444.15-94	$1*10^5$ КОЕ/г	$1*10^5$ КОЕ/г
Ішек таяқшалар тобының бактериялары (колиформ)	ГОСТ 31747-12	0,0001г анықталмады	0,0001 г рұқсат етілмейді
Патогендік микроорга низмдер, (соның ішінде сальмонеллалар)	ГОСТ 31659-2012	25 г анықталмады	25 г рұқсат етілмейді
L.monocytogenes	ГОСТ 32031-2012	25 г танықталмады	25 г рұқсат етілмейді

НАССР жүйесінің қағидаттарына сүйене отырып, барлық қауіпті факторлардың биологиялық, химиялық, физикалық тізімін жасағаннан кейін, ең болмағанда бастапқы өндіруден, өңдеу айналымынан бастап тұтыну нүктесіне дейін, әр сатысында көрінуі мүмкін болатын, қауіпті факторларды анықтау керек [8]. Өндіру үшін, табиғаты бойынша азық-түлік қауіпсіздігіне айтарлықтай әсер ететін, қауіпті факторды қарастырады (4-кесте).

Шұжық өнімдерін өндіру технологияларына байланысты сыни бақылау нүктелер,і НАССР жүйесінің екінші қағидасына сәйкес,дайын өнімнің сыни бақылау нүктелеріне НАССР жүйесінің жоспары құрылды [9]. Сондықтан бақылауды жүзеге асырудың қадамы, тағамға төнетін қауіптің алдын алуға, жоюғажәне жол бермеу үшін қажетболып табылады. Шұжық өнімнің қауіпсіздігін қамтамасыз ету үшін сыни бақылау нүктелерінде пайда болған ауытқуларды, болдырмау мақсатында НАССР жүйесінің алтыншы қағидасына сәйкес түзету әрекеттерін жүргізуге болады.

Кесте 4 – Дайын өнімнің сыни бақылау нүктелеріне HACCP жүйесінің жоспары

Сыни бақылау нүктелері	Қауіпті факторлардың көздері	Мониторинг бойынша іс шараларды жүргізу	Түзету әрекеттер	Тексеру шаралары	HACCP жүйесінің жазбалары
СБН-1 Шикізатты қабылдау	Микробиологиялық көрсеткіштері КМАФАнМ; Улы элементтер: қорғасын (Pb), мышьяк (As), кадмий (Cd), сынап (Hg)	Микробиологиялық және тағам қауіпсіздігіне бақылау жүргізу	Ет шикізат тарының сапасын зерттеу кезіндегі зертха налық көрсеткіштерді сақтау	Мерзімді тексеру, тексеру журналдарына тіркеу, құзіреттілігін бақылау	Сапасын бақылау бойынша журналға жазба жүргізу, жауапты маманның растауы
СБН-2 Етті тұздау	Микробиологиялық: КМАФАнМ; Химиялық: улы элементтер, пестицидтер, радионуклид тер	Микробиологиялық және тағам қауіпсіздігіне бақылау жүргізу	Ет шикізаттарының сапасын зерттеу кезіндегі зертханалық көрсеткіштерді сақтау	Мерзімді тексеру, тексеру журналдарына тіркеу, құзіреттілігін бақылау	Сапасын бақылау бойынша журналға жазба жүргізу, Зерттеу нәтижелер,Ішкі аудит нәтижелер, жауапты маманның растауы
СБН-3 Ет турамасын араластыру	Микробиологиялық: КМАФАнМ; Химиялық: улы элементтер, пестицидтер, радионуклид тер	Улы элементтерқорғасын (Pb), мышьяк (As), кадмий (Cd), сынап (Hg); N-нитрозаминдер, бензапрен; Антибиотиктер: левомицитин, тетрациклин топтары, пестицидтер: ДДТ және оның метобалитттері рұқсат етілмейді	Ет турамасының сапасын зерттеу кезіндегі зертханалық көрсеткіштерді сақтау	Мерзімді тексеру, тексеру журнал дарына тіркеу, құзірет тілігін бақылау	Сапасын бақылау бойынша журналға жазба жүргізу, Зерттеу нәтижелер,Ішкі аудит нәтижелер,жауапты маманның растауы
СБН-4 Сақтау кезеңі	Сақтау мерзімі, уақыты мен сақтау темпера турасының өзгерісі	Температураның сақталмауы тағам сапасының бұзылуы патогенді микрофлораның дамуы	Температураны үнемі бақылау	Мерзімді тексеру, тексеру журнал дарына тіркеу, құзіреттілігін бақылау	Сапасын бақылау бойынша журналға жазба жүргізу, Зерттеу нәтижелер,Ішкі аудит нәтижелер, жауапты маманның растауы

Ғылыми нәтижелерді сараптау

Ғылыми зерттеу барысында анықталған негізгі көрсеткіштер бойынша құрылымдық ерекшеліктері ақуызды эмульсияларды қолдану шұжықтың тығыздығы мен шырындылығын сақтауға мүмкіндік береді. Шұжық өндіру кезіндегі қауіпсіздіктісақтау, өндіріс циклiндегі қауіпті факторларды талдау бойынша HACCP жүйесінің жоспарын құру арқылы микробиологиялық ластануын төмендететінін дәлелдеді. Дайын өнімнің сапасын бақылау шұжық өнімдеріне қойылатын талаптарды қатаң сақтаумен бірге, соңғы өнімнің мемлекеттік стандарттарға сәйкестігін қамтамасыз етеді [10].

Қорытынды

Шұжық өнімдерінің сапасын кешенді бағалау, негізінен органолептикалық сипаттамаларын анықтаумен шектелмейді, тағамдық құндылығын арттыру мүмкіндіктерін де айқындайды. Дайын өнімнің физика-химиялық және микробиологиялық көрсеткіштерін жүйелі талдау, өнімнің сапа мен қауіпсіздікті қамтамасыз етудің ғылыми негізін қалыптастырады.

Қазіргі заманғы технологияларды өндіріске енгізу кезіндее өндірістік үдерістердегі сыни бақылау нүктелері мен HACCP жүйесін тұрақты пайдалану, өнімнің қауіпсіздігін арттырып қана қоймай, оның бәсекеге қабілеттілігін күшейтеді. Осы аталған тәсілдерді тиімді

қолдану отандық ет өңдеу өнеркәсібінде соның ішінде шұжық өнімдерді өңдеу тұрақты дамуға және халықты сапалы әрі қауіпсіз тағам өнімдерімен қамтамасыз етуге ықпал етеді.

Әдебиеттер тізімі

1. ҚР Үкіметінің Қаулысы ҚР-ның агроөнеркәсіптік кешенін дамыту жөніндегі 2021-2025 жылдарға арналған, ұлттық жобаны бекіту туралы: 2021 ж., № 732. https://adilet.zan.kz/kaz/docs/P2100000732.
2. Амирханов К.Ж. Современное состояние и перспективы развития производства мясных продуктов функционального назначения: монография / К.Ж. Амирханов, Б.К. Асенова, А.Н. Нургазизова. – Алматы, 2013. – 127 с.
3. Жаринов А.И. Белково-коллагеновые эмульсии: особенности состава, способов получения и использования / А.И. Жаринов, Н.А. Соколова. – Москва, 2007. – 39 с.
4. Ашакаева Р.У. Требования к качеству и безопасности сырья для колбасных изделий / Р.У. Ашакаева, Б.К. Асенова, Б.М. Кулуштаева // Интеграция образования науки и производства: сб. матер. междунар. науч.-практ. конф. – Семей, 2020.
5. Лаухина Г.Г. Внедрение технического регламента Таможенного союза «О безопасности пищевой продукции» / Г.Г. Лаухина // Наука. – 2016. – № 3(66). – 230 с.
6. Тамақ өнімдерінің қауіпсіздік өауіп қатерін бағалау/ Р.У. Ужанова және т.б. – Алматы: Лантар Трейд ЖШС, 2021. – 310 б.
7. FOOD SAFETY AND QUALITY OF MEAT RAW MATERIALS / R.U. Ashakayeva et al // VII Международная конференция «Наука и общество – методика и проблемы практического применения». Канада, г. Ванкувер, 15 февраля 2019
8. A Pumpkin-Based Emulsion Gel as a Texture Improvement of Mixed Horsemeat Semi-Smoked Sausages / R. Ashakayeva et al // Foods. – 2022. – № 11(23). – P. 3886. https://doi.org/10.3390/foods11233886.
9. Шұжық өнімдерінің тағамдық құндылығы / Р.У. Ашакаева и др. // Семей Вестник журналы. – 2020. – № 4(92).
10. A risk and hazard analysis model for the production process of a new meat product blended with germinated green buckwheat and food safety awareness / Zh. Atambayeva et al // Frontiers in Nutrition (Switzerland), section Nutrition and Food Science Technolody. – 22 June, 2022.

References

1. KR Ykimetinin Kaulysy KR-nyn agroonerkasiptik keshenin damytu zhonindegi 2021-2025 zhyldarga arnalgan, ulttyk zhobany bekitu turaly: 2021 zh., № 732. https://adilet.zan.kz/kaz/docs/P2100000732. (in Kazakh).
2. Amirkhanov K.Zh. Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya proizvodstva myasnykh produktov funktsional'nogo naznacheniya: monografiya / K.Zh. Amirkhanov, B.K. Asenova, A.N. Nurgazizova. – Almaty, 2013. – 127 s. (in Russian).
3. Zharinov A.I. Belkovo-kollagenovye ehmul'sii: osobennosti sostava, sposobov polucheniya i ispol'zovaniya / A.I. Zharinov, N.A. Sokolova. – Moskva, 2007. – 39 s. (in Russian).
4. Ashakaeva R.U. Trebovaniya k kachestvu i bezopasnosti syr'ya dlya kolbasnykh izdelii / R.U. Ashakaeva, B.K. Asenova, B.M. Kulushtaeva // Integratsiya obrazovaniya nauki i proizvodstva: sb. mater. mezhdunar. nauch.-prakt. konf. – Semei, 2020. (in Russian).
5. Laukhina G.G. Vnedrenie tekhnicheskogo reglamenta Tamozhennogo soyuza «O bezopasnosti pishchevoi produktsii» / G.G. Laukhina // Nauka. – 2016. – № 3(66). – 230 s. (in Russian).
6. Tamak onimderinin kauipsizdik oauip katerin bagalau/ R.U. Uzhanova zhane t.b. – Almaty: Lantar Treid ZHSHS, 2021. – 310 b. (in Kazakh).
7. FOOD SAFETY AND QUALITY OF MEAT RAW MATERIALS / R.U. Ashakayeva et al // VII Mezhdunarodnaya konferentsiya «Nauka i obshchestvo – metodika i problemy prakticheskogo primeneniya». Kanada, g. Vankuver, 15 fevralya 2019 (in English).
8. A Pumpkin-Based Emulsion Gel as a Texture Improvement of Mixed Horsemeat Semi-Smoked Sausages / R. Ashakayeva et al // Foods. – 2022. – № 11(23). – R. 3886. https://doi.org/10.3390/foods11233886. (in English).
9. Shuzhyk onimderinin tagamdyk kundylygy / R.U. Ashakaeva i dr. // Semei Vestnik zhurnaly. – 2020. – № 4(92). (in Kazakh).

10. A risk and hazard analysis model for the production process of a new meat product blended with germinated green buckwheat and food safety awareness / Zh. Atambayeva et al // Frontiers in Nutrition (Switzerland), section Nutrition and Food Science Technolody. – 22 June, 2022. (in English).

Р.У. Ашакаева[1*], Г.Т. Жуманова[2], Б.М. Кулуштаева[2], Ж.Т. Букабаева[1], Б.К. Оспанова[1]
[1]Alikhan Bokeikhan University, 071400, Республика Казахстан, г.Семей, ул.Мәңгілік елі, 11
[2]Шәкәрім университет, 071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул.Глинки 20 А
[*]e-mail: ryskulkamara@mail.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОРГАНОЛЕПТИЧЕСКИХ, ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ И МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КОЛБАСНЫХ ИЗДЕЛИЙ

В данной статье рассмотрены все показатели качества колбасных изделий, а также комплексные методы оценки их качества и безопасности. В ходе исследования были проанализированы органолептические свойства, физико-химический состав и микробиологическая устойчивость колбасных изделий. Кроме того, обеспечение безопасности пищевой продукции рассматривается через внедрение системы HACCP с определением критических контрольных точек на всех этапах производства.

Колбасные изделия являются одним из наиболее широко потребляемых продуктов питания, поэтому их качество и безопасность должны соответствовать высоким требованиям. При оценке качества готовой продукции в первую очередь учитываются органолептические показатели, к которым относятся внешний вид, цвет, запах, вкус и консистенция. Качественный продукт характеризуется чистой поверхностью, целостной оболочкой, равномерной окраской, характерным запахом и вкусом, а также плотной и упругой консистенцией, что свидетельствует о правильной технологии производства.

Физико-химические показатели колбасных изделий характеризуют их пищевую ценность и устойчивость при хранении. К ним относятся массовая доля влаги, белка, жира, соли, а также показатель pH. Повышенное содержание влаги может способствовать быстрой порче продукта, в то время как оптимальное содержание соли обеспечивает микробиологическую стабильность, а белки и жиры определяют энергетическую ценность продукта.

При оценке безопасности пищевой продукции ключевую роль играют микробиологические показатели. В готовой продукции не допускается наличие мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов, бактерий группы кишечной палочки, патогенных микроорганизмов, включая сальмонеллы. Отклонение от установленных норм свидетельствует о несоответствии санитарным требованиям и делает продукт непригодным к употреблению.

Таким образом, внедрение системы HACCP, выявление опасных факторов и организация постоянного контроля на всех этапах производства позволяют обеспечить высокое качество и безопасность колбасных изделий, что в конечном итоге способствует защите здоровья потребителей.

Ключевые слова: *пищевая безопасность, мясное сырье, HACCP, критические контрольные точки, колбасные изделия, органолептические и микробиологические показатели.*

R. Ashakayeva[1*], G. Zhumanova[2], B. Kulushtayeva[2], Zn Bukabayeva[1], B. Ospanova[1]
[1]Alikhan Bokeikhan University, Kazakhstan, 071411, Semey, st. Mangilik-el,11
[2]Shakarim University, 071412, Republic of Kazakhstan, Semey, 20 A Glinka Street
[*]e-mail: ryskulkamara@mail.ru

DETERMINATION OF ORGANOLEPTIC, PHYSICOCHEMICAL, AND MICROBIOLOGICAL INDICATORS OF SAUSAGE PRODUCTS

This article considers all quality indicators of sausage products and comprehensive methods for assessing their quality and safety. The study analyzed the organoleptic properties, physicochemical composition, and microbiological stability of sausage products. In addition, food safety assurance is addressed through the implementation of the HACCP system by identifying critical control points throughout the production process.

Sausage products are among the most commonly consumed foods; therefore, their quality and safety must meet high standards. In evaluating the quality of finished products, organoleptic indicators are of primary importance. These include appearance, color, odor, taste, and texture. A high-quality product is characterized by a clean surface, intact casing, uniform color, characteristic odor and taste, and a firm, elastic consistency, indicating proper production technology.

Physicochemical indicators of sausage products characterize their nutritional value and storage stability. These include moisture content, protein, fat, salt mass fraction, and pH value. A high moisture content may lead to rapid spoilage of the product, while an optimal level of salt ensures microbiological stability, and protein and fat content determine the energy value of the product.

Microbiological indicators play a key role in food safety assessment. Finished products must not contain mesophilic aerobic and facultative anaerobic microorganisms, coliform bacteria, pathogenic microorganisms, including Salmonella. Deviations from established standards indicate non-compliance with sanitary requirements and render the product unsuitable for consumption.

Thus, the implementation of the HACCP system, identification of hazards, and continuous monitoring at all stages of production ensure the quality and safety of sausage products and ultimately protect consumer health.

Key words: *food safety, meat raw materials, HACCP, critical control points, sausage products, organoleptic and microbiological indicators.*

Авторлар туралы мәліметтер

Рысгуль Улыбаевна Ашакаева* – Alikhan Bokeikhan University, Қазақстан; e-mail: ryskulkamara@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8501-0600.

Гульнара Токеновна Жуманова – PhD, қауымдастырылған профессор м.а., Шәкәрім университеті, Семей, Қазақстан; e-mail: g-7290@mail.ru. ORCID:https://orcid.org/0000-0003-1785-2739.

Ботакоз Манарбековна Кулуштаева – Шәкәрім университеті, Қазақстан; e-mail: kulushtaeva_89@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0067-9872.

Жанылхан Тусупжановна Букабаева – Alikhan Bokeikhan University, Қазақстан; e-mail: zhanilxan79@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1461-5407.

Балжан Канатгельдинова Оспанова – Alikhan Bokeikhan University, Қазақстан; e-mail: ospanova93-93@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1237-2413.

Information about the authors

Rysgul Ashakayeva* – Alikhan Bokeikhan University, Kazakhstan, Semey; e-mail: ryskulkamara@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8501-0600.

Gulnara Zhumanova – PhD, Acting Associate Professor, Shakarim University, Kazakhstan; e-mail: g-7290@mail.ru. ORCID:https://orcid.org/0000-0003-1785-2739.

Botakoz Kulushtayeva – PhD, Acting Associate Professor, Shakarim University, Kazakhstan; e-mail:kulushtaeva_89@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0067-9872.

Znanylkhan Bukabayeva – Alikhan Bokeikhan University, Kazakhstan, Semey; e-mail: zhanilxan79@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1461-5407.

Balzhan Ospanova – Alikhan Bokeikhan University, Kazakhstan, Semey; e-mail: ospanova93-93@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1237-2413.

Сведения об авторах

Рысгуль Улыбаевна Ашакаева* – Alikhan Bokeikhan University, Казахстан; e-mail: ryskulkamara@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8501-0600.

Жуманова Гульнара Токеновна – PhD, и.о. ассоциированного профессора, Шәкәрім университет, Семей, Казахстан; e-mail: g-7290@mail.ru. ORCID: https: // orcid.org/0000-0003-1785-2739.

Кулуштаева Ботакоз Манарбековна – Шәкәрім университет, Казахстан; e-mail: kulushtaeva_89@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0067-9872.

Букабаева Жанылхан Тусупжановна – Alikhan Bokeikhan University, Казахстан; e-mail: zhanilxan79@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1461-5407.

Балжан Канатгельдинова Оспанова – Alikhan Bokeikhan University, Казахстан; e-mail: ospanova93-93@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1237-2413.

Редакцияға енуі 01.06.2026
Өңдеуден кейін түсуі 04.07.2026
Жариялауға қабылданды 17.08 .2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-49

BY 4.0
Check for updates

IRSTI: 87.15.11

A.A. Ramazanova[1]*, S.A. Saparbayeva[1], G.I.Yernazarova[2], S.K. Kabdrakhmanova[3], Kh.R. Aisakulova[3]

[1]Kazakh National Women's Teacher Training University,
050000, Republic of Kazakhstan, Almaty, str. Gogolya 114/1.
[2]Farabi University, 050040, Republic of Kazakhstan, Almaty, str., Al-Farabi Avenue 71.
[3]Satbayev University, 050013, Republic of Kazakhstan, Almaty, str., Satpayev 22
*e-mail: aliya.ramazanova01@mail.ru

THE ROLE OF *PSEUDOMONAS* BACTERIA IN THE BIOREMEDIATION OF PESTICIDE-CONTAMINATED ENVIRONMENTS: A LITERATURE REVIEW

Abstract: *Currently, the spread of pesticides in the agro-industrial complex poses a serious threat to the stability of ecosystems, soil quality and human health. In this regard, there is growing interest in biological recovery technologies as an effective way to address this global environmental challenge. In this direction, the bacteria of the genus Pseudomonas attract special scientific attention, possessing high metabolic activity and the ability to break down synthetic chemicals. This literature review provides a bibliometrical and content analysis of the latest scientific research on the role of Pseudomonas bacteria in the bio-recovery of environments contaminated with pesticides. According to research, the number of scientific publications on this topic has been growing steadily in recent years. India and China stand out as countries that are actively pursuing research in this direction. Most scientific work is concentrated in the fields of ecology, microbiology and biochemistry. As part of this study, using the Prisma methodology, a selection of scientific publications from the Scopus database was made for the period 2010-2026. The search for articles in the Scopus database was carried out using keywords «pesticide stress» and «pseudomonas». The results of the search by keywords selected 91 articles, and in the selection were considered 20 most significant. Only referenced articles published in English were included in the analysis. Studies show that Pseudomonas bacteria are actively involved in pesticide degradation, reducing oxidative stress and restoring contaminated soil microflora. Pseudomonas bacteria have been widely studied in terms of nitrogen fixation, the release of axins, plant growth stimulation by formation of phytohormones, destruction of phyto-pathogens, and the production of antibiotics. Although the effects of bacteria on abiotic stress (drought, salination) are often discussed, data on their ability to relieve pesticide stress is still missing. Their use to clean up soil and aquatic ecosystems contaminated by pesticides is one of the effective strategies for sustainable environmental management.*

Key words: *Pseudomonas bacteria, abiotic stress, pesticide, bio-medicine, VOSviewer, Bibliometrix.*

Introduction

Pesticides are used in agriculture to protect plants from pests, infectious diseases and weeds. However, their overuse pollutes the soil and the ecosystem around plant roots. This affects the life and function of natural microorganisms. Pesticides and other toxic substances remain in the soil for a long time, causing stress to plants. They alter plant metabolism, enzymatic activity and the structure of cell membranes. Environmentally friendly cleaning of pesticide-contaminated environments is a pressing issue. Therefore, bioremediation is an important area. The use of bacteria to enrich plants with minerals and increase their resistance to abiotic stress is one effective method.

Recent studies show that microorganisms have a high capacity to adapt to adverse conditions. This allows them to be used as an effective means of cleaning up pollution. For example, it has been found that the use of bacteria of the genus *Pseudomonas, Bacillus, Azotobacter* reduces conditions of abiotic stress. Microorganisms can regulate plant growth and their protective mechanisms. This is also important in conditions of pesticide contamination. Bacteria of the genus *Pseudomonas* arouse particular interest in biorecovery due to their high metabolic flexibility, active growth in the root zone and ability to adapt to toxic substances.

Modern biotechnology is opening up new opportunities to improve the microbes that can break down pollutants. This is especially true for bacteria of the genus *Pseudomonas*, as their genomic and metabolic flexibility allows them to reinforce specific degradation pathways, increase resistance

©A.A. Ramazanova, S.A. Saparbayeva, G.I.Yernazarova, S.K. Kabdrakhmanova, Kh.R. Aisakulova, 2026

to pesticides, and enhance the efficiency of bio-recovery. However, the application of these technologies raises issues such as environmental safety, genetic stability and efficacy under specific conditions.

Studies show that the ability of microorganisms to adapt to stress, interact with plants, exhibit resistance to biocides, and decontaminate is the scientific basis of biorecovery. In this context, bacteria of the genus *Pseudomonas* are considered as promising biological agents for restoring environments contaminated by pesticides. Their high catabolic activity, diverse enzyme systems, ability to withstand pesticide stress, and adaptation in the radiosphere make these bacteria an important research object in environmental biotechnology.

The aim of this literature review is to analyze the role of *Pseudomonas* bacteria in the bio-medicine of environments contaminated with pesticides, based on modern scientific literature. The article discusses mechanisms of adaptation of microorganisms to pesticide stress, the link between resistance to biocides and detoxification, the ecological significance of microbial inoculation, as well as the possibilities and limitations of the use of *Pseudomonas* bacteria in biomedical technologies. Such an analysis will serve as a theoretical basis for developing environmentally sound, efficient and sustainable biotechnological techniques aimed at reducing pesticide pollution. To this end, the following research questions have been raised in the context of Bibliometric analysis:

What scientific research is available on the bio-therapeutic potential of *Pseudomonas* bacteria in environments contaminated with pesticides?

How do micro-organisms adapt at the physiological and biochemical levels to pesticide stress?

What is the capacity of *Pseudomonas* bacteria to degrade pesticides and the environmental significance of bioremediation?

To answer these questions, a literature review was conducted on articles published in the scientific databases *Scopus, Google Scholar* and *ResearchGate* for the period from 2010 to 2026. The articles collected were selected using *PRISMA* methodology. The ability of *Pseudomonas* bacteria to break down, their adaptation to adverse conditions and their application in biotechnology were considered.

Biohealth of polluted environments is one of the important areas of modern environmental biotechnology. The use of *Pseudomonas* bacteria in this process not only accelerates the degradation of toxic substances in the environment, but also contributes to restoring ecosystem resilience by maintaining a microbial balance. The high metabolic flexibility and resistance of these bacteria to xenobiotics make them promising biological cleaners in bio-recovery technologies. Therefore, scientific substantiation of the role of *Pseudomonas* bacteria in the bio-recovery of pesticide-contaminated environments and their ecological potential is an urgent scientific task.

Environmental challenges of pesticide pollution

In agriculture, pesticides are widely used to increase crop yields and control pests. However, their negative environmental impact is a serious problem. The accumulation of pesticides in soil, water, and air poses a significant threat to ecosystem balance, biodiversity, and human health.

Studies in environmental science have shown that pesticides are ubiquitous and contaminate soil composition. According to research by H. M. Tan and her colleagues, 64% of the world's agricultural land is subject to pesticide contamination. Pesticide residues exceeded permissible levels by approximately 24.5 million square kilometres of agricultural land. Researchers have studied biodiversity disruption and pollution of watersheds in regions of South Africa, China, India, Australia, and Argentina [1].

The study of scientists under D.D. Snow, devoted to the river Syrdarya, revealed the presence of residues of both modern and previously used pesticides in water systems of Kazakhstan. The authors found high concentrations of organochlorine pesticides such as gamma-HCH (lindane), DDE and dieldrin. Particularly high levels of gamma-HCH, in the range of 0.014-0.24 ug/l, have been estimated to be among the highest among rivers worldwide. According to scientists, these pollutants pose a long-term environmental threat to aquatic organisms. The source of pollution can be both past illegal uses and historical pollution spread through melting ice [2].

Research by Anirudha Sarker and his colleagues has explored the pesticide content in soil more deeply. According to their data, only about 5% of the pesticides used have effective effects on pests. The rest accumulate in soil or become toxic substances. In particular, organochlorine pesticides degrade very slowly and therefore persist for a long time as persistent organic pollutants. For example, dichlorodiphenyl dichloride and its decay products remain in soil and water systems for decades even after prohibition, indicating the complexity of the environmental problem [3].

The airborne distribution of pesticides is also a serious problem. According to researchers led by Tirasant Bunupar, around 2.6 million tons of active pesticides are used worldwide each year, with a significant proportion of these going into the atmosphere. Studies have shown that between 30 and 50% of pesticides are released into the air when sprayed. This occurs through processes of dispersion in the air and evaporation. Scientists have found that pesticides, spreading over long distances in the air, contaminate not only water and soil, but also the atmosphere. In addition, pesticides in the air can be in a gaseous, liquid, and solid state, posing a risk to human health [4].

The importance of bioremediation in modern biotechnology

Today, bio-medicine is recognized as a worthy alternative to traditional physico-chemical methods of environmental cleaning. Traditional methods, such as incineration, chemical treatment and landfill on polygons, are further damaging to the environment and costly. Biological recovery, by using the natural processes of living organisms, especially micro-organisms, enables ecosystem restoration to be cost-effective, safe, and long-term. The importance of bioremediation is determined by:

– Environmental cleanliness: This method prevents the accumulation of harmful substances in the environment and safely destroys them.

– Economic advantage: Studies show that bio-health care reduces costs by 65-85% compared to traditional methods.

– Applicability: Biomedicine can clean up various pollutants, from heavy metals to petroleum products and other complex organic pollutants.

The bioremedial potential of Pseudomonas bacteria

Pseudomonas bacteria contribute significantly to clean contaminated soils and water systems. Doolotkelvieva and his colleagues (2015) , Giri and his colleagues (2020) have investigated whether they are related to their metabolic predisposition and unusual catabolic ability to cleave xenobiotics [5-6]. Dhakal and his colleagues (2025) stated that microorganisms can break down the chemical structure of pesticides through enzymatic processes such as oxidation, hydrolysis, and nitridation, turning them into harmless compounds [7]. The pesticide cleavage process is often regulated by plasmid genes and horizontal gene exchange mechanisms, which enhance their resilience to environmental conditions. In addition, *Pseudomonas* strains enhance detoxification processes by activating antioxidant systems in the soil, contributing to restoration of damaged ecological balance [8-9]. Looking at the study by Varghese and his colleagues (2025), this metabolic diversity of microorganisms allows them to use pesticides as a source of carbon and energy [10]. This makes them a sustainable and cost-effective method of bio-recovery. It protects plants from adverse conditions such as salinity and drought. For example, in soil contaminated by salt cadmium (Cd). koreensis and P. when using PGPR bacteria such as stutzeri, the cadmium content in plant grains decreased by 50% and yields increased by 25%.

Methods

The article review focuses on the role of bacteria of the genus *Pseudomonas* in the biorecovery of pesticide-contaminated environments. The study only considered peer-reviewed publications from Scopus, ResearchGate and Google Scholar databases. The data collection was based on predefined search parameters. The selection of articles was made according to the PRISMA structure for the period from 2010 to 2026. The following search algorithm was used:

TITLE-ABS-KEY pesticides stress AND pseudomonas) AND PUBYEAR > 2009 AND PUBYEAR < 2027 AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar")) AND (LIMIT-TO (EXACTKEYWORD, "Pseudomonas Putida") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD, "Pesticide") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD, "Plant Growth") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD, "Bioremediation") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD, "Abiotic Stress") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD, "Pseudomonas Aeruginosa") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD, "Pseudomonas Fluorescens") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD, "Pseudomonas")).

This section discusses the biometric aspects of the study and defines the role of *Pseudomonas* bacteria in the bioremedicine of pesticide-contaminated environments. Then there was a content analysis of the identified studies with a systematic examination of their conceptual foundations, methods of study and main conclusions. This two-stage analysis provides a complete overview of the topic. The selection of articles was made according to the PRISMA structure for the period from 2010 to 2026. The main keywords used were *"pesticides stress"* and *"pseudomonas"*. An analysis of the development of the research area from 2010 to 2026 (see Figure 1) shows an increase in activity. Between 2010 and 2016, an average of 1-3 articles per year were published,

which indicates the stage of methodological development of the topic. Since 2017, there has been an increase in the number of articles indicating the beginning of the application of the method of bioremediation. The period from 2017 to 2020 is a period of growth of the topic, with 4-6 articles per year, and the number of links has increased significantly. Maximum performance was achieved in 2021-2022. The exponential period of the theme covers 2021-2025. There were 200 links in 2021, 300 in 2022,380 in 2023, 540 in 2024, and 600 in 2025. Statistics show that the topic has been very topical in recent years. As a modern global issue, papers on bio-health, environmental protection and climate have high penetration rates in Scopus and WoS. In addition, international links increase the number of citations of publications. As a result, there is growing demand for microorganism biomedicine and the use of biologically safe drugs instead of pesticides. The relevance of research grows with each passing year. The application of bio-health care is important not only in agribusiness, but also in agroeconomics, health care and environmental protection.

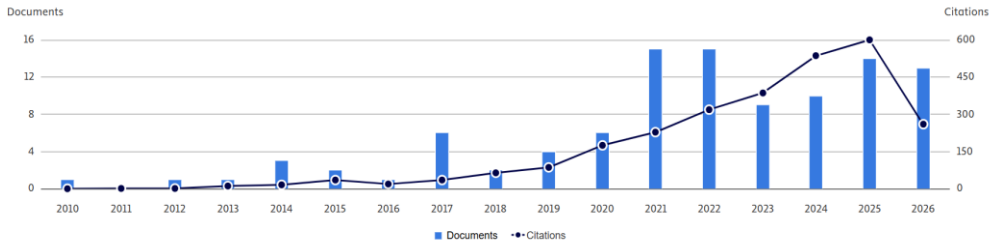


Figure 1 – Dynamics of scientific publications

Figure 2 provides a literature review on the PRISMA methodology. The review covered publications from 2010 to 2026. Articles on the use of *Pseudomonas* bacteria for bioremediation of pesticide-contaminated media were considered. Initially, a total of 173 publications were found as a result of searches in databases and review articles. The keywords "pesticide stress" and "*pseudomonas*" were used. The use of automated filters resulted in the deletion of 61 articles. As a result, 91 studies were selected for further study.

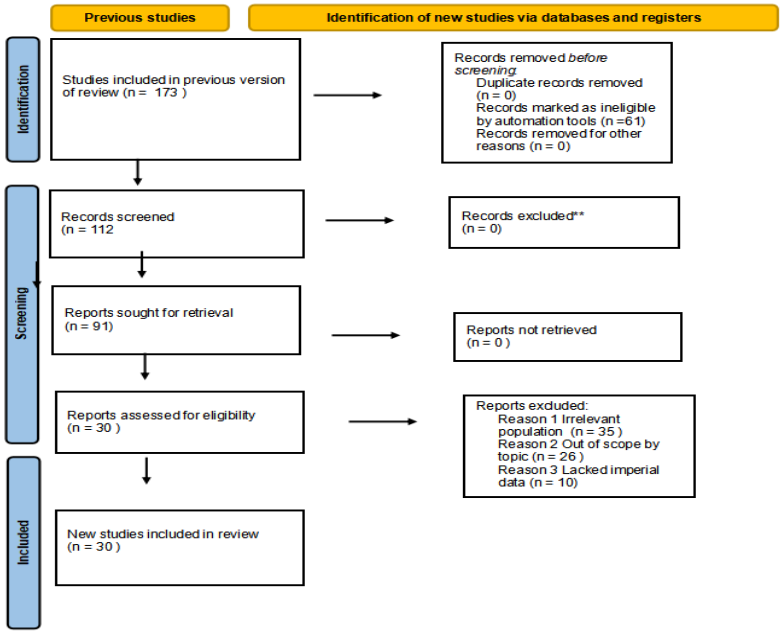


Figure 2 – Diagram of research analysis according to the PRISMA methodology

During the reading of the article annotations, 61 studies were unrelated to the topic. Thus, 30 articles relevant to the topic were selected using this methodology. The PRISMA analysis enhanced the accuracy and credibility of our review.

Results and discussions

Figure 3 shows the distribution of scientific publications by country. The scale of the chart shows that this topic has become a global environmental issue. India leads with approximately 27 publications, highlighting the high relevance of active research in pesticide contamination and bio-medicine in the country. China ranks second with nearly 24 publications, also actively promoting microbiological research aimed at reducing the environmental impact of agricultural chemicals. Rapid industrial development and intensive agriculture in both countries have resulted in the contamination of soil and water with pesticides, heavy metals such as the Ganges, China's industrial areas, and other harmful substances. This question is relevant. About 11 papers with the same number of publications in Egypt and the US. Pakistan and Saudi Arabia show moderate activity with 8-9 articles. Research in Brazil, Iran, Germany, and Italy is relatively scarce. Research in these countries will likely focus on other areas of CRISPR technology or traditional bioremediation methods rather than bioremediation. For example, improving crops, making them more resilient. In countries that strictly control the products of genetic engineering, research is slow.

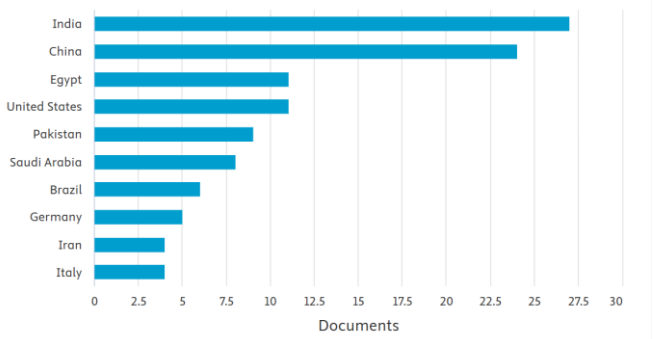


Figure 3 – Distribution of scientific publications by country

The results of the analysis of the diagram show the geographical spread of studies aimed at using the bacterium *Pseudomonas* for environmental bio-medicine contaminated by pesticides. According to statistics, India, China, and Egypt are leaders in the study of pesticide contamination. These countries are experiencing environmental crises due to severe pesticide contamination of soil and water. In India, for example, the widespread use of pesticides often reveals residues of banned compounds from vegetables and soil. In China, high concentrations of obsolete organochlorine pesticides have been found in agricultural areas. Scientists in these countries are actively studying the natural decomposition of *Pseudomonas* bacteria to clean up contaminated environments.

In India, strains of *Pseudomonas putida* and *Pseudomonas fluorescens* have been shown to use organochlorine pesticides as well as organophosphorous compounds as a carbon source. However, some commercial pesticide residue-removal biodrugs are made from the enzymes of these bacteria.

Pseudomonas spp in China. assessment of pesticide distribution and methods of their bio-recovery are intensively studied. In particular, the effectiveness of cleaning pesticide residues in agricultural soils with a strain of *Pseudomonas* is tested.

Along with phytoremediation, Egypt is studying the restoration of contaminated land by introducing into the soil *Pseudomonas* bacteria, which break down pesticides.

In developed European countries such as Germany and Italy, pesticide use is strictly controlled. Therefore, the level of soil contamination is relatively low. Scientific funding is directed toward the development of biological pest control or plant resilience, rather than to bio-recovery. One of the predominant environmental problems in Iran is water scarcity and desertification, so it has been observed that studies have been more focused on resistance to salinity and drought than on pesticides. Figure 4 shows the main areas of industry for microorganism biorecovery. The leading role on this topic is played by environmental articles, the percentage is 17.9%.

This is because bio-health is directly related to nature conservation. The research focuses on cleaning water from soil degradation using bioremediation. In second place - biochemistry and molecular biology with 16.1%. In this direction, the ability of bacteria to cleave pesticides is being investigated. Analyses of bacterial enzymes, genetic features, and processes of metabolism. The

next parts of the share are: microbiology 14.3%, medicine 11.2%, agriculture 10.3%, chemical engineering 8.1%, pharmacology 4.9%. Research has highlighted important areas of cleaning up pesticide-contaminated environments using *Pseudomonas* bacteria. Much of the research is focused on ecology, biochemistry, and microbiology. This shows that bio-medicine has high biotechnological potential for environmental cleaning. Studies not only environmental protection, but also the effects of pesticides on human health. The importance of their biological sterilization is addressed in medical research.

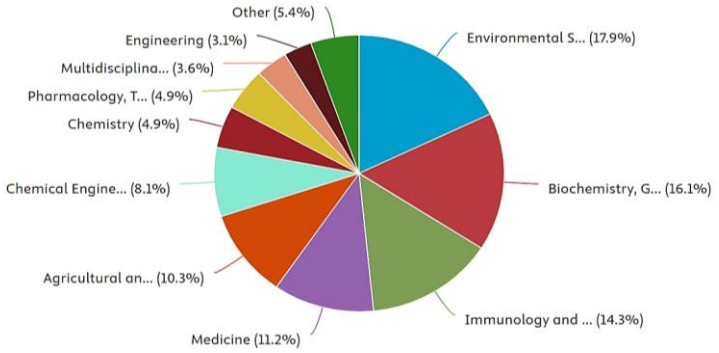


Figure 4 – Directions of research by scientific fields

It is important to understand more deeply how and which genes bacteria cleave pesticides. For example, the bacterium *Pseudomonas* putida can break down malathion and chlorpyrifos up to 98%. The results of these studies are published in traditional scientific journals such as biology, chemistry and toxicology. Research that combines engineering systems, artificial intelligence, and biology is a relatively new field. Such interdisciplinary research requires close collaboration among professionals from different sectors. However, there are a small number of scientists with deep knowledge in biology, chemistry, computer science and engineering, which increases the complexity and cost of such projects.

Engineering aspects of bioremediation, in particular the introduction of genetically modified micro-organisms into natural ecosystems, pose safety and regulatory challenges. So far, no genetically modified micro-organism has been used commercially. In addition, there are still serious technological barriers to adapting the laboratory's achievements to specific field conditions.

Figure 5 presents the most active authors who have studied the use of bacteria in pesticide deposition. Brazilian scientist Pleggi who has thoroughly researched this topic, article 4 is published in the database. In their 2021 study, she and her colleagues sought ways to reduce the harm that pesticides can cause to the environment. Thanks to research by scientists, we can learn more about how herbicides work on bacteria and use the natural protection of these bacteria to clean contaminated sites. He initially studied individual bacteria, and then moved on to study how they interact with other living organisms in nature.

M. Shahid, P. Sharma, S. Singh, U.B. Singh and Y. Zhou have published 3 publications. Indian M. Shahid and Chinese Y. Zhou studied the toxic properties of pesticides and heavy metals, as well as the effects of bacteria on physiological stress in plants [11]. These scientists conduct regular research in the fields of bio-medicine, microbiology and environmental biotechnology. N.A. Agbodjato, O.O. Babalola, R. Bhardwaj and H.J. Chaudhary belong to a group of ten researchers, each with two publications.

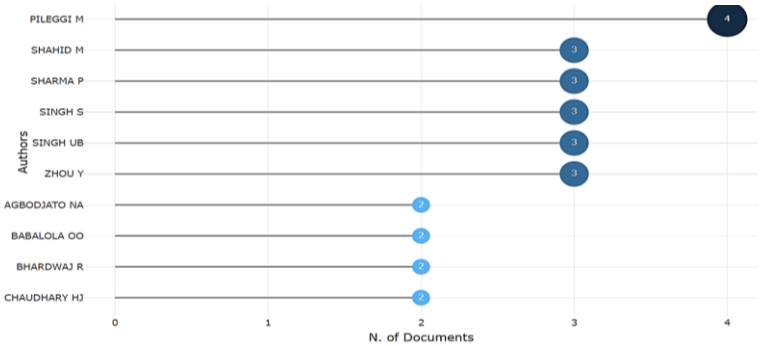


Figure 5 – Number of publications of the most active authors

The authors' Bibliometric analysis found that several research groups have actively contributed to the bioremediation of environments contaminated by pesticides and *Pseudomonas* bacteria. The largest number of publications was received by the Brazilian scientist M. Although he is owned by Pileggi, there has been sustained scientific activity from other researchers. This confirms that this is a relevant area of research developing at the international level. S. Singh defines molecular mechanisms of biorecovery, U.B. Singh investigated the role of root micro-organisms in protecting plants. R. Bhardwaj and his colleagues are studying how to make plants more resistant to heavy metals and pesticides in the environment. Among the growth harmonians, brasssisonosides and the use of polyamines are studied [12].

The keyword cluster, executed by VOSviwer, is shown in Figure 6. The first group is highlighted in green. Considered the keywords *Pseudomonas, bioremediation, bacteria, pesticides.* This cluster describes the decomposition of pesticides by micro-organisms, bacterial activity in soil, exposure to Pseudomonas bacteria. Microbiology and Environmental Science show that it is being studied whether Pseudomonas bacteria can break down pesticides by using them as an energy source.

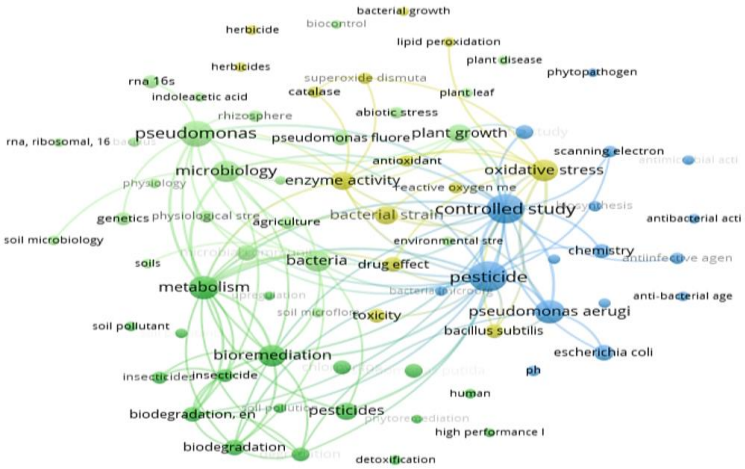


Figure 6 – Keyword cluster

Keywords on pesticide toxicity and antibacterial action in the blue cluster. This direction is aimed at studying the chemical properties of pesticides, their toxicity and antibacterial activity. Bacteria such as pesticides, *Pseudomonas aeruginosa* and *Escherichia coli* are considered to be the main objects of the study. The aim of these studies is to determine the drug action of pesticides and their antimicrobial activity. Studies in toxicology and chemistry can help to understand the impact of pesticides on the microbial community.

The Yellow Cluster studies how plants and bacteria respond to oxidative stress, the function of antioxidant enzymes including catalasm, and the physiological effects of pesticides on plants. Increased levels of active oxygen in cells due to pesticide exposure cause oxidative stress. However, *Pseudomonas* bacteria contribute to the reduction of this stress through catalastic and other enzymes. Jiang, Y., and his bioremedial ability was greatly improved by the introduction of genes degrading pesticides (parathion, 2,4-D) (mpd, tfdABCDEF) into the genome of *Pseudomonas putida* KT2440 in a study conducted by his colleagues [13]. In addition, the use of *Pseudomonas stutzeri* bacteria in combination with silver nanoparticles has optimized the physiological state of maize plants grown in water contaminated by chromium. This synergistic effect stimulates the synthesis of protective metabolites (flavonoids, phenols) in plants and reduces oxidative stress [14].

The map of research data shows that areas of science such as biomedication, microbiology, environmental biotechnology, toxicology, agriculture and plant physiology are closely related. This indicates that the topic is interdisciplinary.

Conclusion

In conclusion, the results of a systematic literature review provide quantitative and qualitative evidence of micro-organisms' effectiveness in reducing pesticide harm. An analysis of publications from 2010 to 2026 based on the *Scopus* database, *Researsh Gate*, showed a clear increase in

research activity. The total number of citations exceeds 600 in 2026, which confirms the scientific significance of this direction. As a result of the bibliometric analysis, it was found that the topic is in leading journals in biochemistry and molecular biology.

In general, the results show that bio-medicine is an effective means of maintaining balance and environmental cleanliness. It is important to implement this method to protect the environment. *Pseudomonas* bacteria feed on harmful coal hydrogen in the environment. Thanks to its unique ability to adapt easily to changes in genes, it has great potential for cleaning up land contaminated with pesticides and heavy metals. In the laboratory, these bacteria can remove more than 70% of heavy metals and up to 98% of pesticides. However, in real natural conditions these indicators fall to 10-25%, limiting their practical application. To address this shortcoming, priorities must be set in the direction of genetic engineering. In the future, *Pseudomonas* strains, enhanced by genetic engineering, adapted to natural conditions, and supplemented by advances from various fields of science, will open new opportunities for sustainable agriculture and environmental restoration.

References

1. Risk of pesticide pollution at the global scale / F.H.M. Tang et al // Nature Geoscience. – 2021. – V.14, № 4. – P. 206-210. https://doi.org/10.1038/s41561-021-00712-5.
2. Legacy and current pesticide residues in Syr Darya, Kazakhstan: Contamination status, seasonal variation and preliminary ecological risk assessment / D.D. Snow et al // Water Research. – 2020. – V. 188. – P. 116141. https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116141.
3. Sarker A. Environmental fate and sustainable management of pesticides in soils: A critical review focusing on sustainable agriculture / A. Sarker, D. Kim, W.-T. Jeong // Sustainability. – 2024. – V. 16, № 23. – P. 10741. https://doi.org/10.3390/su162310741.
4. Airborne pesticides from agricultural practices: A critical review of pathways, influencing factors, and human health implications / T. Boonupara et al // Toxics. – 2023. – V. 11, № 10. – P. 858. https://doi.org/10.3390/toxics11100858.
5. Progress in bioremediation of pesticide residues in the environment / B.S. Giri et al // Environmental Engineering Research. – 2021. – V. 26, № 6. – P. 200446. https://doi.org/10.4491/eer.2020.446.
6. Doolotkelvieva T. Microbial communities in pesticide-contaminated soils in Kyrgyzstan and bioremediation possibilities / T. Doolotkelvieva, M. Konurbaeva, S. Bobusheva // 13th HCH International HCH & Pesticides Forum: Mater. International Conference. – Zaragoza, Spain, 2015. – 3-6 Nov.
7. Dhakal G. Pesticide degradation by soil bacteria: Mechanisms, bioremediation strategies, and implications for sustainable agriculture / G. Dhakal, S.T. Magar, T. Fujino // Environments. – 2025. – V. 12, № 12. – P. 492. https://doi.org/10.3390/environments12120492.
8. Pesticide–microbe interaction: Investigating the response of Pseudomonas spp. to pesticide exposure / M. Kaarunya et al // International Journal for Multidisciplinary Research (IJFMR). – 2025. – V. 7, № 4. https://doi.org/10.36948/ijfmr.2025.v07i04.49515.
9. Tolerance of Pseudomonas strain to the 2,4-D herbicide through a peroxidase system / E.P. de Oliveira et al // PLOS ONE. – 2021. – V. 16, № 12. – P. e0257263. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0257263.
10. Metal-tolerant rhizobacteria alleviate aluminum toxicity in maize via biosorption, antioxidant activation, and ROS reduction / T. Ilyas et al // Journal of Plant Biochemistry and Biotechnology. – 2025. https://doi.org/10.1002/jpb3.70018.
11. Comparing ordinary kriging and inverse distance weighting for soil As pollution in Beijing / P. Qiao et al // Environmental Science and Pollution Research. – 2018. – V. 25, № 7. https://doi.org/10.1007/s11356-018-1552-y.
12. Plant growth regulators: A sustainable approach to combat pesticide toxicity / S. Jan et al // 3 Biotech. – 2020. – V. 10, № 11. – P. 466. https://doi.org/10.1007/s13205-020-02454-4.
13. Metabolic engineering of Pseudomonas putida for simultaneous degradation of chlorpyrifos and 2,4-dichlorophenoxyacetic acid and its application in wastewater treatment / Y. Jiang et al // ACS ES&T Engineering. – 2025. – V. 5. – P. 2958-2966.

14. Tariq S. Physiological effects of silver nanoparticles and Pseudomonas stutzeri on Zea mays L. irrigated with effluent water from industry / S. Tariq, A. Bano, M. Billah // International Journal of Phytoremediation. – 2026. – V. 28, № 3. – P. 412-423. https://doi.org/10.1080/15226514.2025.2568114.

Funding: *This research has been funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. BR24993105).*

А.А. Рамазанова[1]*, С.А.Сапарбаева[1], Г.И. Ерназарова[2], С.К.Кабдрахманова[3], Х.Р. Айсакулова[3]
[1]Қазақ ұлттық қыздар педагогикалық университеті,
050000, Қазақстан Республикасы, Алматы, Гоголя 114/1.
[2]Әл-Фараби атындағы қазақ ұлттық университеті,
050040, Қазақстан Республикасы, Алматы, әл-Фараби даңғылы, 71.
[3]Қ.И. Сәтбаев атындағы қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті,
050013, Қазақстан Республикасы, Алматы, Қ. Сәтбаев көшесі, 22
*e-mail: aliya.ramazanova01@mail.ru

ПЕСТИЦИДТЕРМЕН ЛАСТАНҒАН ОРТАЛАРДЫ БИОРЕМЕДИАЦИЯЛАУДАҒЫ *PSEUDOMONAS* БАКТЕРИЯЛАРЫНЫҢ РӨЛІ: ӘДЕБИ ШОЛУ

Қазіргі уақытта агроөнеркәсіпте пестицидтердің қоршаған ортаға таралуы экожүйелердің тұрақтылығына, топырақ сапасына және адам денсаулығына елеулі қауіп төндіріп отыр. Бұл жаһандық экологиялық мәселені шешуде тиімді әдісі ретінде биоремедиация технологияларына деген қызығушылық артып келеді. Осы бағытта, жоғары метаболикалық белсенділігі мен жасанды химиялық заттарды ыдырату қабілеті бар Pseudomonas туысына жататын бактериялар ерекше ғылыми назар аударады. Бұл әдеби шолуда Pseudomonas бактерияларының пестицидтермен ластанған ортаны биоремедиациялаудағы рөлі туралы соңғы ғылыми зерттеулерге библиометриялық және мазмұндық талдау жасалды. Зерттеулердің нәтижелері бойынша, бұл тақырыптағы ғылыми жарияланымдар саны соңғы жылдары тұрақты өсіп келеді. Әсіресе, Индия мен Қытай бұл бағыттағы зерттеулерді қарқынды дамытып жатқан елдер ретінде айқындалды. Ғылыми еңбектердің басым бөлігі экология ғылымы, микробиология және биохимия салаларында шоғырланған. Осы зерттеу шеңберінде Prisma әдіснамасын қолдана отырып, Scopus дерекқоры негізінде 2010 жылдан 2026 жылға дейінгі кезеңдегі ғылыми жарияланымдарды іріктеу жүргізілді. Scopus деректер базасынан мақалаларды іздеу «pesticide stresss» және «pseudomonas» кілт сөздерін қолдану арқылы жүзеге асырылды. Кілт сөздермен іздеу барысында 91 мақала таңдап алынып, іріктеу кезінде ең маңызды 20 мақала қарастырылды. Талдауға тек ағылшын тілінде жарияланған рецензияланған мақалалар енгізілді.

Зерттеулер Pseudomonas бактерияларының пестицидтерді ыдыратуға, тотығу стрессін азайтуға және ластанған топырақ микрофлорасын қалпына келтіруге белсенді қатысатынын көрсетеді. Pseudomonas бактерияларының азотты фиксациялау, ауксин бөлу, фитогармондар түзу арқылы өсімдіктің өсуін ынталандыру, фитопатогендерді жою, антибиотик түзу қасиеттері көп зерттелген. Бактериялардың абиотикалық стресстерге (құрғақшылық, тұздану) әсері көп айтылғанымен, олардың пестицидтік стрессті жеңілдету қабілеті туралы мәліметтер әлі де аз. Сонымен қатар бактериялардың ферменттік жүйелері мен генетикалық механизмдерінің пестицидтерді түрлендіруде және минералдаудағы рөлі зерттелді. Әдеби деректерді талдау негізінде Pseudomonas бактерияларының экологиялық биотехнологиядағы маңызды биологиялық кешен екендігі расталды. Оларды пестицидтермен ластанған топырақ пен су экожүйелерін тазарту үшін қолдану, қоршаған ортаны тұрақты басқарудың тиімді стратегияларының бірі болып табылады.

Түйін сөздер: *Pseudomonas бактериялары, абиотикалық стресс , пестицид, биоремедиация, VOSviwer, Bibliometrix.*

А.А. Рамазанова[1]*, С.А.Сапарбаева[1], Г.И. Ерназарова[2], С.К.Кабдрахманова[3], Х.Р. Айсакулова[3]
[1]Казахский национальный женский педагогический университет,
050000, Республика Казахстан, Алматы, ул., Гоголя 114/1.
[2]Казахский национальный университет им. аль-Фараби,
050040, Республика Казахстан, Алматы, ул., проспект аль-Фараби 71.
[3]Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, 050013, Казахстан, Алматы, ул., Сатпаев 22
*e-mail: aliya.ramazanova01@mail.ru

РОЛЬ БАКТЕРИЙ РОДА *PSEUDOMONAS* В БИОРЕМЕДИАЦИИ ПЕСТИЦИДНО-ЗАГРЯЗНЁННЫХ СРЕД: ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В настоящее время распространение пестицидов в окружающей среде в агропромышленном комплексе представляет серьёзную угрозу для устойчивости экосистем, качества почвы и здоровья человека. В связи с этим возрастает интерес к технологиям биоремедиации как к эффективному методу решения данной глобальной экологической проблемы. В этом направлении особое научное внимание привлекают бактерии рода Pseudomonas, обладающие высокой метаболической активностью и способностью разлагать синтетические химические вещества. В данном литературном обзоре проведён библиометрический и содержательный анализ последних научных исследований, посвящённых роли бактерий Pseudomonas в биоремедиации сред, загрязнённых пестицидами. По результатам исследований установлено, что количество научных публикаций по данной тематике в последние годы стабильно растёт. Особенно выделяются Индия и Китай как страны, активно развивающие исследования в этом направлении. Основная часть научных работ сосредоточена в областях экологии, микробиологии и биохимии. В рамках данного исследования с использованием методологии PRISMA был проведён отбор научных публикаций из базы данных Scopus за период с 2010 по 2026 год. Поиск статей в базе данных Scopus осуществлялся с использованием ключевых слов «pesticide stress» и «pseudomonas». В результате поиска по ключевым словам было отобрано 91 статья, из которых при дальнейшем отборе были рассмотрены 20 наиболее значимых публикаций. В анализ были включены только рецензируемые статьи, опубликованные на английском языке.

Исследования показывают, что бактерии Pseudomonas активно участвуют в разложении пестицидов, снижении окислительного стресса и восстановлении микрофлоры загрязнённых почв. Свойства бактерий Pseudomonas, связанные с фиксацией азота, выделением ауксинов, стимулированием роста растений посредством синтеза фитогормонов, подавлением фитопатогенов и продуцированием антибиотиков, достаточно хорошо изучены. Несмотря на то, что влияние бактерий на абиотические стрессы (засуха, засоление) широко освещено в научной литературе, сведения об их способности снижать пестицидный стресс всё ещё ограничены. Кроме того, была изучена роль ферментативных систем и генетических механизмов бактерий в трансформации и минерализации пестицидов. На основе анализа литературных данных подтверждено, что бактерии Pseudomonas являются важным биологическим компонентом экологической биотехнологии. Их использование для очистки почвенных и водных экосистем, загрязнённых пестицидами, является одной из эффективных стратегий устойчивого управления окружающей средой.

Ключевые слова: *бактерии Pseudomonas, абиотический стресс, пестицид, биоремедиация, VOSviewer, Bibliometrix.*

Сведения об авторах

Алия Амангельдиевна Рамазанова* – PhD, старший преподаватель кафедры биологии, Казахский национальный женский педагогический университет, г. Алматы, Республика Казахстан; e-mail: aliya.ramazanova01@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4224-966X.

Сандугаш Арманкызы Сапарбаева – магистрант, Казахский национальный женский педагогический университет, г. Алматы, Республика Казахстан; e-mail: saparbayeva.s@qyzpu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-1014-2363.

Гульзира Измухановна Ерназарова – кандидат биологических наук, профессор кафедры биотехнологии, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, Республика Казахстан; e-mail: gulzimadina05@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2319-7040.

Сана Канатбековна Кабдрахманова – руководитель Международного научно-исследовательского центра перспективных функциональных материалов и их композитов (R&D), кафедра химических процессов и промышленной экологии, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. Сатпаева, г. Алматы, Республика Казахстан; e-mail: skabdrakhmanova@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5760-2967.

Хайриниса Рамазановна Айсакулова – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник Международного научно-исследовательского центра перспективных функциональных материалов и их композитов (R&D), кафедра химических процессов и промышленной экологии, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. Сатпаева, г. Алматы, Республика Казахстан; e-mail: hairinissa@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9111-6399.

Авторлар туралы мәліметтер

Алия Амангельдиевна Рамазанова* – PhD, биология кафедрасының аға оқытушысы, Қазақ ұлттық қыздар педагогикалық университеті, Алматы қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: aliya.ramazanova01@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4224-966X.

Сандугаш Арманкызы Сапарбаева – магистрант, Қазақ ұлттық қыздар педагогикалық университеті, Алматы қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: saparbayeva.s@qyzpu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-1014-2363.

Гульзира Измухановна Ерназарова – биология ғылымдарының кандидаты, биотехнология кафедрасының профессоры, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: gulzimadina05@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2319-7040.

Сана Канатбековна Кабдрахманова – Қ.Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, химиялық процестер және өнеркәсіптік экология кафедрасы Озық функционалды материалдар мен олардың композиттері Research & Development халықаралық орталығының жетекшісі, Химиялық процестер және өнеркәсіптік экология кафедрасы, Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті, Алматы қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: skabdrakhmanova@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5760-2967.

Хайриниса Рамазановна Айсакулова – биология ғылымдарының кандидаты, жетекші ғылыми қызметкер, Қ.Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, химиялық процестер және өнеркәсіптік экология кафедрасы Озық функционалды материалдар мен олардың композиттері Research & Development халықаралық орталығы, Химиялық процестер және өнеркәсіптік экология кафедрасы, Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті, Алматы қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: hairinissa@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9111-6399.

Information about the authors

Aliya Amangeldievna Ramazanova* – PhD, Senior Lecturer at the Department of Biology, Kazakh National Women's Teacher Training University, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: aliya.ramazanova01@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4224-966X.

Sandugash Armanqyzy Saparbaeva – Master's student; Kazakh National Women's Teacher Training University, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: saparbayeva.s@qyzpu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-1014-2363.

Gulzira Izmukhanovna Yernazarova – Candidate of Biological Sciences, Professor, Department of Biotechnology; Farabi University, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: gulzimadina05@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2319-7040.

Sana Kanatbekovna Kabdrakhmanova – Head of the International Research & Development (R&D) Center for Advanced Functional Materials and Their Composites, Department of Chemical Processes and Industrial Ecology, K. Satpayev Kazakh National Research Technical University, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: skabdrakhmanova@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5760-2967.

Khairinisa Ramazanovna Aisakulova – Candidate of Biological Sciences, Leading Research Scientist, International Research & Development (R&D) Center for Advanced Functional Materials and Their Composites, Department of Chemical Processes and Industrial Ecology, K. Satpayev Kazakh National Research Technical University, Almaty, Republic of Kazakhstan, e-mail: hairinissa@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9111-6399.

Received 01.06.2026
Revised 15.07.2026
Accepted 18.08.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-50

ҒТАХР: 65.59.15

CC BY 4.0
Check for updates

Г.Е. Сыдықова*, З.Т. Смағұлова[1], К.Ю. Дербышев[2]

[1] «Қазақ қайта өңдеу және тамақ өнеркәсібі ғылыми-зерттеу институты» ЖШС Семей филиалы, 071410, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Байтұрсынов к-сі, 29

[2]Шәкәрім университет, 071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинка к-сі, 20 А,

*e-mail: s.gulzhamal65@mail.ru

ҚАЙТАЛАМА ЕТ ЖӘНЕ БАЛЫҚ ШИКІЗАТЫНАН АҚУЫЗ ГИДРОЛИЗАТЫН (ПЕПТОН) АЛУ ТЕХНОЛОГИЯСЫН ӘЗІРЛЕУ

Аңдатпа: *Мақалада қайталама ақуыз шикізатын қышқылды-ферментативті өңдеу әдісін зерттеу нәтижелері ұсынылған. Жұмыстың мақсаты – биологиялық белсенділігі жоғары ақуыз гидролизі негізінде құрғақ пептон алудың технологиялық режимдері мен параметрлерін әзірлеу. Зерттеу нысаны гидролиз әдістері болды. Жануарлар протеазаларының ферменттік кешенінің гидролиздеу әсерінің ет және балық шикізатының қасиеттерінің өзгеруіне әсері зерттелді.*

©Г.Е. Сыдықова, З.Т. Смағұлова, К.Ю. Дербышев, 2026

Шикізатты ферментативті гидролиздеудің оңтайлы технологиялық режимдері мен параметрлері анықталды. Зерттеулерде жалпы қабылданған химиялық, органолептикалық, биохимиялық әдістер қолданылды. Гидролизаттың физика-химиялық, органолептикалық, биохимиялық көрсеткіштері зерттелді. Ақуыз гидролизатының сапалық көрсеткіштері нормативтік құжаттардың талаптарына сәйкес келетіні анықталды. Зерттеу нәтижелері мал шаруашылығы шикізатын өңдеу барысында ақуызды гидролиздеу үшін қолданылатын болады. Қосалқы өнімдерді өндіріске тарту шикізаттың барлық құнды компоненттерін бөліп алуға мүмкіндік береді, ферменттер кешенімен өңдеу кезінде пайдаланылатын ет және балық шикізатының ақуыз фракцияларының ыдырау дәрежесін арттыру есебінен гидролиздің тереңдігі мен оның тиімділігін арттыруды қамтамасыз етеді. Жұмыстың практикалық маңыздылығы қайта өңдеу кәсіпорындарында бактериялық қоректік ортаның негізі ретінде пайдалану үшін ақуыз гидролизаттарының жетілдірілген технологиясын пайдалану болып табылады.

Түйін сөздер: *сойылған малдың ферменттік шикізаты, қосалқы өнімдер, балық шикізаты, гидролиз, ақуыз гидролизаты, пептон.*

Кіріспе

Ет өндірісінде сойылған малдың қайталама өнімдерін пайдалану шикізаттың барлық құнды компоненттерін барынша және жан-жақты алуға, оларды пайдалы өнімдерге айналдыруға мүмкіндік береді.

Қазіргі уақытта ақуыз гидролизаттарын алу үшін мал сою мен өңдеудің құны төмен өнімдерін, екінші реттегі субөнімдерді ұтымды пайдалануға көп көңіл бөлінуде, олар тағамның құрамдас бөлігі және микробиологиялық өндіріс ортасы ретінде кеңінен қолданылады.

Пептон микробиология өнеркәсібінде және биотехнологияда сұранысқа ие қоректік орталардың негізгі компоненттерінің бірі болып табылады. Тамақ, микробиология, фармацевтика өнеркәсібінде ең көп таралған ақуыз (белок) гидролизаты – бірнеше байланысқан аминқышқылдарының фрагменттері болып табылатын жартылай ыдыраған ақуыз [1].

Көптеген қоректік негіздер мен орталар жануарлардан немесе өсімдіктерден алынатын өнімдерді пайдалана отырып, ақуыз гидролизаттарынан алынады (С.П. Рогожин, Л.Я. Телишевская, И.Г. Шептун, 1986; Л.Я. Телишевская, 2000; Л.С. Лабинская, Л.П. Блинкова, А.С. Ещина, 2004).

Зерттеу нысаны гидролиз әдістері болып саналады.

Жұмыстың мақсаты: Биологиялық белсенділігі жоғары ақуыз гидролизі негізінде құрғақ пептон алудың технологиялық режимдері мен параметрлерін әзірлеу.

Республикада пептон өндірісі жоқ. Бұл бағытта тамақ өнеркәсібінің жанама шикізат қалдықтарынан ақуыздық құрамдас бөлігінің конверсиясының терең дәрежесі бар пептонды алу өзекті болып табылады.

Алайда, жасушадан тыс қоспалардың болуына және пептонның биологиялық белсенділігінің төмен болуына байланысты өндірілетін өнімдердің сапасы төмендейді. Пептонның биологиялық белсенділігінің төмен болуы ақуыздың ыдырауының төмен дәрежесіне байланысты, соның салдарынан дайын өнімнің шығымы төмендейді және пептондардың физика-химиялық және биологиялық қасиеттері төмендейді.

Қоректік орталарды таңдауда мұқият болу бактериялардың өсуін айтарлықтай жақсарта алады, гидролиз барысында аминқышқылдары ферменттерін қолданудың орнына біріктірілмеген әдісін, яғни, тек қана қышқылмен немесе сілтімен жүргізу нашар нәтиже беруі мүмкін [2, 3].

Жұмыстың ғылыми маңыздылығы өнімнің биологиялық құндылығын арттыру үшін ақуызды гидролиздеу әдісін жетілдіру болып табылады.

Жұмыстың практикалық маңыздылығы гидролиздің тереңдігін арттыруға және мақсатты өнімнің шығымын қамтамасыз етуге мүмкіндік беретін ақуызды шикізатты өңдеудің ферментативті-қышқылдық әдісін қолдана отырып, оңтайлы физика-химиялық және биохимиялық қасиеттері бар жоғары сапалы гидролизат алу болып табылады

Осыған орай, жоғары сапалы өнімдер өндірісіне тарту мақсатында, қайталама ақуыз шикізатына әсер етудің оңтайлы жолдарын іздестіре отырып, оларды қайта өңдеу әдістерін әзірлеу қажеттілігі туындайды.

Зерттеудің шарттары мен әдістері

Зерттеу нысаны гидролиз әдістері болып саналды. Құрамында ақуызы бар шикізатты гидролиздеудің оңтайлы нұсқасын анықтау бойынша зерттеулер «Қазақ қайта өңдеу және тағам өнеркәсіптері ғылыми-зерттеу институты» (ҚҚӨжТӨҒЗИ) ЖШС СФ зертханалық жағдайында және «Рахимов Ж.М» ЖК тәжірибелік өндіріс жағдайында жүргізілді (Абай облысы, Семей қ.).

Ақуыз шикізаты гидролизінің үш нұсқасы зерттелді: қышқылдық, негіздік және ферментативті. Екінші ет және балық шикізатынан ақуыз гидролизатын алу бойынша зерттеулердің бірінші кезеңінде олардың ыдырауының оңтайлы деңгейіне жету үшін шикізатты химиялық өңдеудің (қышқыл, сілтілі) алдын-ала әдісінің параметрлері анықталды. Бағалы қоректік заттарды толығымен бөліп алу және гидролиздің ұзақтығын қысқарту үшін ортофосфор және сірке қышқылдары қолданылды.

Ақуыз субстратының қышқылдық гидролизі 40-45 ^{0}С температурада, 8-12 сағат бойы концентрациясы 1-5% және pH 3,5-5,1 шамасындағы ортофосфор және сірке қышқылдарының ерітінділері арқылы жүргізілді. Бастапқы шикізат ретінде ет және балық шикізатының әртүрлі пайыздық арақатынасы қолданылды: 1-нұсқа – ет шикізаты 90%, балық шикізаты – 10%; 2-нұсқа - ет шикізаты 70%, балық шикізаты – 30 %; 3-нұсқа – ет шикізаты 50%, балық шикізаты - 50%.

Ақуыз субстратының сілтілі гидролизі 40-45 ^{0}С температурада жүргізілді, гидролиз ұзақтығы 15-18 сағатты құрайды, кальций гидроксиді мен натрий гидроксиді сілтілерінің 1-5% концентрациядағы және pH 8,0-9,5 диапазонындағы ерітінділері қолданылады. Шикізат ретінде ет пен балық келесі проценттік қатынастарда қолданылды: 1-нұсқа – 90% ет шикізаты, 10% балық шикізаты; 2-нұсқа – 70% ет шикізаты, 30% балық шикізаты; 3-нұсқа – 50% ет шикізаты және 50% балық шикізаты.

Зерттеудің екінші кезеңінде, гидролиздің түпкілікті әдісін таңдау мақсатында, ферментативтік гидролиздің оңтайлы технологиялық режимдері мен параметрлері анықталды.

Ферментативті гидролиз 45^{0}С температурада, жануарлар протеазаларының ферменттік кешенін пайдалана отырып, ферменттердің концентрациясы 5-тен 15% - ға дейін және pH 6,9-7,2 құрайтын жағдайда 71±1 сағат аралығында жүргізілді. Ферменттік кешен ретінде тор диаметрі 5 мм ет ұсақтағыштан алдын ала өткізілген ірі қара мал мен қойдың ұйқы безі, шошқа қарындары мен ірі қара малдың қарынының шырышты қабаттары қолданылды. Зерттеуге жануарлар протеазаларының 4 түрлі қатынасы алынды: ұйқы безі мен шошқа қарындарының шырышты қабатының қатынасы 1:1; 1:2, 1:3, 1:4.

Гидролиздің сапасы ақуыз гидролизатының физика-химиялық көрсеткіштері бойынша келесі көрсеткіштер арқылы бағаланды: органолептикалық көрсеткіштер (ГОСТ 29311-92), pH (ГОСТ 32165-2013), жалпы азот (ГОСТ 20730), амин азоты (ГОСТ 20730), құрғақ зат (ГОСТ 33319-2015), ақуыз гидролизінің дәрежесі (коэффициенті) формула бойынша бағаланды.

Ақуыз гидролизатының сапасы ГОСТ 13805 бойынша: органолептикалық көрсеткіштер (сыртқы түрі, түсі, иісі), физика-химиялық (pH, ылғал, сульфатталған күл, шынайы пептон, жалпы азот, ақуыздың массалық үлесі, бос ақуыз, хлор ионына шаққандағы хлоридтер, бос индол, ерімейтін қоспалардың болуы), (Staphylococus aureus "Лассманов", Echericlua coli 675, Streptococcus faccalis 6783) микробтарының өсуі, ауыр металдардың тұздары (ГОСТ 30178-96), аминқышқылдарының құрамы (ГОСТ Р 55569-2013) бағаланды.

Пептонның құрамы мен қасиеттерін зерттеу ГОСТ 13805 сәйкес іске асты.

Зерттеу нәтижелері

Концентрациясы 1% ортофосфор қышқылының ерітіндісімен гидролиздеу нәтижесінде (1 нұсқа) келесі мәліметтер алынды: жалпы азоттың мөлшері - 17,1-17,6%, амин азоты - 4,7-5,1%. Концентрациясы 3 және 5% ортофосфор қышқылының ерітіндісімен өңдеу барысында алынған қышқыл гидролизатында жалпы азоттың мөлшері - 15,6-16,0%, амин азоты - 5,9-7,0 % құрайтындығы тағайындалды. 1% концентрациялы сірке қышқылы ерітіндісімен гидролиздеу нәтижесінде (1 нұсқа) жалпы азоттың мөлшері – 17,0 %, амин азоты – 5,2-5,3% құрады. Концентрациясы 3% және 5% сірке қышқылының ерітіндісімен өңдегенде алынған қышқыл гидролизатында орта есеппен жалпы азот мөлшері – 15,1-15,7%, амин азоты – 6,3-7,1% болды.

Амин азотының құрамы бойынша зерттеу нәтижелерін сараптай келе, алдын ала қышқылдық өңдеу барысында қышқыл ерітіндісінің концентрациясы 1%-дан 5%-ға дейін артқан жағдайда, амин азотының мөлшері 4,7%-дан 7,1%-ға дейін өсетінін көрсетті. Гидролиз үрдісін одан әрі жүзеге асыру үшін, ортофосфор қышқылын пайдалана отырып, алдын ала қышқылдық өңдеудің оңтайлы нұсқалары ретінде 2 және 3 нұсқалар таңдалды.

Қышқылдық гидролиз дәрежесін сипаттайтын зерттеу деректері 1-кестеде келтірілген.

Кесте 1 – Қышқылдық гидролизді (t=45 ^{0}C) жүргізу дәрежесін сипаттайтын көрсеткіштер

Көрсеткіштердің атауы	Көрсеткіштер, % (ет шикізаты 90%, балық шикізаты 10%)					
	Ортофосфор қышқылының ерітіндісімен өңдеу			Сірке қышқылының ерітіндісімен өңдеу		
	1%	3%	5%	1%	3%	5%
Жалпы азот	17,6±0,2	16,3±0,2	15,6±0,2	17,0±0,1	15,4±0,2	15,1±0,2
Амин азоты	4,7±0,1	5,9±0,1	6,7±0,1	5,3±0,1	6,7±0,1	7,1±0,1
Гидролиз коэффициенті	0,87±0,02	0,91±0,03	0,92±0,03	0,70±0,02	0,72±0,01	0,74±0,01
Көрсеткіштер, % (ет шикізаты 70%, балық шикізаты 30%)						
	Ортофосфор қышқылының ерітіндісімен өңдеу кезінде			Сірке қышқылының ерітіндісімен өңдегенде		
	1%	3%	5%	1%	3%	5%
Жалпы азот	17,2±0,2	16,1±0,2	15,3±0,2	17,0±0,2	15,4±0,1	15,3±0,2
Амин азоты	5,1±0,1	6,2±0,1	7,0±0,1	5,3±0,1	6,3±0,1	7,0±0,1
Гидролиз коэффициенті	0,85±0,02	0,9±0,05	0,91±0,03	0,69±0,03	0,7±0,03	0,73±0,02
Көрсеткіштер, % (ет шикізаты 50%, балық шикізаты 50%)						
	Ортофосфор қышқылының ерітіндісімен өңдеу кезінде			Сірке қышқылының ерітіндісімен өңдегенде		
	1%	3%	5%	1%	3%	5%
Жалпы азот	17,1±0,2	16,0±0,1	15,5±0,1	17,0±0,2	15,7±0,1	15,3±0,2
Амин азоты	4,9±0,02	6,0±0,03	6,9±0,07	5,2±0,08	6,5±0,11	7,0±0,07
Гидролиз коэффициенті	0,8±0,020	0,85±0,035	0,85±0,046	0,62±0,026	0,63±0,011	0,64±0,012

Осылайша, қышқылдық өңдеу барысында гидролиздеу температурасы 45^{0}C және балықтың ет шикізатына қатынасы 30%-дан аспаған және pH 3,8-4,2 болған жағдайда ең белсенді гидролиздік әсерге 3-5% концентрациялы ортофосфор қышқылы ие болды.

Кальций гидроксиді мен натрий гидроксиді ерітіндісімен сілтілі өңдеу барысында, концентрацияны 1-ден 5%-ға дейін арттырғанда, гидролизаттардағы балықтың мөлшері 10-50% құрайтын нұсқаларда жалпы азоттың мөлшері 17,0%-дан 15,1%-ға дейін азайғаны, ал амин азотының мөлшері 5,0%-дан 7,0%-ға дейін артқаны анықталды.

Сілтілік өңдеудің ең қолайлы нұсқасы 3 нұсқа, ерітіндінің концентрациясы 3%, 45 ^{0}C температурада, балықтың ет шикізатына қатынасы 30%-дан аспаған жағдайда натрий гидроксидімен өңдеу болып табылады.

Сілтілік және қышқыл гидролизаттарының сапалық көрсеткіштерін салыстырмалы бағалау барысында екінші реттік ет шикізатын өңдеудің қышқыл әдісі таңдалды.

Сілтілік гидролиз дәрежесін сипаттайтын зерттеу деректері 2-кестеде келтірілген.

Осылайша, бекітілген қасиеттері бар гидролизатты алуға мүмкіндік беретін гидролиздің сілтілі әдісінің оңтайлы параметрлері белгіленді: гидролиздің ұзақтығы – 15 сағат, гидролиз температурасы – 45^{0}C, белсенді қышқылдығы – 9,2-9,5 бірлік pH, натрий гидроксиді ерітіндісінің концентрациясы – 3%.

Гидролиздің тиімді әдісін таңдау үшін ферментативті гидролиздің оңтайлы технологиялық режимдері мен параметрлері анықталды.

Ферментативті гидролиздің дәрежесін сипаттайтын зерттеу деректері 3-кестеде келтірілген.

10-нан 50%-ға дейінгі мөлшердегі балық шикізаты мен ет шикізатының арақатынасы кезінде ең белсенді гидролиздеу әсеріне ие ферментативті кешен ретінде концентрациясы 10%, 45 ^{0}C температурада, pH-6,9 бірлікте және балық шикізатының ет шикізатына арақатынасы 30% аспаған жағдайда ұйқы безі мен шошқа асқазанының шырышты қабатының 1:4 қатынасы екендігі тағайындалды.

Кесте 2 – Сілтілік гидролиздің жүргізілу дәрежесін сипаттайтын көрсеткіштер

Көрсеткіштердің атауы	Нақты көрсеткіштер, % (ет шикізаты 90% балық шикізаты 10%)					
	Натрий гидроксиді ерітіндісімен өңдеу кезінде			Кальций гидроксиді ерітіндісімен өңдеу кезінде		
	1%	3%	5%	1%	3 %	5%
Жалпы азот	17,2±0,19	16,1±0,31	15,3±0,51	17±0,27	16±0,20	15,3±0,15
Амин азоты	5,1±0,14	6,2±0,12	7,0±0,27	5,3±0,13	6,3±0,14	7,0±0,11
Гидролиз коэффициенті	0,82±0,03	0,84±0,04	0,85±0,035	0,64±0,02	0,67±0,032	0,68±0,031
Нақты көрсеткіштер, % (ет шикізаты 70% балық шикізаты 30%)						
	Натрий гидроксиді ерітіндісімен өңдеу кезінде			Кальций гидроксиді ерітіндісімен өңдеу кезінде		
	1%	3%	5%	1%	3%	5%
Жалпы азот	17,2±0,64	16,0±0,50	15,1±0,21	17,1±0,27	16,0±0,47	15,2±0,44
Амин азоты	5,0±0,13	6,0±0,16	7,0±0,20	5,1±0,14	6,2±0,05	7,0±0,07
Гидролиз коэффициенті	0,8±0,03	0,85±0,03	0,85±0,02	0,62±0,03	0,64±0,02	0,65±0,01
Нақты көрсеткіштер, % (ет шикізаты 50% балық шикізаты 50%)						
	Натрий гидроксиді ерітіндісімен өңдеу кезінде			Кальций гидроксиді ерітіндісімен өңдеу кезінде		
	1%	3%	5%	1%	3%	5%
Жалпы азот	17,0±0,20	15,8±0,42	15,0±0,31	16,8±0,51	16,0±0,27	15,1±0,07
Амин азоты	5,0±0,15	5,8±0,33	6,8±0,14	5,0±0,17	6,0±0,15	6,9±0,18
Гидролиз коэффициенті	0,79±0,08	0,83±0,02	0,83±0,04	0,60±0,02	0,61±0,01	0,63±0,02

Кесте 3 – Ферментативтік гидролиздің жүргізілу дәрежесін сипаттайтын көрсеткіштер

Көрсеткіштердің атауы	Асқазанның шошқа асқазанының ұйқы безі мен шырышты қабығының арақатынасы (ет 90%, балық 10%)											
	1:1			1:2			1:3			1:4		
	5%	10%	15%	5%	10%	15%	5%	10%	15%	5%	10%	15%
Жалпы азот	17,6±0,25	17,2±0,12	17,0±0,26	17,0±0,29	16,5±0,25	16,4±0,32	16,4±0,20	16,0±0,21	15,8±0,10	15,8±0,26	15,6±0,35	15,5±0,32
Амин азоты	3,2±0,12	3,3±0,06	3,4±0,1	3,4±0,15	3,6±0,10	3,7±0,15	3,7±0,21	3,9±0,17	4,0±0,21	4,0±0,15	4,2±0,12	4,2±0,12
Гидролиз коэффициенті	0,79±0,09	0,8±0,08	0,8±0,09	0,82±0,08	0,83±0,037	0,83±0,024	0,84±0,024	0,86±0,012	0,87±0,016	0,92±0,033	0,96±0,022	0,97±0,02
Асқазанның шошқа асқазанының ұйқы безі мен шырышты қабатының арақатынасы (ет 70%, балық 30%)												
	1:1			1:2			1:3			1:4		
	5%	10%	15%	5%	10%	15%	5%	10%	15%	5%	10%	15%
Жалпы азот	17,0±0,27	16,70±0,23	16,5±0,29	16,5±0,21	16,2±0,21	16±0,06	15,8±0,23	15,5±0,31	15,5±0,1	15,4±0,46	15,2±0,38	15,2±0,35
Амин азоты	3,4±0,19	3,5±0,26	3,6±0,12	3,6±0,14	3,8±0,15	4,0±0,03	4,0±0,10	4,2±0,15	4,2±0,14	4,3±0,25	4,5±0,25	4,5±0,03
Гидролиз коэффициенті	0,79±0,03	0,8±0,03	0,81±0,05	0,82±0,02	0,82±0,02	0,83±0,02	0,83±0,03	0,85±0,02	0,86±0,03	0,9±0,03	0,94±0,049	0,95±0,04
Асқазанның шошқа асқазанының ұйқы безі мен шырышты қабатының арақатынасы (ет 50%, балық 50%)												
Жалпы азот	17,2±0,15	17,2±0,25	17±0,24	16,8±0,23	16,5±0,08	16,4±0,17	16,3±0,31	16,0±0,31	15,9±0,32	15,8±0,07	15,5±0,24	15,4±0,31
Амин азоты	3,6±0,076	3,7±0,1	3,8±0,1	3,8±0,08	4,0±0,1	4,0±0,08	4,2±0,15	4,5±0,09	4,5±0,1	4,6±0,06	4,7±0,1	4,7±0,13
Гидролиз коэффициенті	0,77±0,02	0,79±0,02	0,79±0,01	0,8±0,02	0,81±0,01	0,81±0,01	0,82±0,01	0,84±0,02	0,84±0,01	0,85±0,01	0,86±0,03	0,86±0,03

Ферменттің субстратқа оңтайлы қатынасы 10% құрайды (ұйқы безі – шикізат мөлшерінің 2% және асқазанның шырышты қабаты - шикізат мөлшерінің 8%).

Ферментативті гидролиздің ұзақтығы 71 сағатты құрайды, алайда бұл әдістің кемшілігі гидролиздің төмен жылдамдығы болып табылады, осыған байланысты гидролиз процесінің

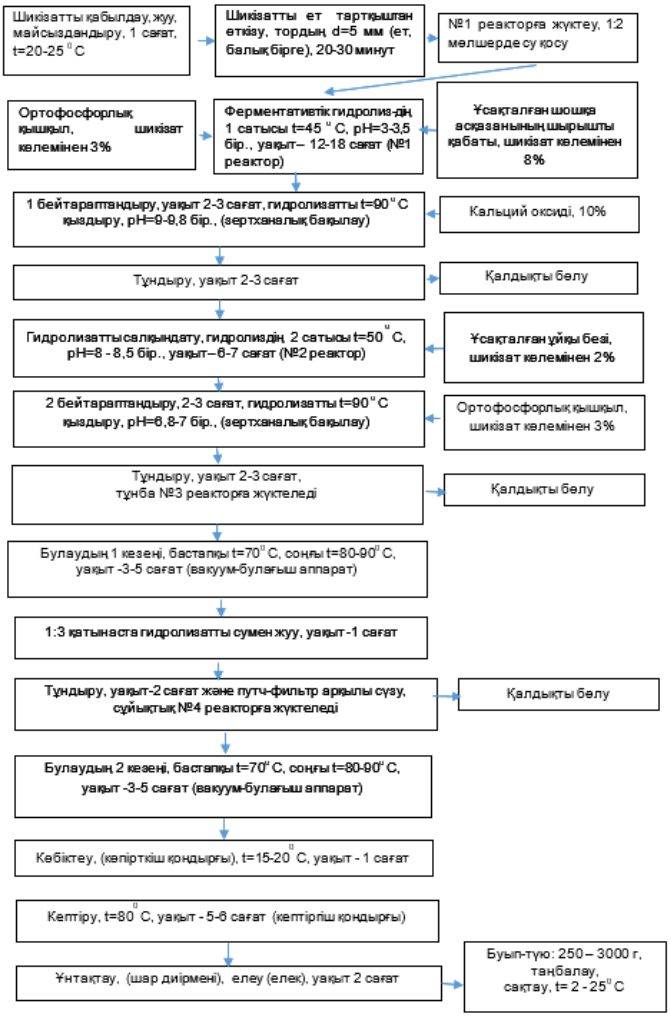
ұзақтылығын азайтуға, ақуыздың толық ыдырауын қамтамасыз ететін және ақуыз гидролизатының биологиялық құндылығын барынша сақтауға мүмкіндік беретін ферментативті – қышқылды гидролиз әдісі таңдалды.

Ақуыз гидролизатын өңдеудің қышқыл-ферментативті әдісінің оңтайлы технологиялық режимдері мен параметрлері анықталды. Ақуыз субстратын өңдеудің тиімділігін арттыру үшін гидролиз 1:2 гидромодулында ортофосфор қышқылының қатысуымен, 1 сатыда 45^0C температурада, белсенді қышқылдық 3-3,5 pH бірлік, 12-18 сағат аралығында; 2 сатыда 50^0C температурада, белсенді қышқылдық 8-8,5 бірлік pH., 6-7 сағат ішінде жүргізілді.

Гидролизатты өңдеудің ферментативті – қышқыл әдісі параметрлерінің оңтайлы мәндері: гидролиздің ұзақтығы 21 сағат, I сатының температурасы – 45^0C; II саты – 50^0C, белсенді қышқылдығы 6,9 pH бірлігі, фермент концентрациясы – 10% (шошқа асқазанының шырышты қабаты 8% және ұйқы безі 2%) екндігі тағайындалды.

Пептонды ферментативті – қышқыл әдіспен өндірудің технологиялық схемасы жасалды. Пептон өндірісінің технологиялық схемасы 1-суретте көрсетілген.

Ет пептоны жануарлардың протеазаларын (шошқа асқазанының шырышты қабаты және ұйқы безі) қолдана отырып, ортофосфор қышқылының қатысуымен екі нұсқада өндірілді: 1 нұсқа: 100% қайталама ет шикізаты (қарын, өкпе); 2 нұсқа: 70% қайталама ет шикізаты (қарын, өкпе) және 30% балық және балық қалдықтары (қарақұйрық, алабұға, қанаттар, тері, сүйектер).



Сурет 1 – Микробиологиялық мақсаттар үшін ақуыз гидролизатын (пептон) өндірудің технологиялық блок-схемасы

Пептон алудың технологиялық процесі келесі үрдістерді қамтиды: шикізатты қабылдау, жуу, ағынды су, t=20-25 ^{0}C, майсыздандыру ъ=160-90 минут; шикізатты ет тартқыштан өткізу, тор көзінің d=5 мм, ет шикізаты (қарын, өкпе), ферментативті шикізат (ұйқы безі, шошқа

асқазанының шырышты қабаты), балық (табан, алабұға, қанаттар, тері, сүйектер), ʊ =20-30 мин; шикізатты 1 реакторға жүктеу; 1:2 мөлшерде су қосып араластыру (1 кг шикізатқа 2 литр су); шикізат көлемінен 3% көлемде ортофосфорлық қышқыл қосу, ʊ =40-60 минут және шикізат көлемінен 8% мөлшерде ұсақталған шошқа асқазанының шырышты қабатын қосу; ферментативтік гидролиздің 1 сатысын жүргізу, t=45 ^{0} С, pH=3-3,5 бір., ұзақтығы-ʊ=12-18 сағат; гидролизатты t=90 ^{0}С қыздыра отырып, pH=9-9,8 бір., 10% кальций оксидін қосу арқылы 1 бейтараптандыру жүргізу, ұзақтығы-ʊ=2-3 сағат; гидролизатты тұндыру, ʊ=2-3 сағат; гидролизатты салқындату, шикізат көлемінің 2% құрайтын мөлшерде ұсақталған ұйқы безін қосу арқылы t=50 ^{0}С, pH=8-8,5 бір., ʊ=6-7 сағат ішінде гидролиздің 2 сатысын жүргізу; гидролизатты 90^{0}С қыздыра отырып, pH=6,8-7 бірлік болғанша ортофосфор қышқылын қосу арқылы ʊ=2-3 сағат ішінде II бейтараптандыру үрдісін жүргізу; гидролизатты тұндыру, ʊ=2-3 сағат; бастапқы t=70^{0}С, соңғы t=80-90^{0}С, уақыт – ʊ=3-5 сағат аралығында булаудың 1 кезеңін жүргізу; гидролизатты 1:3 қатынаста суық сумен ʊ =60 мин аралықта жуу; бастапқы t=70^{0}С, соңғы t=80-90^{0}С, уақыт-ʊ=3-5 сағат аралығында булаудың II кезеңін жүргізу; көпірту қондырғысының көмегімен гидролизатты ʊ =40-60 мин аралықта көбіктеу; конвективті кептіргіш қондырғыда t =80 ^{0}С, ʊ=6 сағат бойы кептіру; ʊ =2 сағат ішінде шар диірменінің көмегімен ұнтақтау және електен өткізіп, елеу; буып-түю: 250 – 3000 г, таңбалау, сақтау, t= 2 - 25^{0}С.

Ақуыз гидролизатының (пептон) органолептикалық көрсеткіштері (сыртқы түрі, түсі, иісі), физика-химиялық (pH, ылғал, сульфатталған күл, шынайы пептон, жалпы азот, ақуыздың массалық үлесі, бос ақуыз, хлор ионына шаққандағы хлоридтер, ауыр металл тұздары, бос индол, ерімейтін қоспалардың болуы) және микробиологиялық (Staphylococus aureus "Лассманов", Echericlua coli 675 штамы, Streptococcus faccalis 6783 штамы) микробтарының өсуі зерттелді.

Зерттеу нәтижелері 5-кестеде келтірілген.

Кесте 5 – Микробиологиялық мақсаттарға арналған ақуыз гидролизатының (пептон) сапалық көрсеткіштері

Көрсеткіштердің аталуы	НҚ бойынша норма	Алынған нәтижелер		Сынақ әдістеріне арналған НҚ
		1 нұсқа (100%)	2 нұсқа (70/30%)	
pH, бірлік	6,5-7,0	6,76±0,06	6,63±0,04	ГОСТ 13805-76
Ерімейтін қоспалар, %, артық емес	1,0	0,68	0,73	ГОСТ 13805-76
Ылғал, %, артық емес	7,0	6,53±0,05	7,36±0,08	ГОСТ 13805-76
Сульфатталған күл, %, артық емес	5,0	4,45	4,37	ГОСТ 13805-76
Шынайы пептон, %, артық емес	70,0	92,19	92,96	ГОСТ 13805-76
Жалпы азот, %, кем емес	14,0	13,99±0,12	13,18±0,14	ГОСТ 13805-76
Бос ақуыз, оптикалық тығыздық, %, артық емес	0,25	0,113	0,200	ГОСТ 13805-76
Хлор ионына шаққандағы хлоридтер, %, артық емес	1,0	0,80±0,01	0,82±0,01	ГОСТ 13805-76
Ауыр металл тұздары, мг/кг: Pb Cd As Hg	жол берілмейді	 табылған жоқ табылған жоқ табылған жоқ табылған жоқ	 табылған жоқ табылған жоқ табылған жоқ табылған жоқ	ГОСТ 30178-96
Бос индол	жол берілмейді	табылған жоқ	табылған жоқ	ГОСТ 13805-76
Микробтардың өсуі, оптикалық тығыздық, кем емес - Staphylococus aureus «Лассманов»; - Echericlua coli шт.675; - Streptococcus faccalis шт.6783	Типтік өсу 0,40 0,50 0,30	 0,621 0,682 0,535	 0,704 0,729 0,499	ГОСТ 13805-76

Пептонның 1-нұсқасының органолептикалық көрсеткіштері – құрғақ, аморфты ұнтақ, біртекті, түсі-ашық сары, иісі-шіріксіз екендігі анықталды. Ақуыздың массалық үлесі-87,47±0,83%. Аминқышқылдарының құрамы, массалық үлесі %: аргинин – 5,831±2,332, лизин – 7,371±2,506, тирозин – 3,300±0,990, фенилаланин – 5,281±1,584, гистидин – 2,420±1,210, лейцин+изолейцин – 5,501±1,430, метионин – 4,070±1,384, валин – 8,691±3,476, пролин – 6,931±1,802, треонин – 4,290±1,716, серин – 4,290±0,116, аланин – 6,821±1,773, глицин – 10,671±3,628.

2-нұсқаның органолептикалық көрсеткіштері – құрғақ, аморфты ұнтақ, біркелкі, түсі ашық сары, иісі-шіріксіз. Ақуыздың массалық үлесі – 82,43±0,86%. Аминқышқылдарының құрамы, массалық үлесі %: аргинин – 6,345±2,538, лизин – 6,908±2,349, тирозин – 0,771±0,231, фенилаланин – 4,980±1,494, гистидин – 1,606±0,803, лейцин+изолейцин – 5,301±1,378, метионин – 4,257±1,447, валин – 8,032±3,212, пролин – 6,747±1,754, треонин – 3,695±1,478, серин – 4,900±1,274, аланин – 6,426±1,671, глицин – 10,442±3,550.

Қорытындылай келе, ақуыз гидролизатының сапа көрсеткіштері пептонға қойылатын ГОСТ 13805 талаптарына сәйкес келетіні тағайындалды.

Ғылыми нәтижелерді талқылау

Ақуыз гидролизаттарын бактериялық қоректік орта ретінде пайдалану барысында химиялық және/немесе ферментативтік гидролиз әдістері қолданылады, нәтижесінде түзілген пептидтер мен аминқышқылдарының кешені ағзаның табиғи түріне тән [4-6].

Гидролиздеу және гидролизаттарды тазарту әдістерін жетілдірудегі перспективалы бағыт қайталама ақуыз шикізатын, сойылған жануарлардың ферменттік шикізатын және балық шикізатын пайдалану болып табылады [1. Martínez-Alvarez O., Chamorro S., Brenes A. Protein hydrolysates from animal processing by-products as a source of bioactive molecules with interest in animal feeding: A review. Food Research International. 2015. Vol. 73. P. 204-212. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.04.00], [2. Nikoo M, Regenstein JM, Yasemi M. Protein Hydrolysates from Fishery Processing By-Products: Production, Characteristics, Food Applications, and Challenges. Foods. 2023;12(24):4470. Published 2023 Dec 13. doi:10.3390/foods12244470], [3. Solis T, Valdivia S, Vergara A, Carvajal M, Seguel I, Valencia P. Valorization of fish processing by-products through combined enzymatic and microbial hydrolysis: nitrogen recovery and fertilizer efficiency in wheat. Front Nutr. 2026; 13:1757182. Published 2026 Feb 23. doi:10.3389/fnut.2026.1757182].

Ферменттік кешендер ретінде ірі қара мен ұсақ малдың ұйқы бездері қолданылады (Mills JAN, France J., Ellis J. L., et al. A mechanistic model of small intestinal starch digestion and glucose uptake in the cow. J Dairy Sci. 2017;100(6):4650-4670. doi:10.3168/jds.2016-12122); EFSA Panel on Food Contact Materials, Enzymes and Processing Aids (CEP), Lambré C., Barat (Baviera J.M., et al. Safety evaluation of the food enzyme trypsin from porcine pancreas. EFSA J. 2022;20(1): e07008. Published 2022 Jan 12. doi: 10.2903/j.efsa.2022.7008), шошқалардың ұйқы безінен алынған трипсин ақуыз гидролизаттарын, соның ішінде тағамдық мақсатта кеңінен қолданылатыны көрсетілген.

Ұйқы безі – протеаза кешенінің көзі (Wu G. protein hydrolysates in animal nutrition: Industrial production, bioactive Peptides, and functional significance. Journal of Animal Science and Biotechnology. 2017. 8: 24), ақуыздарды гидролиздеу үшін қолданылатын жануарлардан алынатын ферменттерге панкреатин, трипсин, химотрипсин, карбоксипептидазалар және негізінен шошқалардың ұйқы безінен алынған аминопептидазалар жатады.

Асқазан мен ұйқы безінің протеолитикалық белсенділігі туралы деректер (Kurz A., Seifert J. Factors Influencing Proteolysis and Protein Utilization in the Intestine of Pigs: A Review. Animals (Basel). 2021;11(12):3551. Published 2021 Dec 14. doi:10.3390/ani11123551, шолуда негізгі протеолитикалық ферменттер толығымен сипатталған: асқазан – пепсин (пепсиногеннен түзіліп, ақуыздардың гидролизін бастайды); ұйқы безі – трипсин, химотрипсин, эластаза, карбоксипептидазалар; сондай-ақ олардың белсенділігін анықтау әдістері, синтетикалық субстраттарды қолдануды және спектрофотометриялық немесе флуориметриялық талдаумен келтірілген. Бұл ферменттік белсенділікті бағалау әдісін таңдауды негіздеу үшін қажетті дереккөз болып табылады.

Шошқа асқазандары мен ірі қара малдың ұлтабарының шырышты қабығы (Keller P.J., Cohen E. Enzymic Composition of Some Cell Fractions of Bovine Pancreas. The Journal of biological chemistry. 1961;236: 1407-13. doi:10.1016/s0021-9258(18)64187-0), (Баженова Б.А.,

Данилов А.М. Получение ферментного раствора из говяжьего цельного сычуга для модификации свойств коллагенсодержащего рубца // Теория и практика переработки мяса. 2017. №4. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/poluchenie-fermentnogo-rastvora-iz-govyazhiego-tselnogo-sychuga-dlya-modifikatsii-svoystv-kollagensoderzhaschego-rubtsa) жұмыстарында сипатталған.

Асқазанның шырышты қабаты – пепсиннің көзі (Tavano O.L. Protein hydrolysis using proteases: An important tool for food biotechnology. Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic. 2013. Vol. 90. P. 1-11) шолуда пепсиннің негізінен шошқа мен ірі қара малдың асқазан шырышты қабығынан алынатыны және оның тағамдық ақуыздарды ферменттік гидролиздеуде кеңінен қолданылатыны келтірілген.

Neklyudov A.D., Fedorova M.V., Kudryavtseva O.N. «Kinetic Characterization of Enzymatic Hydrolysis of Complex Protein Substrates for Producing Nutrient Media». Бұл мақалада авторлар шошқаның ұйқы безінен (porcine pancreatic cell suspension) фермент жүйесін қолдана отырып, ақуыз қоспасының (бұлшықет және сүйек тіндері) гидролиздеуді зерттейді. Әдістеменің сипаттамасында шикізат алдын-ала ұнтақталған, содан кейін сулы суспензиясы дайындалғаны нақты көрсетілген.

Berdutina AV, Nekliudov AD, Ivankin AI, Karpo BS, Mitaleva SI. Proteoliticheskaia aktivnost fermentnogo kompleksa podzheludochnoi zhelezy mlekopitaiushchikh v sravnenii s pankreatinom [Proteolytic activity of the enzyme complex of the mammalian pancreas in comparison with pancreatin]. Prikl Biokhim Mikrobiol. 2000;36(4):422-427.

«Comparison of proteolytic activities of the enzyme complex from mammalian pancreas and pancreatin» мақаласында сүтқоректілердің ұйқы безі кешенінің протеолитикалық белсенділігі (ірі қара мал және шошқа) коммерциялық панкреатин препаратымен салыстырылады. Материалды дайындау бөлімінде суда гомогенизацияланбас бұрын ұйқы безі ұнтақталған (майсыздандырған және гомогенделген) болуы туралы мәліметтер бар.

Ортофосфор қышқылының сүйек және ет шикізатының ақуыз-минералды кешендерін қышқылдық ыдыратуын жеделдетуге арналған реагент ретіндегі тиімділігі [7] жұмыстарда көрсетілген. Қышқылдық-ферментативтік схемалар ақуыз гидролизаттарының қажетті мәнін сақтай отырып, гидролизді күшейтуге және оның ұзақтығын қысқартуға мүмкіндік береді [8-10].

Ет шикізатының 30% көлемін балық шикізатымен алмастыру арқылы өнімнің өзіндік құнын төмендету, балық пептондарын алу үшін өңдегеннен қалған балықтың қалдықтарын (бас, сүйек, тері, ішектер) пайдалану коммерциялық ет/казеин пептондарымен салыстырғанда қоректік ортаның тауарлық құнын айтарлықтай арзандатуға мүмкіндік береді және бұл ретте құрамдас пептонның жалпы сапалық көрсеткіштері төмендемейді, керісінше микрофлораның өсуі мен метаболикалық белсенділігін арттыруға себебін тигізуі ықтимал [11].

Әзірленген схема сойылған малдың ет шикізатының қалдықтарынан ақуызды гидролиздеу тереңдігін арттыруға, процестің ұзақтығын қысқартуға, дайын өнімнің шығымдылығын арттыруға мүмкіндік береді. Шетел әдебиеттерінде пептондарды, майларды және минералды фракцияларды алу үшін ақуызға бай қалдықтарды (ет және сүйек ұны, балық және құс еті) кешенді, қалдықсыз өңдеу тұжырымдамасы белсенді түрде дамып келеді. Дұрыс таңдалған ферменттік гидролиз және фазаларға бөлінудің тиімді режимдері бір уақытта ақуыздың шығымдылығын арттырып, микробтық өндірістер үшін үнемді, құны арзан субстраттар жасауға болатынын көрсетеді [12].

Қорытынды

1. Гидролиздің тиімді әдісін таңдау үшін ферментативті гидролиздің оңтайлы технологиялық режимдері мен параметрлері анықталды. 10-нан 50%-ға дейінгі мөлшердегі балық шикізаты мен ет шикізатының арақатынасы кезінде ең белсенді гидролиздеу әсеріне ие ферментативті кешен ретінде концентрациясы 10%, 45 ^{0}С температурада, pH-6,9 бірлікте және балық шикізатының ет шикізатына арақатынасы 30% аспаған жағдайда ұйқы безі мен шошқа асқазанының шырышты қабатының 1:4 қатынасы екендігі тағайындалды.

Ферменттің субстратқа оңтайлы қатынасы 10% құрайды (ұйқы безі – шикізат мөлшерінің 2% және асқазанның шырышты қабаты – шикізат мөлшерінің 8%).

2. Гидролиз дәрежесін сипаттайтын көрсеткіштер: азоттың жинақталуы (жалпы, амин), қатты заттар, протеолиз коэффициенті, гидролиз коэффициенті анықталды. Ферменттік гидролиз жүргізу барысында балықтың ет шикізатына қатынасы 30%-дан аспаған жағдайда

жалпы азот – 15,2%, амин азоты – 4,5%, құрғақ заттар – 13,5±0,5, гидролиз коэффициенті – 0,94 екені тағайындалды.

Зерттеулердің нәтижесінде, гидролиз процесін қысқарту және ақуызды толық ыдырауын қамтамасыз ету үшін және ақуыз гидролизатының биологиялық құндылығын барынша сақтайтын ферментті-қышқылды гидролиз әдісі таңдалды.

Осылайша, гидролиз процесін және ақуыздың толық ыдырауын азайту үшін ферментативті-қышқылдық гидролиз әдісі таңдалады, онда ақуыз гидролизатының биологиялық құндылығы максималды түрде сақталады.

3. Пептонды өндірудің технологиялық сызбасы әзірленді. Пептонның оңтайлы технологиялық параметрлері анықталды: гидролиздің ұзақтығы – 21 сағат, I кезең гидролизінің температурасы – 45^0C; II кезең – 50^0 C; белсенді қышқылдығы 6,9 бірлік және фермент концентрациясы 10% (шошқа асқазанының шырышты қабаты 8% және ұйқы безі 2%).

Әдебиеттер тізімі

1. Zamora-Sillero J. Peptides from fish by-product protein hydrolysates and its functional properties an overview / J. Zamora-Sillero, A. Gharsallaoui, C. Prentice // Mar. Biotechnol. NY. – 2018. – Vol. 20. – P. 118-130. https://doi.org/10.1007/s10126-018-9799-3.
2. Whey proteins as multifunctional food materials: Recent advancements in hydrolysis, separation, and peptidomimetic approaches / S. Saadi et al // Comprehensive reviews in food science and food safety. – 2024. – № 23. – P. 1. https://doi.org/10.1111/1541-4337.13288.
3. Biotechnological Valorization of Food Marine Wastes: Microbial Productions on Peptones Obtained from Aquaculture By-3. Products / J. Vázquez et al // Biomolecules. – 2020. – № 10. https://doi.org/10.3390/biom10081184.
4. A review on the processing of functional proteins or peptides derived from fish by-products and their industrial applications / S. Ramakrishnan et al // Heliyon. – 2023. – № 9. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14188
5. Brandelli A. Unconventional microbial proteases as promising tools for the production of bioactive protein hydrolysates / A. Brandelli, D. Daroit // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. – 2022. – № 64. – P. 4714 - 4745. https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2145262.
6. Ovsyannikov Y.S. Comparative evaluation of nutrient media based on protein hydrolysates / Y.S. Ovsyannikov, M.S. Dursenev // Veterinariya, Zootekhniya i Biotekhnologiya. – 2023. https://doi.org/10.36871/vet.zoo.bio.202309006.
7. Tishinov K. A Wasteless Method for Utilization of Bones and Other Wastes Obtained at Industrial Processing of Hens / K. Tishinov, P. Christov, P. Nedkov // Biotechnology & Biotechnological Equipment. – 2008. – № 22. https://doi.org/10.1080/13102818.2008.10817564.
8. Nikhita R. Optimization of chemical and enzymatic hydrolysis for production of chicken blood protein hydrolysate rich in angiotensin-I converting enzyme inhibitory and antioxidant activity / R. Nikhita, N. Sachindra // Poultry Science. – 2021. – № 100. https://doi.org/10.1016/j.psj.2021.101047.
9. Lim S. Organic Acid-Catalyzed Subcritical Water Hydrolysis of Immature Citrus unshiu Pomace / S. Lim // Foods. – 2021. – № 11. https://doi.org/10.3390/foods11010018.
10. Development of bioprocesses for the integral valorisation of fish discards / J. Vázquez et al // Biochemical Engineering Journal. – 2019/ https://doi.org/10.1016/j.bej.2019.02.004/
11. Biotechnological Valorization of Food Marine Wastes: Microbial Productions on Peptones Obtained from Aquaculture By-Products / J. Vázquez et al // Biomolecules. – 2020. – № 10. https://doi.org/10.3390/biom10081184.
12. Utilization of fish protein hydrolysates as peptones for microbiological culture medias / I. Petrova et al // Food bioscience. – 2021. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101063.

Қаржыландыру туралы ақпарат

Материалдар ҚР Ауыл шаруашылығы министрлігінің 2024-2026 жылдарының ғылыми, ғылыми-техникалық бағдарламаларына арналған бағдарламалық-мақсатты қаржыландыруы (BR24892775-ОТ-24) аясындағы «Тамақ өнеркәсібі мен биотехнологияда қолдану үшін еттің жанама өнімдерінен ақуызды гидролиздеу негізінде құрғақ пептон алу технологиясын әзірлеу» жобасын орындау барысында дайындалды.

Г.Е. Сыдыкова*, З.Т. Смагулова[1], К.Ю. Дербышев[2]
[1]Семейский филиалТОО «Казахский научно-исследовательский институт перерабатывающей и пищевой промышленности»,
071410, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Байтурсынова, 29
[2]Шәкәрім университет, 071412, Республика Казахстан, г.Семей, ул. Глинки 20 А
*e-mail: s.gulzhamal65@mail.ru

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ БЕЛКОВОГО ГИДРОЛИЗАТА (ПЕПТОНА) ИЗ ВТОРИЧНОГО МЯСНОГО И РЫБНОГО СЫРЬЯ

В статье представлены результаты исследований кислотно-ферментативного способа обработки вторичного белкового сырья. Целью работы является разработка технологических режимов и параметров получения сухого пептона на основе гидролиза белка с повышенной биологической активностью. Объектом исследования служили способы гидролиза. Изучено влияние гидролизующего действия ферментного комплекса животных протеаз на изменение свойств мясного и рыбного сырья. Определены оптимальные технологические режимы и параметры ферментативного гидролиза сырья. В исследованиях применялись общепринятые химические, органолептические, биохимические методы. Исследованы физико-химические, органолептические, биохимические показатели гидролизата. Установлено, что показатели качества белкового гидролизата соответствуют требованиям нормативных документов. Результаты исследований будут использованы при гидролизе белка при переработке животноводческого сырья. Вовлечение побочных продуктов в производство позволяет извлекать все ценные компоненты сырья, обеспечивает увеличение глубины гидролиза и его эффективность из-за повышения степени расщепления белковых фракций используемого мясного и рыбного сырья при обработке комплексом ферментов. Практическая значимость работы заключается в использовании предприятиями по переработке вторичного мясного и рыбного сырья усовершенствованной технологии белковых гидролизатов для использования их в качестве основ бактериальных питательных сред.

Ключевые слова: *ферментное сырье убойных животных, субпродукты, рыбное сырье, гидролиз, гидролизат белка, пептон.*

G.E. Sydykova*, Z.T. Smagulova[1], K.Y. Derbyshev[2]
[1]Semey Branch of JSC «Kazakh Scientific Research Institute of Processing and Food Industry», 071410, Republic of Kazakhstan, Semey, 29, Baitursynova Street,29
[2]Shakarym University, 071412, Republic of Kazakhstan, Semey city, Glinka street, 20 A
*e-mail: s.gulzhamal65@mail.ru

DEVELOPMENT OF A TECHNOLOGY FOR PRODUCING PROTEIN HYDROLYSATE (PEPTON) FROM SECONDARY MEAT AND FISH RAW MATERIALS

The article presents the results of research on the acid-enzymatic method of processing secondary protein raw materials. The aim of the work is to develop technological modes and parameters for the production of dry peptone based on protein hydrolysis with increased biological activity. The object of the study was hydrolysis methods. The effect of the hydrolyzing action of the enzyme complex of animal proteases on the change in the properties of meat and fish raw materials has been studied. Optimal technological modes and parameters of enzymatic hydrolysis of raw materials have been determined. Conventional chemical, organoleptic, and biochemical methods were used in the research. The physico-chemical, organoleptic, and biochemical parameters of the hydrolysate were studied. It has been established that the quality indicators of protein hydrolysate comply with the requirements of regulatory documents. The research results will be used in the hydrolysis of protein in the processing of livestock raw materials. The involvement of by-products in production makes it possible to extract all the valuable components of the raw material, provides an increase in the depth of hydrolysis and its effectiveness due to an increase in the degree of cleavage of protein fractions of meat and fish raw materials used during processing with a complex of enzymes. The practical significance of the work lies in the use by enterprises processing secondary meat and fish raw materials of an improved technology of protein hydrolysates for their use as the bases of bacterial nutrient media.

Key words: *enzyme raw materials from slaughtered animals, by-products, fish raw materials, hydrolysis, protein hydrolysate, peptone.*

Авторлар туралы мәліметтер

Гүлжамал Ерғалиқызы Сыдықова* – биология ғылымдарының кандидаты, «Қазақ қайта өңдеу және тамақ өнеркәсібі ғылыми-зерттеу институты» ЖШС Семей филиалы, Қазақстан Республикасы, Семей қ.; e-mail: s.gulzhamal65@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0917-1917.

Зәуреш Тұрсынханқызы Смағұлова – жаратылыстану ғылымдарының магистрі, «Қазақ қайта өңдеу және тамақ өнеркәсібі ғылыми-зерттеу институты» ЖШС Семей филиалы, Қазақстан Республикасы, Семей қ.; e-mail: zaure665@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2676-8208.

Камиль Юрьевич Дербышев – Ветеринария ғылымдарының магистрі, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы, Семей қ.; e-mail: kamil.derbyshev@mail.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6308-020X.

Сведения об авторах

Гульжамал Ергалиевна Сыдыкова* – кандидат биологических наук, Семейский филиал ТОО «Казахский научно-исследовательский институт перерабатывающей и пищевой промышленности», Республика Казахстан, г. Семей; e-mail: s.gulzhamal65@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0917-1917.

Зауреш Турсынхановна Смагулова – магистр естественных наук, Семейский филиал ТОО «Казахский научно-исследовательский институт перерабатывающей и пищевой промышленности», Республика Казахстан, г. Семей; e-mail: zaure665@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2676-8208.

Камиль Юрьевич Дербышев – магистр ветеринарных наук, Шәкәрім университет, Республика Казахстан, г. Семей; e-mail: kamil.derbyshev@mail.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6308-020X.

Information about the authors

Gulzhamal Ergalievna Sydykova* – candidate of biological sciences, Semey branch of LLP «Kazakh Research Institute of Processing and Food Industry», Republic of Kazakhstan, Semey; e-mail: s.gulzhamal65@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0917-1917.

Zauresh Tursynkhanovna Smagulova – Master of Natural Sciences, Semey branch of LLP «Kazakh Research Institute of Processing and Food Industry», Republic of Kazakhstan, Semey; e-mail: zaure665@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/ 0000-0002-2676-8208.

Kamil Yurievich Derbyshev – Master of Veterinary Sciences, Shakarim University, Republic of Kazakhstan, Semey; e-mail: kamil.derbyshev@mail.kz. ORCID: https://orcid.org/ 0000-0002-6308-020X.

Редакцияға енуі 01.06.2026
Өңдеуден кейін түсуі 03.07.2026
Жариялауға қабылданды 17.08.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-51

МРНТИ:62:99.29

А.Е. Татищева, **Ф.Ғ. Сағымбек***
[1]Қазақ ұлттық аграрлық зерттеу университеті,
050010, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Абай даңғылы, 8
*e-mail: fakosya.ru@mail.ru

МОЛОЧНОКИСЛЫЕ БАКТЕРИИ ПРОРОСТКОВ ПШЕНИЦЫ И ИХ БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ: ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

Аннотация: *Традиционные молочные продукты на протяжении длительного времени являлись основным источником молочнокислых бактерий (МКБ), однако современные тенденции развития пищевой биотехнологии, включая создание безлактозных и функциональных продуктов питания, обусловливают необходимость поиска альтернативных растительных источников этих микроорганизмов. Целью настоящего литературного обзора является обобщение современных научных данных о молочнокислых бактериях, ассоциированных с проростками пшеницы, анализ их биотехнологического потенциала, а также рассмотрение опубликованных методов их выделения и молекулярной идентификации. На основании анализа литературных источников рассмотрены особенности эндофитных молочнокислых бактерий родов Lactobacillus, Pediococcus и Weissella, обитающих в тканях пшеницы, а также их роль в процессах ферментации растительного сырья. Показано, что проростки пшеницы на ранней стадии развития (1-3 см) рассматриваются многими исследователями как перспективный объект для изучения эндофитных МКБ благодаря высокой*

©А.Е. Татищева, Ф.Ғ. Сағымбек, 2026

метаболической активности микроорганизмов и низкому уровню поверхностной контаминации. Обобщены сведения о способности описанных в литературе штаммов синтезировать биоактивные соединения, проявлять антиоксидантные и антимикробные свойства, а также повышать функциональную ценность зерновых продуктов. Сделан вывод о перспективности использования эндофитных молочнокислых бактерий проростков пшеницы при разработке функциональных продуктов питания нового поколения, технологий биоконсервации и новых растительных заквасок.

Ключевые слова: *молочнокислые бактерии; эндофиты; пшеница; проростки; биоконсервация.*

Введение

Молочнокислые бактерии (МКБ) представляют собой уникальную группу грамположительных, неспорообразующих микроорганизмов, играющих ключевую роль в мировой пищевой биотехнологии. Их ценность обусловлена способностью ферментировать углеводы с образованием молочной кислоты, а также синтезировать широкий спектр бактериоцинов, экзополисахаридов и витаминов, повышающих биологическую ценность продуктов [1-3].

В условиях глобального тренда на расширение линейки plant-based продуктов и рост числа потребителей с непереносимостью лактозы, поиск немолочных источников МКБ стал приоритетным направлением [4]. Долгое время считалось, что растительные субстраты содержат лишь случайную эпифитную микрофлору. Однако работы Minervini F. и соавт. доказали, что МКБ являются полноценными эндофитами пшеницы, присутствуя в тканях растения на всех этапах его жизненного цикла – от зерна до созревающего колоса [5]. Попадание микроорганизмов во внутренние ткани хозяина осуществляется преимущественно путем вертикального переноса от родительского растения через семена, а также посредством горизонтальной колонизации через корневую систему, устьица или гидатоды в процессе вегетации.

Ферментация цельнозерновых субстратов признана эффективным инструментом улучшения нутритивного профиля и биодоступности минеральных веществ, что подтверждается системными исследованиями Poutanen K. и соавт. [6].

Процесс прорастания зерна выступает мощным триггером, активирующим «спящие» эндофитные штаммы. В покоящемся сухом зерне эндофитная микрофлора часто находится в жизнеспособном, но некультивируемом состоянии (viable but non-culturable, VBNC). В этот период в зерне активируются ферментативные системы, увеличивается доступность простых сахаров и аминокислот, что выводит МКБ из состояния VBNC-анабиоза и создает оптимальную среду для колонизации тканей молочнокислыми бактериями [7,8]. Проростки пшеницы на ранней стадии развития (1-3 см) представляют особый интерес для выделения штаммов с уникальным биотехнологическим потенциалом [9].

Обсуждение

Молочнокислые бактерии характеризуются широкой экологической пластичностью. Если в классических исследованиях технологии традиционных заквасок основной акцент ставился на разнообразии МКБ, среди которых доминируют представители родов *Lactobacillus*, *Pediococcus*, *Leuconostoc* и *Weissella* [10], то современные изыскания все чаще смещают фокус на растительные источники. Экспериментально доказано, что штаммы, изолированные из ферментированной пшеницы, сочетают в себе ценные технологические свойства с выраженной антагонистической активностью в отношении патогенных микроорганизмов [11].

Исследования последних лет принципиально изменили подход к поиску молочнокислых бактерий, подтвердив существование эндофитных популяций *Lactiplantibacillus plantarum*, *Lacticaseibacillus casei* и *Pediococcus acidilactici* непосредственно внутри тканей пшеницы [5, 12].

Генетическое разнообразие этих видов, как отмечает Siezen R.J., напрямую зависит от их экологической ниши, что делает растительные эндофиты уникальным генетическим ресурсом [13].

Эффективность выделения таких штаммов обеспечивается строгим соблюдением протоколов поверхностной стерилизации (использование этанола и гипохлорита натрия), что

позволяет полностью исключить эпифитную (поверхностную) микрофлору [5, 12]. Последующая гомогенизация тканей и посев на оптимизированный MRS-агар создают условия для выхода бактерий из состояния покоя [14]. Для верификации результатов сегодня недостаточно только фенотипического описания; необходим филогенетический анализ с секвенированием 16S рРНК и применение методов RAPD-ПЦР для оценки внутривидовой вариабельности [12, 14]. При этом обязательным этапом скрининга выделенных изолятов (особенно представителей родов *Pediococcus* и *Weissella*, отдельные виды которых классифицируются как условные патогены) является оценка их биобезопасности. Перед промышленным внедрением штаммы должны быть проверены на отсутствие генов антибиотикорезистентности и гемолитической активности.

Анализ литературных данных показывает, что большинство исследователей используют сходную последовательность этапов выделения и идентификации эндофитных молочнокислых бактерий (табл. 1).

Таблица 1 – Основные этапы выделения и идентификации эндофитных молочнокислых бактерий по данным литературных источников

Наименование этапа	Технологические параметры и условия	Цель и ожидаемый результат	Источник
Подготовка сырья	Отбор проростков пшеницы длиной 1-3 см.	Обеспечение пиковой метаболической активности эндофитной микрофлоры.	[1, 7, 15]
Поверхностная стерилизация	Последовательная обработка 70% этанолом C_2H_5OH и 1-3% гипохлоритом натрия (NaOCl).	Удаление эпифитной (поверхностной) микрофлоры зерна для предотвращения контаминации образцов.	[2, 5]
Контроль стерильности	Посев последней промывочной воды на селективные и дифференциально-диагностические среды.	Подтверждение эффективности стерилизации поверхности и эндофитного происхождения будущих изолятов.	[12]
Гомогенизация	Механическое измельчение тканей в 0,85% растворе NaCl.	Высвобождение бактериальных клеток из тканей проростка.	[14]
Культивирование	Посев на селективный MRS-агар, инкубация при 37°C (48–72 ч).	Получение изолированных колоний молочнокислых бактерий.	[14, 16]
Идентификация	Микроскопия, секвенирование 16S рРНК, RAPD-ПЦР анализ.	Верификация видовой принадлежности и оценка генетического разнообразия штаммов.	[2, 4, 14]

Особое значение имеет стадия прорастания зерна. Активация ферментативных систем в этот период обеспечивает гидролиз крахмала до простых сахаров, служащих идеальным субстратом для МКБ [7]. Проращивание в сочетании с последующей ферментацией приводит к синергетическому эффекту:

- Синтез метаболитов: Штаммы *L. plantarum* при ферментации проростков пшеницы синтезируют уникальные антиоксиданты – 2-метоксибензохинон и 2,6 – диметоксибензохинон [17].
- Биодоступность: повышается усвояемость нутриентов и общая антиоксидантная стабильность продукта [16, 18].

Согласно данным Zhang J. и соавт., именно синергия процессов проращивания и последующей ферментации обеспечивает максимальный прирост антиоксидантной емкости и накопление свободных фенольных соединений в зерновом сырье [19].

Согласно опубликованным исследованиям, выделенные эндофитные штаммы обладают (особенно виды *Lactiplantibacillus plantarum* и *Pediococcus* spp.) обладают колоссальным потенциалом для «зеленой» химии и пищевой индустрии. Они позволяют:

1. Создавать безлактозные ферментированные напитки [4].
2. Снижать аллергенность пшеничных продуктов (глютеновую нагрузку) [8].

3. Обеспечивать биоконсервацию зерна, подавляя рост опасных грибов рода *Fusarium*, а также синтезировать широкий спектр антибактериальных метаболитов, эффективно действующих против патогенной микрофлоры [3 ,20].

Основные характеристики штаммов, описанных в литературе, и их потенциальное применение систематизированы в таблице 2.

Таблица 2 – Характеристика и биотехнологический потенциал эндофитных МКБ пшеницы

Вид МКБ	Источник / Стадия выделения	Ключевые свойства и метаболиты	Биотехнологическое значение	Источник
Lactiplantibacillus plantarum	Проростки пшеницы (1-3 см)	Синтез 2-метоксибензохинона, высокая антиоксидантная активность	Создание функциональных продуктов, онкопротекторные свойства	[16, 17, 19]
Pediococcus acidilactici	Эндофитные ткани зерна	Пробиотический потенциал, устойчивость к стрессу	Разработка безлактозных напитков, пробиотики	[4,13]
Lacticaseibacillus casei	Проростки пшеницы	Ферментация сложных углеводов, стабилизация липидов	Улучшение текстуры и срока хранения хлебобулочных изделий	[6,13]
Leuconostoc mesenteroides	Ферментиро-ванная пшеница	Синтез экзополисахаридов (ЭПС), антагонизм к патогенам	Биоконсервация, подавление грибов рода *Fusarium*	[11, 20]
Weissella spp.	Ткани злаков	Продукция органических кислот	Снижение аллергенности (глютеновой нагрузки)	[8, 10]

На основании глубокого анализа литературных данных, потенциал эндофитной микрофлоры отдельных структур зерна до сих пор остается недооцененным в промышленном масштабе. Несмотря на обилие работ по цельнозерновой ферментации, именно проростки пшеницы длиной 1-3 см должны стать фокусом будущих исследований.

Преимущество этой стадии заключается в биологическом синергизме: именно в этот короткий промежуток времени эндофиты успешно переходят из состояния VBNC в фазу активного логарифмического роста, а ткани проростка максимально насыщены легкоусвояемыми нутриентами. Это способствует выделению штаммов, которые уже «запрограммированы» на работу с растительным сырьем, что делает их гораздо более эффективными для производства безлактозных йогуртов или напитков, чем штаммы, адаптированные к молоку. Соблюдение жестких критериев отбора штаммов по факторам отсутствия трансмиссивных генов устойчивости к антибиотикам гарантирует микробиологическую безопасность готовых функциональных продуктов.

Кроме того, перспективным направлением является разработка комбинированных стартовых культур, состоящих исключительно из эндофитных микроорганизмов одного и того же растения. Это обеспечит высокую стабильность ферментации и позволит сохранить аутентичный биохимический профиль зерновых продуктов, минимизируя вмешательство чужеродных микроорганизмов.

Заключение

Анализ литературных данных свидетельствует о том, что пшеница является перспективным источником эндофитных молочнокислых бактерий, обладающих ценными биотехнологическими свойствами. Описанные в научных публикациях методы выделения и молекулярной идентификации позволяют эффективно обнаруживать и характеризовать эндофитные штаммы, ассоциированные с растительными тканями.

Согласно данным литературы, проростки пшеницы длиной 1-3 см рассматриваются как наиболее перспективный объект для изучения эндофитных МКБ благодаря высокой метаболической активности микроорганизмов и относительно низкому уровню поверхностной контаминации. Штаммы, описанные в опубликованных исследованиях, обладают выраженной

антиоксидантной и антимикробной активностью, а также демонстрируют высокий потенциал для применения в пищевой биотехнологии.

Таким образом, результаты анализа современной научной литературы подтверждают перспективность использования эндофитных молочнокислых бактерий проростков пшеницы при разработке функциональных продуктов питания, технологий биоконсервации и инновационных растительных заквасок.

Список литературы

1. Identification, safety assessment and probiotic potential of lactic acid bacteria isolated from wheat / W. Gao et al // Int. J. Food Microbiol. – 2025. https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2025.111436.
2. Fermented germinated whole wheat as a functional food ingredient / L.M. Beltrán-Barrientos et al // Food Chemistry. – 2021. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128756.
3. Antifungal activities of L. plantarum / A. Laitila et al // J. Appl. Microbiol. – 2002 – vol. 93, № 1. – P. 1-9.
4. Screening and characterization of lactic acid bacteria for functional fermented products / К.Ж. Тлеуова и др. // Микробиология және вирусология. – 2026. – № 1. – С. 10-18.
5. Lactic acid bacteria in durum wheat / F. Minervini et al // Appl. Environ. Microbiol. – 2015. – vol. 81, № 19. – P. 6736-6748. https://doi.org/10.1128/AEM.01852-15.
6. Sourdough and cereal fermentation in a whole grain diet / K. Poutanen et al // Food Microbiol. – 2009. – vol. 26, № 7. – P. 693-699.
7. Абугалиева А.И. Биохимические изменения зерна пшеницы при проращивании / А.И. Абугалиева, Т.В. Савин // Вестник сельскохозяйственной науки Казахстана. – 2020. – № 4. – С. 52-58.
8. Sourdough lactobacilli and celiac disease / M. Gobbetti et al // Food Microbiol. – 2014. – vol. 37. – P. 78-85.
9. Кенжебаева С.С. Особенности биохимического состава зародыша пшеницы / С.С. Кенжебаева // Пищевая технология и сервис. – 2019. – № 2. – С. 18-24.
10. Пономарева О.И. Молочнокислые бактерии в технологии производства кислых элей / О.И. Пономарева, Е.В. Борисова, И.П. Прохорчик // Вестник Международной академии холода. – 2018. – № 2. – С. 61-70.
11. Выделение молочнокислых бактерий, антагонистически активных против возбудителей порчи хлеба / А.А. Амангельди и др. // Микробиология және вирусология. – 2024. – Т. 46, № 3. – С. 306-320.
12. Садыкова Г.М. Биотехнологический потенциал молочнокислых бактерий растительного происхождения / Г.М. Садыкова, А.К. Нуртаева // Вестник КазНАИУ. – 2022. – № 2. – С. 74-81.
13. Phenotypic and genomic diversity of L. plantarum / R.J. Siezen et al // Environ. Microbiol. – 2010. – vol. 12, № 3. – P. 758-770.
14. Молочнокислые бактерии против антибиотикорезистентных патогенов / А.Ж. Алыбаева и др. // Микробиология және вирусология. – 2021. – № 2. – С. 45-52.
15. Жумабекова Г.Б. Антиоксидантная активность пророщенного зерна пшеницы и перспективы его применения / Г.Б. Жумабекова, А.Т. Байгазиева // Исследования, результаты. – 2021. – № 3(91). – С. 118-125.
16. Moiseenko K.V. Fermentation of rice, oat, and wheat flour by pure cultures of common starter lactic acid bacteria: growth dynamics, sensory evaluation, and functional properties / K.V. Moiseenko, O.A. Glazunova, T.V. Fedorova // Foods. – 2024. – vol. 13, № 15. – P. 2401. https://doi.org/10.3390/foods13152401.
17. Synthesis of methoxybenzoquinones by LAB during fermentation / C.G. Rizzello et al // Microb. Cell Factories. – 2013. – vol. 12, № 36. https://doi.org/10.1186/1475-2859-12-36.
18. Технология производства хлебобулочных изделий из муки тритикале с использованием закваски на основе молочнокислых бактерий / Л.Б. Умиралиева и др. // Микробиология және вирусология. – 2022. – № 1. – С. 88-95.
19. Effects of germination and fermentation on antioxidant capacity / J. Zhang et al // J. Cereal Sci. – 2022. – vol. 103. – P. 10340. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2021.10340.

20. Шорабаев Е.Ж. Влияние закваски на микробиологическую безопасность и качество хлебобулочных изделий / Е.Ж. Шорабаев, Е.С. Молдаханов // Микробиология және вирусология. – 2025. – № 1. – С. 112-121.

References

1. Identification, safety assessment and probiotic potential of lactic acid bacteria isolated from wheat / W. Gao et al // Int. J. Food Microbiol. – 2025. https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2025.111436. (in English).
2. Fermented germinated whole wheat as a functional food ingredient / L.M. Beltrán-Barrientos et al // Food Chemistry. – 2021. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128756. (in English).
3. Antifungal activities of L. plantarum / A. Laitila et al // J. Appl. Microbiol. – 2002 – vol. 93, № 1. – R. 1-9. (in English).
4. Screening and characterization of lactic acid bacteria for functional fermented products / K.Zh. Tleuova i dr. // Mikrobiologiya zhəne virusologiya. – 2026. – № 1. – S. 10-18. (in English).
5. Lactic acid bacteria in durum wheat / F. Minervini et al // Appl. Environ. Microbiol. – 2015. – vol. 81, № 19. – R. 6736-6748. https://doi.org/10.1128/AEM.01852-15. (in English).
6. Sourdough and cereal fermentation in a whole grain diet / K. Poutanen et al // Food Microbiol. – 2009. – vol. 26, № 7. – R. 693-699. (in English).
7. Abugalieva A.I. Biokhimicheskie izmeneniya zerna pshenitsy pri prorashchivanii / A.I. Abugalieva, T.V. Savin // Vestnik sel'skokhozyaistvennoi nauki Kazakhstana. – 2020. – № 4. – S. 52-58. (in Russian).
8. Sourdough lactobacilli and celiac disease / M. Gobbetti et al // Food Microbiol. – 2014. – vol. 37. – R. 78-85. (in English).
9. Kenzhebaeva S.S. Osobennosti biokhimicheskogo sostava zarodysha pshenitsy / S.S. Kenzhebaeva // Pishchevaya tekhnologiya i servis. – 2019. – № 2. – S. 18-24. (in Russian).
10. Ponomareva O.I. Molochnokislye bakterii v tekhnologii proizvodstva kislykh ehlei / O.I. Ponomareva, E.V. Borisova, I.P. Prokhorchik // Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda. – 2018. – № 2. – S. 61-70. (in Russian).
11. Vydelenie molochnokislykh bakterii, antagonisticheski aktivnykh protiv vozbuditelei porchi khleba / A.A. Amangel'di i dr. // Mikrobiologiya zhəne virusologiya. – 2024. – T. 46, № 3. – S. 306-320. (in Russian).
12. Sadykova G.M. Biotekhnologicheskii potentsial molochnokislykh bakterii rastitel'nogo proiskhozhdeniya / G.M. Sadykova, A.K. Nurtaeva // Vestnik KazNAIU. – 2022. – № 2. – S. 74-81. (in Russian).
13. Phenotypic and genomic diversity of L. plantarum / R.J. Siezen et al // Environ. Microbiol. – 2010. – vol. 12, № 3. – R. 758-770. (in English).
14. Molochnokislye bakterii protiv antibiotikorezistentnykh patogenov / A.Zh. Alybaeva i dr. // Mikrobiologiya zhəne virusologiya. – 2021. – № 2. – S. 45-52. (in Russian).
15. Zhumabekova G.B. Antioksidantnaya aktivnost' proroshchennogo zerna pshenitsy i perspektivy ego primeneniya / G.B. Zhumabekova, A.T. Baigazieva // Issledovaniya, rezul'taty. – 2021. – № 3(91). – S. 118-125. (in Russian).
16. Moiseenko K.V. Fermentation of rice, oat, and wheat flour by pure cultures of common starter lactic acid bacteria: growth dynamics, sensory evaluation, and functional properties / K.V. Moiseenko, O.A. Glazunova, T.V. Fedorova // Foods. – 2024. – vol. 13, № 15. – R. 2401. https://doi.org/10.3390/foods13152401. (in English).
17. Synthesis of methoxybenzoquinones by LAB during fermentation / C.G. Rizzello et al // Microb. Cell Factories. – 2013. – vol. 12, № 36. https://doi.org/10.1186/1475-2859-12-36. (in English).
18. Tekhnologiya proizvodstva khlebobulochnykh izdelii iz muki tritikale s ispol'zovaniem zakvaski na osnove molochnokislykh bakterii / L.B. Umiralieva i dr. // Mikrobiologiya zhəne virusologiya. – 2022. – № 1. – S. 88-95. (in Russian).
19. Effects of germination and fermentation on antioxidant capacity / J. Zhang et al // J. Cereal Sci. – 2022. – vol. 103. – R. 10340. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2021.10340. (in English).
20. Shorabaev E.Zh. Vliyanie zakvaski na mikrobiologicheskuyu bezopasnost' i kachestvo khlebobulochnykh izdelii / E.Zh. Shorabaev, E.S. Moldakhanov // Mikrobiologiya zhəne virusologiya. – 2025. – № 1. – S. 112-121. (in Russian).

А.Е. Татищева, Ф.Ғ. Сағымбек*
[1]Қазақ ұлттық аграрлық зерттеу университеті,
050010, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Абай даңғылы, 8
*e-mail: fakosya.ru@mail.ru

БИДАЙ ӨСКІНДЕРІНДЕГІ СҮТҚЫШҚЫЛДЫ БАКТЕРИЯЛАР ЖӘНЕ ОЛАРДЫҢ БИОТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ ӘЛЕУЕТІ: ӘДЕБИЕТКЕ ШОЛУ

Дәстүрлі сүт өнімдері ұзақ уақыт бойы сүтқышқылды бактериялардың (СҚБ) негізгі көзі болып келді. Алайда қазіргі тағамдық биотехнологияның даму үрдістері, оның ішінде лактозасыз және функционалды тағам өнімдерін жасау, осы микроорганизмдердің балама өсімдік текті көздерін іздеу қажеттілігін туындатады. Осы әдеби шолудың мақсаты – бидай өскіндерімен ассоциацияланған сүтқышқылды бактериялар туралы заманауи ғылыми мәліметтерді жинақтау, олардың биотехнологиялық әлеуетін талдау, сондай-ақ оларды бөліп алу және молекулалық идентификациялаудың жарияланған әдістерін қарастыру. Әдеби деректерді талдау негізінде бидай ұлпаларында мекендейтін Lactobacillus, Pediococcus және Weissella туыстарына жататын эндофитті сүтқышқылды бактериялардың ерекшеліктері, сондай-ақ олардың өсімдік шикізатын ферментациялау үдерістеріндегі рөлі қарастырылды. Ғылыми жарияланымдарға сәйкес, бидай өскіндерінің ерте даму кезеңі (ұзындығы 1–3 см) эндофитті СҚБ зерттеу үшін перспективалы нысан ретінде қарастырылады, себебі бұл кезең микроорганизмдердің жоғары метаболикалық белсенділігімен және сыртқы микрофлорамен ластану деңгейінің төмен болуымен сипатталады. Әдебиеттерде сипатталған штамдардың биоактивті қосылыстарды синтездеу, антиоксиданттық және антимикробтық қасиеттер көрсету, сондай-ақ дәнді дақылдар негізіндегі өнімдердің функционалдық құндылығын арттыру қабілеттері туралы мәліметтер жинақталды. Қорытындылай келе, бидай өскіндерінен ассоциацияланған эндофитті сүтқышқылды бактерияларды жаңа буын функционалды тағам өнімдерін, биоконсервация технологияларын және жаңа өсімдік текті ашытқыларды әзірлеуде қолдану перспективалы бағыт болып табылады.

Түйін сөздер: *сүт қышқылды бактериялар, эндофиттер, бидай, өскіндер, биоконсервация.*

A. Tatisheva, F. Sagymbek*
Kazakh National Agrarian Research University,
8 Abay Avenue, Almaty 050010, Republic of Kazakhstan
*e-mail: fakosya.ru@mail.ru

LACTIC ACID BACTERIA OF WHEAT SPROUTS AND THEIR BIOTECHNOLOGICAL POTENTIAL: A LITERATURE REVIEW

Traditional dairy products have long served as the primary source of lactic acid bacteria (LAB). However, current trends in food biotechnology, including the development of lactose-free and functional foods, have highlighted the need to identify alternative plant-based sources of these microorganisms. The aim of this literature review is to summarize current scientific knowledge on lactic acid bacteria associated with wheat sprouts, analyze their biotechnological potential, and review published methods for their isolation and molecular identification. Based on an analysis of the available literature, the characteristics of endophytic lactic acid bacteria belonging to the genera Lactobacillus, Pediococcus, and Weissella inhabiting wheat tissues, as well as their role in the fermentation of plant-derived substrates, are discussed. The reviewed studies indicate that wheat sprouts at the early stage of development (1-3 cm in length) are considered a promising source for the investigation of endophytic LAB due to their high microbial metabolic activity and low level of surface contamination. Published data demonstrate that these strains are capable of producing bioactive compounds, exhibiting antioxidant and antimicrobial activities, and enhancing the functional properties of cereal-based products. Overall, the available evidence suggests that endophytic lactic acid bacteria from wheat sprouts have considerable potential for the development of next-generation functional foods, biopreservation technologies, and novel plant-based starter cultures.

Key words: *lactic acid bacteria, endophytes, wheat, sprouts, biopreservation.*

Сведения об авторах

Айсулу Ермековна Татищева – Казахский национальный аграрный исследовательский университет, студент-магистрант кафедры «Зооинженерия и биотехнология», Республика Казахстан, г. Алматы; e-mail: tatichsheva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-1391-9377.

Фатима Ғабитқызы Сағымбек* – PhD, Казахский национальный аграрный исследовательский университет, старший преподаватель кафедры «Зооинженерия и биотехнология», Республика Казахстан, г. Алматы, e-mail: fakosya.ru@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9925-8527.

Авторлар туралы мәліметтер

Айсулу Ермековна Татищева – Қазақ ұлттық аграрлық зерттеу университеті, «Зооинженерия және биотехнология» кафедрасының магистранты, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.; e-mail: tatichsheva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-1391-9377.

Фатима Ғабитқызы Сағымбек – PhD, Қазақ ұлттық аграрлық зерттеу университеті, «Зооинженерия және биотехнология» кафедрасының аға оқытушысы, Қазақстан Республикасы, Алматы қаласы; e-mail: fakosya.ru@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9925-8527.

Information about the authors

Aisulu Tatichsheva – Kazakh National Agrarian Research University, master's student of the Department of «Zooengineering and Biotechnology», Republic of Kazakhstan; e-mail: tatichsheva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-1391-9377.

Fatima Sagymbek* – PhD, Kazakh National Agrarian Research University», Senior Lecturer of the Department of «Zooengineering and Biotechnology», Republic of Kazakhstan, Almaty; e-mail: fakosya.ru@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9925-8527.

Поступила в редакцию 01.06.2026
Поступила после доработки 08.07.2026
Принята к публикации 17.08.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-52

МРНТИ: 65.09.03

Д.Б. Тоймбаева*, С.А. Садуахасова, Д.Д. Хамитова, Г.Х. Оспанкулова
С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті,
010000, Қазақстан Республикасы, Астана қ., Жеңіс даңғылы, 62
*e-mail: bio.dana@mail.ru

АМАРАНТ ДӘНІНІҢ ХИМИЯЛЫҚ ЖӘНЕ ФИЗИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІ

Аңдатпа: *Клиникалық мақсаттағы өнімдерді өндіруде емдік қасиеті бар, тағамдық және биологиялық құндылығы жоғары, әртүрлі ауруларды алдын алуға ықпал ететін шикізат түрлеріне соңғы уақытта ғалымдардың назары артып келеді. Нарықтағы көптеген дақылдармен салыстырғанда химиялық құрамы жағынан ерекше және тағамдық құндылығы жоғары шикізаттардың бірі амарант дәні болып табылады. Осыған орай, бұл жұмыста амарант дәндерінің химиялық құрамы мен функционалдық қасиеттері зерттелініп, оның клиникалық мақсаттағы өнімдер өндірісінде қолданылу мүмкіндіктері мен маңыздылығы бағаланды. Зерттеу нәтижесінде амарант дәндері, әсіресе астық дақылдарында жетіспейтін лизинге бай, сондай-ақ треонин, валин және басқа алмастырылмайтын аминқышқылдары да жеткілікті мөлшерде екендігі анықталынды. Минералдардың ішінен кальций, магний, темір және калий жоғары мәнді көрсетті, ал дәрумендердің ішінен Е дәруменінің жоғары мөлшері анықталынды және 1 кг шаққандағы мөлшері 11,29 мг құрады. Амарант липидтерінің май қышқылдық құрамында зерттеу нәтижелері көрсеткендей, қанықпаған май қышқылдарының қаныққан қышқылдардан басым екендігі анықталынды. Қанықпаған май қышқылдарының ішінен линол қышқылы мен олейн қышқылдарының мөлшері басым екендігі зерттелініп, сәкесінше 34,56% және 24,82% көрсетті. Сонымен қатар амарант дәндерінде уытты заттар (Pb, As, Cd, Hg) мөлшері анықталмады. Осылайша, амарант дәндері жоғарыда атап өткен қасиеттері бойынша тағамдық және функционалдық қасиеттерінің жоғары екендігі анықталып, алдағы уақытта мамандандырылған өнімдер, яғни энтералды тамақтануға қолданылатылатын қолайлы өсімдік шикізаты ретінде қарастыруға негіз бола алады.*

Түйін сөздер: *Амарант, ақуыз, аминқышқылдары, май қышқылдары, минералдар,дәрумендер, энтеральды тамақ, функционалдық қасиеттер.*

Кіріспе

Амарант дәндері көптеген дақылдармен салыстырғанда химиялық құрамы мен оның ерекшелігі, тағамдық құндылығы, әрі түрлі агроклиматтық зоналарға төзімділігі жағынан соңғы

©Д.Б. Тоймбаева, С.А. Садуахасова, Д.Д. Хамитова, Г.Х. Оспанкулова, 2026

онжылдықта көпшіліктің назарын аударуда [1]. Бұл азық-түлік қауіпсіздігін нығайтуға септігін тигізеді, сонымен қатар мамандандырылған емдік және ауруды алдын алатын қасиеті бар тағам өнімдерін әзірлеуде әлеуеті жоғары. Амарант теңгерімді аминқышқылдық құрамымен, барлық алмастырылмайтын аминқышқылдарының болуымен, глютеннің жоқтығымен, сондай-ақ тағамдық талшықтардың, антиоксиданттардың (полифенолдар, сквален, α-токоферол), макро- және микроэлементтердің (темір, кальций, магний, мырыш), фитохимиялық қосылыстардың және биобелсенді пептидтердің жоғары мөлшерімен ерекшеленеді [2-7]. 1970-жылдары АҚШ Ұлттық ғылымдар академиясы амаранттың үш түрін (*A. caudatus*, *A. cruentus* және *A. hypochondriacus*) селекцияда әрі қарай қолдануға зор әлеуеті бар негізгі азық-түлік көздері ретінде бөліп көрсеткен болатын [8]. Олардың жабайы түрлері *A. powellii* мен *A. hybridus* болып саналады [9]. Қазіргі уақытта азық-түлік өнеркәсібінде негізінен *A. cruentus*, *A. caudatus* және А*. hypochondriacus* түрлері пайдаланылады, олар Солтүстік және Оңтүстік Америкада, Еуропада, Азияда және Африкада кеңінен өсіріледі [10]. Амарант қолайсыз орта жағдайларына жоғары төзімділік танытады және тұзды, сілтілі ортада өсе алады, жоғары температураға, ылғал тапшылығына және биік таулы жағдайларғы шыдайды [11, 12]. Сонымен қатар бұл дақыл зиянкестерге төзімді болып келеді. Бұл оны химиялық өңдеусіз-ақ өсіруге мүмкіндік беретін экологиялық тұрғыдан тұрақты дақыл ретінде сипаттайды. Қоректік заттардың мөлшері бойынша амарант көптеген дәстүрлі дақылдардан асып түседі. Оның дәнінде ақуыздың деңгейі жоғары (13-21%) [13], әрі протеиннің 65%-ға жуығы эндоспермде емес, дәннің ұрығы мен қабығында шоғырланған [14]. Ақуыздық кешеннің негізін альбуминдер мен глобулиндер құрайды [15, 16]. Олар жоғары сіңімділігімен және алмастырылмайтын аминқышқылдарының толық құрамымен ерекшеленеді. Әсіресе лизиннің мөлшері дәстүрлі астық дақылдарыннан екі есе жоғары [2]. Амарант дақылының құрамындағы пептидтер көптеген функционалдық қасиеттерге ие, атап айтқанда қандағы холестерин деңгейін, қан қысымын төмендетеді, сондай-ақ антиоксиданттық және микробтарға қарсы белсенділік көрсетеді [17]. Дәннің көмірсулар кешені негізінен крахмалдан (>60%) тұрады, оның амилоза үлесі 4,7-12,5% аралығында болады [18-20]. Моно- және олигосахаридтердің (глюкоза, фруктоза, сахароза, раффиноза) мөлшері құрғақ затта 3-4%-ды құрайды, ал олардың ішінде негізгі компонент – сахароза оның деңгейі дәстүрлі астық дақылдарымен салыстырғанда шамамен екі есе жоғары [21]. Амарант дәні липид алмасуын реттеуге ықпал ететін, гипотриглицеридемиялық әсері бар тағамдық талшықтарға да бай [1]. Амаранттың липидтік фракциясы триацилглицеролдардан, фосфолипидтерден, скваленнен және майда еритін дәрумендерден, ең алдымен токоферолдардан тұрады [21]. Скваленнің мөлшері дәннің липидтік фракциясының 11%-ына дейін жетуі мүмкін және ол айқын антиоксиданттық, радиопротекторлық және кардипротекторлық қасиеттерге ие. Артықшылықтарына қарамастан, амарант әлі де дәнді дақыл ретінде шектеулі қолданылады, дегенмен оның азық-түлік өнеркәсібінде зор әлеуеті бар [22,23]. Амарантты термиялық және биотехнологиялық өңдеу оның сіңімділігін арттырумен қатар, антиоксиданттық белсенділігін және биобелсенді қосылыстарының биологиялық сіңімділігін күшейтеді [24-26]. Жүргізілген әдеби шолудың негізінде амарант дәнінің қоректік негізі көптеген мамандандырылған тағам түрлерін әзірлеуде таптырмас шикізат екендігін көруге болады. Алайда толыққанды клиникалық өнімдерде, яғни энтералды өнімдерде қолдану мүмкіндігін әлі де зерттеу қажет. Амарант дәнінің химиялық құрамы әр түрлі климаттық, генотиптік және агротехнологиялық ерекшеліктерге байланысты әр түрлі болатындықтан оның химиялық құрамын зерттеу маңызды болып табылады. Сол себепті, жұмыстың мақсаты амарант дәнінің құрамындағы ақуыз, көмірсу, май және минералды заттар мен дәрумендердің мөлшерін зерттеу арқылы мамандандырылған арнайы емдік қасиеті бар өнім әзірлеуде таптырмас өсімдік шикізаты екендігін ғылыми тұрғыда негіздеу болып саналады

Зерттеу әдістері

Зерттеу нысаны ретінде амарант дәндері алынды. Ақуыздың массалық үлесі AOAC 2001.11 стандартына сәйкес Кьельдаль әдісімен анықталды [27].

Май қышқылдарының құрамы жалынды-ионизациялық детектормен біріктірілген газдық хроматография әдісі арқылы, [28] сипатталған әдістемеге сәйкес анықталды.

Тиаминнің, Е дәрумені және оның дәрумен формаларының (альфа-токоферол, бета-токоферол және дельта - токоферол), сондай-ақ А дәруменнің және формаларының (ретинол all-trans және 13-cis ретинол) мөлшері [29] әдістемесіне сәйкес анықталынды.

Үлгілердегі минералды элементтердің (Ca, P, Fe, Na, K және Zn) мөлшері атомдық-абсорбциялық спектрофотометр көмегімен анықталынды [30]. Минералды заттарды анықтау титриметриялық әдіспен, Р 4.1.1672-03 [31] бойынша спектрометриялық әдіспен, сондай-ақ МЕМСТ 30178 [32] және МЕМСТ Р 55484 [33] стандарттарына сәйкес жүргізілді. Қауіпсіздік көрсеткіштері СанПиН 2.3.2. 1078-01 [34] нормаларына сәйкес бағаланды.

Көмірсулардың массалық үлесі МЕМСТ 26176-2019 «Азықтар, құрама жемдер. Еритін және жеңіл гидролизденетін көмірсуларды анықтау әдістері» стандартына сәйкес перманганатометриялық әдіспен анықталды. Аминқышқылдық құрамы М 04-38-2009 әдістемесіне сәйкес «Капель М-105» құрылғысында капиллярлық зоналық электрофорез әдісімен анықталды. Ұнның күлділігі МЕМСТ 27494-2016 «Ұн мен кебек» стандартына сәйкес анықталды. Ылғалдылық МЕМСТ 13586.5-2015 «Дән. Ылғалдылықты анықтау әдісі» сандарты бойынша анықталды. Майдың мөлшері МЕМСТ 15113.9-77 «Тағамдық концентраттар. Майды анықтау әдістері» стандартына сәйкес Сокслет әдісімен анықталды.

Зерттеу нәтижелері

Ұсынылған зерттеу жұмыстары амарант дақылының химиялық құрамы, тағамдық және биологиялық құндылығы кешенді түрде зерттеліп, талданды. Зерттеу жұмыстарының нәтижесінде шикізаттың негізгі химиялық құрамы, дәрумендер мен минералдардың, амин қышқылдары мен май қышқылдарының құрамы, сонымен қатар уытты элементтерінің көрсеткіштері де анықталынды. Алынған мәліметтер амарант дақылының биологиялық құндылығы мен функционалдық қасиеттерін сипаттауға және олардың энтералды тамақтануға арналған мамандырылған өнімдер технологиясын әзірлеуде қолданудың ғылыми негізін қалайды. Зерттеу нәтижелері көрстекендей амарант дақылының химиялық құрамынынң негізгі көрсеткіштері 1-кестеде көрсетілген.

Кесте 1 – Амарант дақылының негізгі химиялық құрамы (100 г)

Көрсеткіштер (құрғақ массаға қайта есептегенде)	Мөлшері
Ылғалдылығы (%)	8,93±0,06
Күлділігі (%)	3,81±0,24
Май (%)	12,17±0,4
Ақуыз (%)	20,35±1,8
Көмірсу (%)	51,54±2,2
Талшық (%)	3,2±0,2
Энергетикалық құндылығы (100 г/ккал)	397,09±3,8

1-кестеде ұсынылған мәліметтерге сәйкес, амарант дақылының құрамындағы ақуыздың массалық үлесі 20,35±1,8%, майдың мөлшері 12,17±0,4% екені анықталынды. Сонымен қатар үлгідегі көмірсу мөлшері – 51,54±2,2% көрсетсе, күлділігі мен талшық мөлшері сәйкесінше 3,81±0,24% және 3,2±0,2% көрсетті. Амарант дақылының 100г/ккалл шаққандағы энергетикалық құндылығы 397,09±3,8% құрады, бұл көрсеткіш жоғары ақуыз және май мөлшеріне тікелей байланысты.

Амарант дақылдарының құрамынан анықталған минералды заттар мен дәрімендердің мөлшері 2-кестеде көрсетілген.

Берілген мәліметтерге сай, амарант дақылында алмастырылмайтын минералдардың айтарлықтай мөлшері анықталынды, оның ішінде 100 г шаққандағы магний, кальций, темір мөлшері сәйкесінше 684±3,16 мг, 1150±7,4 мг, 121±2,5 мг тең болды. Сондай-ақ, амарант дақылының құрамында 1950±3,9мг құрайтын калийдің жоғарғы мөлшері де байқалды. Микроэлементтердің мөлшері бойынша мыс 188±2,6 мг құраса, молибден 440±5,1 деңгейінде болуы шикізат жоғары антиоксиданттық қасиетке ие екендігін білдіреді. В тобының дәрумендер кешенінің 1 кг шаққандағы жалпы мөлшері 2,89 мг құрайды, оның ішінде В1 (тиамин) – 1,27±0,12 мг құрап, ең жоғарғы мәнге ие болса, В6 (пиридоксин) – 0,08±0,1 мг мөлшері құрап, ең төменгі мәнге ие болды. Бұдан бөлек С (аскорбин қышқылы) анықталынып, оның мәні – 0,44±0,8 мг құрады. Е дәрімені басқа дәрімендерге қарағанда жоғары көрсеткішті көрсетіп, мәні – 11,99±1,19 мг құрады.

Зерттеу барысында амарант дақылының құрамындағы аминқышқылдар мөлшері де анықталынды (3-кесте).

Кесте 2 – Амарант дәндерінің тәжірибелік үлгілеріндегі минералды заттар мен дәрумендердің мөлшері

Көрсеткіштер	Өлшем бірлігі	100 г шаққандағы мөлшері
Минералды заттар:		
Кальций (Ca)	мг	1150±7,4
Темір (Fe)	мг	121±2,5
Магний (Mg)	мг	684±3,16
Калий (K)	мг	1950±3,9
Марганец (Mn)	мг	241±4,2
Молибден (Mo)	мг	440±5,1
Мыс (Cu)	мг	188±2,6
Натрий (Na)	мг	0±0
Дәрумендер:	Өлшем бірлігі	1 кг шаққандағы мөлшері
C (аскорбин қышқылы)	мг	0,44±0,8
B1 (тиамин)	мг	1,27±0,12
B2 (рибофлавин)	мг	0,87±0,08
B3 (ниацин)	мг	0,56±0,05
Жалпы фолат мөлшері	мкг	7,65±1,4
E (альфа-токоферол)	мг	11,99±1,19
B6 (пиридоксин)	мг	0,08±0,1
B9 (фолат)	мг	0,11±0,01

Кесте 3 – Амарант дақылының аминқышқылдар мөлшері

Аминқышқылдары	Массалық үлесі, %
Аргинин	2,005±0,07
Лизин	1,115±0,2
Тирозин	0,621±0,09
Фенилаланин	0,788±0,03
Гистидин	0,638±0,5
Лейцин и Изолейцин	0,937±0,4
Метионин	0,418±0,02
Валин	0,761±0,01
Пролин	0,881±0,9
Треонин	0,848±0,07
Серин	1,445±0,3
Аланин	0,781±0,9
Глицин	1,758±0,1

Амарант дақылының ақуыз құрамындағы аминқышқылдар мөлшері анықталынды (3-кесте). Зерттеу нәтижесінде амарант дақылының аминқышқылдар құрамына бай екенін көруге болады. Аминқышқылдарының ішінде аргинин (2,005±0,07%), глицин (1,758±0,1%), серин (1,445±0,3%) және лизин (1,115±0,2 %) максималды мөлшерді құрады. Бұған қоса амарант дақылының аминқышқылдарының құрамынан алмастырылмайтын аминқышқылдарына жататын фенилаланин (0,788±0,2%), лейцин/изолейцин (0,937±0,4%), метионин (0,418±0,02%), валин (0,761±0,01%), треонин (0,848±0,07%) және гистидин (0,638±0,5%) амин қышқылдары анықталынды. Пролин (0,881±0,9%), аланин (0,781±0,9%) және тирозин (0,621±0,09%) сияқты алмастырылмайтын аминқышқылдары да шамалас мөлшерде табылды. Метионин (0,418±0,02%) ең төменгі мөлшерді құрады, бұл өсімдік ақуыздарының аминқышқылдары құрамының жалпы сипаттамаларына сәйкес келеді. Зерттеу нәтижесінде амарант дақылы алмастырылмайтын аминқышқылдарын толық қамтитынын байқауға болады, бұл амарант ақуызының биологиялық толыққандылығын көрсетеді.

Амарант дәндерінің май қышқылдық құрамын талдау нәтижесінде әр түрлі май қышқылдары, яғни қаныққан, моноқанықпаған және көпқанықпаған май қышқылдары анықталынды (4-кесте).

Кесте 4 – Амарант дәнінің липидтік құрамындағы май қышқылдарының мөлшері

Май қышқылы	Атауы	Мөлшері, %
C14:0	Мирист қышқылы	0,11±0,06
C16:0	Пальмитин қышқылы	30,1±1,75
C16:1n-7	Пальмитолеин қышқылы	2,54±0,01
C18:0	Стеорин қышқылы	4,2±1,58
C18:1n-9	Олеин қышқылы	24,8±1,44
C18:2n-6	Линол қышқылы	34,55±1,38
C18:3n-6	γ – линолен қышқылы	1,38±0,03
C18:3n-3	Линолен қышқылы	0,53±0,02
C22:4n-6	Докозатетраен қышқылы	0,07±0,02
C22:5n-3	7,10,13,16,19 – докозатетраен қышқылы	0,57±0,13
C22:6n-3	Цис – 1,7,10,13,16,19 – докозатетраен қышқылы	0,07±0,02

4-кестедегі мәліметтерді саралай келе,амарант липидтерінің құрамында линол қышқылының (C18:2n-6) үлесі басым екені анықталды (34.55%). Бұл көрсеткіш өнімнің тағамдық құндылығын көрсетеді. Сонымен қатар, моноқанықпаған май қышқылы, яғни олеин қышқылының (24,82%) жоғары концентрациясы майдың тотығуға төзімділігін арттырып, оның тұрақтылығын қамтамасыз етеді. Қаныққан май қышқылдарына жататын пальмитин қышқылының (30,11) жоғары мөлшері байқалды. Бұл көрсеткіш функционалдық маңызын арттырып қана қоймай, амарант липидтерінің құрылымдық тұтастығы мен энергиялық құндылығын сипаттайды.

Ауыл шаруашылығы дақылдарын өсіру кезінде қолданылатын пестицидтер, гербицидтер, тыңайтқыштар уытты элементтермен өнімді ластауы мүмкін. Мышьяк, сынап, кадмий, қорғасын сияқты элементтердің адам ағзасынан баяу шығуы ауыр,сондықтан улану түрлерінің пайда болуына әкеледі. Сол себепті өсімдік шикізаты уытты элементтердің сандық құрамына сараптама жүргізу қажет. Уытты элементтердің мөлшері 5-кестеде ұсынылды.

Кесте 5 – Амарант дақылының тәжірибелік үлгілеріндегі уытты элементтердің мөлшері

Көрсеткіштер атауы	Мөлшері	Нормалық көрсеткіштері	Нормативтік құжаттарға сәйкес сынақ әдістері
Свинец,Pb,мг/кг,артық емес	0	0,5	МЕМСТ 30178-96
Мышьяк,As,мг/кг,артық емес	0	0,5	МЕМСТ 31266-04
Кадмий,Cd,мг/кг, артық емес	0	0,1	МЕМСТ 30178-96
Ртуть,Hg,мг/кг,артық емес	0	0,05	МЕМСТ 26927-86

5-кестеде көрсетілген мәліметтерге сәйкес, амарант дәндерінің тәжірибелік үлгілілерінде уытты элементтердің жоқтығын көруге болады. Алынған нәтижелер зерттеу үлгісінің жоғарғы экологиялық тазалығын сипаттайды және мамандандырылған тағам өнімдерін дайындауда қауіпсіз шикізат ретінде қолдануға мүмкіндік береді.

Ғылыми зерттеулерді талқылау

Зерттеу нәтижесінде амарант дәндерінің тағамдық және биологиялық құндылығы жағынан да жоғарғы көрсеткіштерді көрсетті. Бұл қасиеттер амарант дәндерінің тек тағам өндірісінде ғана емес, емдік және ауруларды алдын алатын клиникалық өнімдерді, яғни мамандандырылған өнімдерді өндіруде негізгі шикізат көзі ретінде қарастыруға мүмкіндік береді. Сонымен қатар дәстүрлі дәнді дақылдармен салыстырғанда ақуыз мөлшерінің жоғары екендігі анықталынды, ұқсас көрсеткіштер Aguilar E. G. және т.б. еңбегінде көрсетілген [35,36]. Аминқышқылдарын зерттеу барысында ақуыз негізі толыққанды аминқышқылдық профильге (слизин, треонин, валин және т.б.) ие екендігі белгілі болды. Әсіресе астық дақылдарында жетіспейтін [37, 38] лизиннің жоғары деңгейде, сондай-ақ треонин, валин және басқа алмастырылмайтын аминқышқылдары жеткілікті мөлшерде екендігі анықталынды [39, 40]. Сонымен қатар, аргинин, глицин және серин сияқты аминқышқылдарының жоғары мөлшері де көзге түсті. Бұл иммунитетті көтеруге және фермент синтезіне ықпал етеді [41-43].

Минералдардың ішінен кальций, магний, темір және калий жоғары мәнді көрсетті, бұл өз кезегінде қан қысымын, жүрек ырғағын реттеп, атеросклероздың даму қауіпін төмендетеді [44]. Анықталған дәрумендердің ішінен Е дәруменінің жоғары мөлшері Lehmann J. W. және т.б.

зерттеу жұмыстарымен сәйкес келеді [45]. В тобы дәрумендерінің де жоғары мөлшері анықталынды. Бұл дәрумендердің жоғары мөлшері энергия алмасуды қамтамасыз етіп қана қоймай, жүйке жүйесінің жұмыстарын, антиоксиданттық қорғанысты да жақсартады [46-49]. Май қышқылдарын зерттеу барысында қанықпаған май қышқылдары қаныққан май қышқылдарынан басым екендігі анықталынды, бұл Procopet O. және т.б. жұмыстарына сәйкес болды [50]. Амарант дәндерінің май қышқылдық құрамын зерттеу барысында қанықпаған май қышқылдары қаныққан май қышқылдарына қарағанда жоғары екендігі анықталды, бұл зерттеу жұмысы Nasirpour-Tabrizi P. және т.б. еңбектерімен сәйкес келеді [51]. Май қышқылдарының ішінде пальмитин, линол және олеин қышқылдарының басым екендігі анықталды, бұл нәтиже Venskutonis P. R. және т.б зерттеулерімен сәйкес келді [52]. Мұндай май қышқылдарының басым болуы денсаулыққа оң әсер береді [53], яғни жүрек-қан тамыр жүйесін жақсартуға [54], холестеринді төмендетуге [54, 55] септігін тигізеді.

Қорытынды

Жүргізілген зерттеу жұмыстарының нәтижесін қорытындылай келе, амарант дәндерінің физико-химиялық құрамының ерекше және биологиялық, тағамдық құндылығы жоғары екендігі белгілі болды. Бұл шикізат мамандандырылған өнім, яғни энтералды тағам өндірісінде негіз ретінде қолдану мүмкіндігі бағаланды. Оның құрамындағы ақуыз, аминқышқылдары, май қышқылдары, минералдар және дәрумендер кешені энтеральды тамаққа қажетті макро- және микроэлементтердің толыққанды түсуін қамтамасыз етеді. Осылайша, амарант дәндері жоғарыда атап өткен қасиеттері бойынша энтералды тамақтануға қолданылатылатын өсімдік негізіндегі сусынның негізі ретінде ең қолайлы шикізат болып табылады.

Әдебиеттер тізімі

1. Emerging opportunities in exploring the nutritional/functional value of amaranth / L.M. Coelho et al // Food & Function. – 2018. – Т. 9, № 11. – P. 5499-5512.
2. A comprehensive exploration of compositional characteristics, bioactive compounds, anti-nutritional factors, and food applications of amaranths / R. Kour et al // Journal of Applied Biology & Biotechnology. – 2025. – Т. 14, № 10.7324.
3. Nutritional and Bioactive Characterization of Amaranthaceae Seeds From Peru, Slovakia, and Poland: A Comparative Study / E.D. Osei et al // Food Science & Nutrition. – 2025. – Т. 13, № 9. – P. e70901.
4. A review on amaranth protein: composition, digestibility, health benefits and food industry utilisation / S.L. Rivero Meza et al // International Journal of Food Science and Technology. – 2023. – Т. 58, № 3. – P. 1564-1574.
5. Tang Y. Phytochemicals in quinoa and amaranth grains and their antioxidant, anti-inflammatory, and potential health beneficial effects: a review / Y. Tang, R. Tsao // Molecular nutrition & food research. – 2017. – Т. 61, № 7. – P. 1600767.
6. Amaranth and quinoa as potential nutraceuticals: A review of anti-nutritional factors, health benefits and their applications in food, medicinal and cosmetic sectors / N. Jan et al // Food Chemistry: X. – 2023. – Т. 18. – P. 100687.
7. Amaranthus tricolor (red amaranth), an indigenous source of nutrients, minerals, amino acids, phytochemicals, and assessment of its antibacterial activity / F. Jahan et al // Journal of Agriculture and Food Research. – 2022. – Т. 10. – P. 100419.
8. Das S. Amaranths: the crop of great prospect / S. Das // Amaranthus: A promising crop of future. – Singapore: Springer Singapore, 2016. – P. 13-48.
9. Chan K.F. Genetic diversity and relationships detected by isozyme and RAPD analysis of crop and wild species of Amaranthus / K.F. Chan, M. Sun // Theoretical and applied genetics. – 1997. – Т. 95, № 5. – P. 865-873.
10. Achigan-Dako E.G. Current knowledge on Amaranthus spp.: research avenues for improved nutritional value and yield in leafy amaranths in sub-Saharan Africa / E.G. Achigan-Dako, O.E.D. Sogbohossou, P. Maundu // Euphytica. – 2014. – Т. 197, № 3. – P. 303-317.
11. Bhargava A. Response of Amaranthus sp. to salinity stress: a review / A. Bhargava, S. Srivastava // Emerging research in alternative crops. – 2020. – P. 245-263.
12. Luyckx A. Comparison of salt stress tolerance among two leaf and six grain cultivars of Amaranthus cruentus L / A. Luyckx, S. Lutts, M. Quinet // Plants. – 2023. – Т. 12, № 18. – P. 3310.

13. Zheleznov A.V. Seed proteins of the wild and the cultivated Amaranthus species / A.V. Zheleznov, L.P. Solonenko, N.B. Zheleznova // Euphytica. – 1997. – T. 97, № 2. – P. 177-182.
14. Segura-Nieto M. Biochemistry of amaranth proteins / M. Segura-Nieto // Amaranth biology, chemistry, and technology. – CRC Press, 2018. – P. 75-106.
15. Characterization of amaranth (Amaranthus hypochondriacus L.) seed proteins / M. Segura-Nieto et al // Journal of Agricultural and Food Chemistry. – 1992. – T. 40, № 9. – P. 1553-1558.
16. Characterization of amaranth (Amaranthus hypochondriacus L.) seed proteins / M. Segura-Nieto et al // Journal of Agricultural and Food Chemistry. – 1992. – T. 40, № 9. – P. 1553-1558.
17. Identification of bioactive peptide sequences from amaranth (Amaranthus hypochondriacus) seed proteins and their potential role in the prevention of chronic diseases / A. Montoya-Rodríguez et al // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. – 2015. – T. 14, № 2. – P. 139-158.
18. Kong X. Physical properties of Amaranthus starch / X. Kong, J. Bao, H. Corke // Food Chemistry. – 2009. – T. 113, № 2. – P. 371-376.
19. Zhu F. Structures, physicochemical properties, and applications of amaranth starch / F. Zhu // Critical reviews in food science and nutrition. – 2017. – T. 57, № 2. – P. 313-325.
20. Urubkov S.A., Khovanskaya S.S., Smirnov S.O. Comparative analysis of the glycemic index of amaranth and other gluten-free products. – 2019.
21. A compositional study of amaranth grain / R. Becker et al // Journal of food science. – 1981. – T. 46, № 4. – P. 1175-1180.
22. Exploring the potentials of underutilized grain amaranth (Amaranthus spp.) along the value chain for food and nutrition security: A review / O.R. Aderibigbe et al // Critical reviews in food science and nutrition. – 2022. – T. 62, № 3. – P. 656-669.
23. Mukuwapasi B. Grain amaranth: a versatile untapped climate-smart crop for enhancing food and nutritional security / B. Mukuwapasi, S. Mavengahama, A.S. Gerrano // Discover Agriculture. – 2024. – T. 2, № 1. – P. 44.
24. Nutritional composition, functionality, and processing technologies for amaranth / M. Malik et al // Journal of Food Processing and Preservation. – 2023. – T. 2023, № 1. – P. 1753029.
25. Effect of sprouting, fermentation and cooking on antioxidant content and total antioxidant activity in quinoa and amaranth / M. Vento et al // International Journal of Molecular Sciences. – 2024. – T. 25, № 20. – P. 10972.
26. Effect of roasting times on bioactive compounds, fatty acids, polyphenol and nutrients of amaranth (Amaranthus cruentus L.) seed roasted in pan, and principal component analysis / F. Al Juhaimi et al //Journal of Food Science and Technology. – 2024. – T. 61, № 1. – P. 129-138.
27. AOAC. Protein (Crude) in animal feed, forage (Plant Tissue), grain, and oilseeds. Method 2001.11. Official Methods of Analysis of AOAC International. – 2002.
28. Fatty acid determination in fermented milk samples employing direct esterification and gas chromatography / A.F.B. Piccioli et al // Journal of the Brazilian Chemical Society. – 2019. – T. 30. – P. 1350-1357.
29. Vitamin stability and growth of psychrotrophic bacteria in refrigerated raw milk acidified with carbon dioxide / I. Sierra et al // Journal of Food Protection. – 1996. – № 59. – P. 1305-1310.
30. Protein characteristics and peroxidase activities of different Indian wheat varieties and their relationship to chapati-making quality / M.S. Hemalatha et al // European Food Research and Technology. – 2007. – T. 225. – P. 463-471.
31. R 4.1.1672-03. Rukovodstvo po metodam kontrolya kachestva i bezopasnosti biologicheski aktivnykh dobavok k pishche. – Vved. 30.06.2004. – Moskva: Federal'nyi tsentr gossanehpidnadzora Minzdrava Rossii, 2004. (in Russian).
32. GOST 30178-96. Syr'e i produkty pishchevye. Atomno-absorbtsionnyi metod opredeleniya toksichnykh ehlementov. – Vved. 01.01.1998. – Minsk: Mezhgosudarstvennyi sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii, 1997. (in Russian).
33. GOST R 55484-2013. Myaso i myasnye produkty. Opredelenie soderzhaniya natriya, kaliya, magniya i margantsa metodom plamennoi atomnoi absorbtsii. – Vved. 01.07.2014. – Moskva: Standartinform, 2014. (in Russian).

34. SanPiN 2.3.2.1078-01. Gigienicheskie trebovaniya bezopasnosti i pishchevoi tsennosti pishchevykh produktov: sanitarno-ehpidemiologicheskie pravila i normativy. – Vved. 01.09.2002. – Moskva: Federal'nyi tsentr gossanehpidnadzora Minzdrava Rossii, 2002. (in Russian).
35. Evaluation of the nutritional quality of the grain protein of new amaranths varieties / E.G. Aguilar et al // Plant foods for human nutrition. – 2015. – T. 70, № 1. – P. 21-26.
36. Diversity of amino acids composition in cereals / Z. Tomičić et al // Food and Feed Research. – 2022. – T. 49, № 1. – P. 11-22.
37. Chornolata L. Biological completeness of protein and its role in farm animals feeding / L. Chornolata, S. Lykhach, T. Naidina // Feeds and Feed Production. – 2023. – № 95. – P. 170-178.
38. Amino acid contents and biological value of protein in various amaranth species / B. Písaříková et al // Czech Journal of Animal Science. – 2005. – T. 50, № 4. – P. 169-174.
39. Esan Y.O. Biochemical and nutritional compositions of two accessions of Amaranthus Cruentus seed flour / Y.O. Esan, O.S. Omoba, V.N. Enujiugha // American Journal of Food Science and Technology. – 2018. – T. 6, № 4. – P. 145-150.
40. Martí i Líndez A.A. Arginine-dependent immune responses / A.A. Martí i Líndez, W. Reith // Cellular and Molecular Life Sciences. – 2021. – T. 78, № 13. – P. 5303-5324.
41. Andini R. Variation in protein content and amino acids in the leaves of grain, vegetable and weedy types of amaranths / R. Andini, S. Yoshida, R. Ohsawa // Agronomy. – 2013. – T. 3, № 2. – P. 391-403.
42. Nutritional and Bioactive Characterization of Amaranthaceae Seeds From Peru, Slovakia, and Poland: A Comparative Study / E.D. Osei et al // Food Science & Nutrition. – 2025. – T. 13, № 9. – P. e70901.
43. Higher intakes of potassium and magnesium, but not lower sodium, reduce cardiovascular risk in the Framingham Offspring Study / R.T. Pickering et al // Nutrients. – 2021. – T. 13, № 1. – P. 269.
44. Lehmann J.W. Vitamin E isomers in grain amaranths (Amaranthus spp.) / J.W. Lehmann, D.H. Putnam, A.A. Qureshi // Lipids. – 1994. – T. 29, № 3. – P. 177-181.
45. Sex differences in vitamin metabolism and their role in oxidative stress regulation and cardiometabolic health / J. Wróblewska et al // Nutrients. – 2025. – T. 17, № 16. – P. 2697.
46. Vitamins in the prevention and support therapy of neurodegenerative diseases / K. Orywal et al // International Journal of Molecular Sciences. – 2025. – T. 26, № 3. – P. 1333.
47. Vitamins and minerals for energy, fatigue and cognition: a narrative review of the biochemical and clinical evidence / A.L. Tardy et al // Nutrients. – 2020. – T. 12, № 1. – P. 228.
48. Kennedy D.O. B vitamins and the brain: mechanisms, dose and efficacy – a review / D.O. Kennedy // Nutrients. – 2016. – T. 8, № 2. – P. 68.
49. Oroian M. Amaranth seed polyphenol, fatty acid and amino acid profile / M. Oroian // Applied Sciences. – 2022. – T. 12, № 4. – P. 2181.
50. Amaranth seed oil composition / P. Nasirpour-Tabrizi et al // Nutritional Value of Amaranth. – 2020. – P. 131-164.
51. Venskutonis P.R. Nutritional components of amaranth seeds and vegetables: a review on composition, properties, and uses / P.R. Venskutonis, P. Kraujalis // Comprehensive reviews in food science and food safety. – 2013. – T. 12, № 4. – P. 381-412.
52. A comprehensive exploration of compositional characteristics, bioactive compounds, anti-nutritional factors, and food applications of amaranths / R. Kour et al // Journal of Applied Biology & Biotechnology. – 2025. – T. 14, № 10.7324.
53. Productive and qualitative traits of Amaranthus cruentus L.: An unconventional healthy ingredient in animal feed / F. Gresta et al // Animals. – 2020. – T. 10, № 8. – P. 1428.
54. Differences in seed weight, amino acid, fatty acid, oil, and squalene content in γ-irradiation-developed and commercial amaranth varieties (Amaranthus spp.) / M. Szabóová et al // Plants. – 2020. – T. 9, № 11. – P. 1412.

Қаржыландыру туралы ақпарат

Бұл зерттеу Қазақстан Республикасы Ауыл шаруашылығы министрлігінің қаржыландыруымен жүзеге асырылады, грант нөмері «BR 22883587 – Қазақстан Республикасының азық-түлік қауіпсіздігін нығайту үшін ауыл шаруашылығы шикізатын терең өңдеу технологияларын жетілдіру және дамыту»

Д.Б. Тоймбаева*, С.А. Садуахасова, Д.Д. Хамитова, Г.Х. Оспанкулова
Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина,
010000, Республика Казахстан, г. Астана, пр. Женис, 62
*e-mail: bio.dana@mail.ru

ХИМИЧЕСКИЕ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ЗЕРНО АМАРАНТА

В производстве продуктов клинического применения ученые в последнее время уделяют все больше внимания сырьевым материалам, обладающим лечебными свойствами, высокой питательной и биологической ценностью, а также способствующим профилактике различных заболеваний. Зерно амаранта является одним из таких сырьевых материалов, уникальным по своему химическому составу и обладающим высокой питательной ценностью по сравнению со многими другими культурами, представленными на рынке. В связи с этим в данной работе были исследованы химический состав и функциональные свойства зерен амаранта, а также оценены возможности и важность его использования в производстве клинических продуктов. В результате исследования оказалось, что зерно амаранта особенно богаты лизином, которого не хватает в зерновых культурах, а также треонином, валином и другими незаменимыми аминокислотами в достаточном количестве. Среди минералов высокое значение показали кальций, магний, железо и калий, а среди витаминов высокое содержание витамина Е, его содержание на 1 кг составило 11,29 мг. Как показали результаты исследования, в жирнокислотном составе липидов амаранта преобладают ненасыщенные жирные кислоты над насыщенными. Среди ненасыщенных жирных кислот преобладали линолевая и олеиновая кислоты, составляющие 34,56% и 24,82% соответственно. Кроме того, в зернах амаранта не было токсичных веществ (Pb, As, Cd, Hg). Таким образом, было установлено, что зерно амаранта обладают высокими питательными и функциональнымыи свойствами, исходя из вышеперечисленных характеристк, и в будущем могут рассматриваться как подходящее растительное сырье для специализированных продуктов, например для энтерального питания.

Ключевые слова: *Амарант, белок, аминокислоты, жирные кислоты, минералы, витамины, энтеральное питание, функциональные свойста.*

D.B. Toimbayeva*, S.A. Saduakhasova, D.D. Khamitova, G.H. Ospankulova
Kazakh Agrotechnical research university named after S.Seifullin,
010000, Republic of Kazakhstan, Astana, Zhenis av. 62
*e-mail: bio.dana@mail.ru

CHEMICAL AND FUNCTIONAL PROPERTIES OF AMARANTH GRAINS

In the production of products for clinical nutrition, scientists have recently been increasingly focusing on raw materials with medicinal properties, high nutritional and biological value, and disease prevention properties. Amaranth grain is one such raw material, unique in its chemical composition and high nutritional value compared to many other crops available on the market. Therefore, this study investigated the chemical composition and functional properties of amaranth grains and assessed the potential and importance of their use in clinical purpose. The study found that amaranth grains are particularly rich in lysine, which is deficient in cereals, as well as sufficient amounts of threonine, valine, and other essential amino acids. Among minerals, calcium, magnesium, iron, and potassium showed high values, while among vitamins, vitamin E was high, with the content per kg being 11.29 mg. The study results showed that unsaturated fatty acids predominate over saturated fatty acids in the fatty acid composition of amaranth lipids. Among the unsaturated fatty acids, linoleic and oleic acids predominated, accounting for 34.56% and 24.82%, respectively. Furthermore, amaranth grains were free of toxic substances (Pb, As, Cd, Hg). Thus, it was established that amaranth grains possess high nutritional and functional properties, based on the above characteristics, and in the future, they can be considered a suitable plant material for specialized products, such as enteral nutrition.

Key words: *Amaranth, protein, amino acids, fatty acids, minerals, vitamins, enteral nutrition, functional properties.*

Авторлар туралы мәліметтер

Дана Болатовна Тоймбаева* – техника және технология магистрі, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Қазақстан Республикасы, Астана қ.; e-mail: bio.dana@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9595-0559.

Сауле Абдуахаповна Садуахасова – биология ғылымдарының кандидаты, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана, Қазақстан Республикасы; e-mail: saule_aru@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9483-5732.

Дина Дауреновна Хамитова – С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Қазақстан Республикасы, Астана қ.; e-mail: dina.khamitova@nu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-9265-8496.

Гульназым Хамитовна Оспанкулова – биология ғылымдарының кандидаты, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана, Қазақстан Республикасы; e-mail: bulashevag@mail.ru. ORCID:https://orcid.org/0000-0002-6043-4658.

Сведения об авторах

Дана Болатовна Тоймбаева* – магистр техники и технологии, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Республика Казахстан, г. Астана; e-mail: bio.dana@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9595-0559.

Сауле Абдуахаповна Садуахасова – кандидат биологических наук, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С.Сейфуллина, Астана, Республика Казахстан; e-mail: saule_aru@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9483-5732.

Дина Дауреновна Хамитова – Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Республика Казахстан, г. Астана; e-mail: dina.khamitova@nu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-9265-8496.

Гульназым Хамитовна Оспанкулова – кандидат биологических наук, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Астана, Республика Казахстан; e-mail:bulashevag@mail.ru. ORCID:https://orcid.org/0000-0002-6043-4658.

Information about the authors

Dana Bolatovna Toimbayeva* – Master of Engineering and Technology, Kazakh Agrotechnical research university named after S.Seifullin, Republic of Kazakhstan, Astana; e-mail: bio.dana@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9595-0559.

Saule Abduahapovna Saduakhasova – Candidate of Biological Sciences, Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin, Astana, Republic of Kazakhstan; e-mail: saule_aru@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9483-5732.

Dina Daurenovna Khamitova – Kazakh Agrotechnical research university named after S.Seifullin, Republic of Kazakhstan, Astana; e-mail: dina.khamitova@nu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-9265-8496.

Gulnazym Khamitovna Ospankulova – Candidate of Biological Sciences, Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin, Astana, Republic of Kazakhstan; e-mail: bulashevag@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6043-4658.

Редакцияға енуі 16.06.2026
Өңдеуден кейін түсуі 30.06.2026
Жариялауға қабылданды 01.07.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-53

ҒТАХР: 65.59.29

CC BY 4.0
Check for updates

Ж.К. Токанова*, К.Ж. Амирханов, Ж.Б. Асиржанова
Шәкәрім университеті,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20А
*e-mail: judi.93@mail.ru

МАШ БҰРШАҒЫ МЕН НОҚАТ ҚОСЫЛҒАН ҚОЙ ЕТІНІҢ ҚОСЫМША ӨНІМДЕРІ НЕГІЗІНДЕ ЕТ ПАШТЕТІН ӘЗІРЛЕУ

Аңдатпа: *Осы мақалада маш бұршақтары мен ноқат қосылған қой етінің қосымша өнімдеріне негізделген паштет рецептурасын әзірлеу сипатталған. Зерттеу барысында өсімдік компоненттерінің, өнімнің органолептикалық, физика-химиялық және технологиялық қасиеттеріне әсері жан-жақты зерттелді. Өндірістің технологиялық сызбасы әзірленіп, пайдаланылған шикізаттың тағамдық құндылығы мен функционалдық ерекшеліктеріне талдау жүргізілді. Сонымен қатар, ет өнімдерінде бұршақ тұқымдас дақылдарды қолданудың ғылыми және практикалық артықшылықтары негізделді.*

©Ж.К. Токанова, К.Ж. Амирханов, Ж.Б. Асиржанова, 2026

Зерттеу нәтижелері бойынша өнімнің оңтайлы рецептурасы анықталып, оның тағамдық құндылығының жоғарылауы, құрылымдық-механикалық қасиеттерінің жақсаруы және өндіріс шығындарының төмендеуі дәлелденді. Химиялық құрам мен технологиялық көрсеткіштерді талдау өсімдік компоненттерінің ет жүйесінің эмульгирлеу қабілетін арттырып, біртекті әрі тұрақты паста тәрізді құрылым қалыптастыратынын көрсетті. Маш бұршақтары мен ноқатты пайдалану өнімдегі май мөлшерін азайтып, тағамдық талшықтар, дәрумендер мен минералдардың деңгейін арттыруға мүмкіндік береді.

Сенсорлық бағалау нәтижелері әзірленген өнімнің дәмі, иісі, түсі және консистенциясы бойынша жоғары көрсеткіштерге ие екенін көрсетті. Сонымен қатар, бұршақ тұқымдастарды пайдалану өнімнің су байланыстыру және май ұстау қабілеттерін арттырып, сақтау барысында сапалық көрсеткіштердің тұрақтылығын қамтамасыз етеді. Алынған нәтижелер ет және өсімдік тектес шикізатты тиімді үйлестіру арқылы жоғары сапалы, қауіпсіз және экономикалық тұрғыдан тиімді өнім өндіруге болатынын дәлелдейді. Зерттеу нәтижелері әзірленген паштеттің функционалдық және диеталық қасиеттері жоғары өнім ретінде тамақ өнеркәсібінде кеңінен қолдану әлеуетін растайды және жаңа ет-өсімдік өнімдерінің ассортиментін кеңейтуге негіз болады.

Түйін сөздер: *паштет, қой етінің қосымша өнімдері, маш бұршағы, ноқат, бұршақ тұқымдастар, функционалды ет өнімдері, рецептура, өндіріс технологиясы.*

Кіріспе

Қазіргі уақытта ет өнімдерінің тағамдық құндылығын арттыруға және өндіріс тиімділігін жоғарылатуға бағытталған зерттеулер кеңінен жүргізілуде. Осыған байланысты ет шикізатын өсімдік тектес компоненттермен үйлестіру болашағы бар бағыттардың бірі болып саналады. Мұндай тәсіл өнімнің тағамдық құндылығын арттырумен қатар, өндіріс шығындарын төмендетуге мүмкіндік береді.

Өсімдік текстес өнімдердің бірі ретінде бұршақ тұқымдас дақылдарды пайдалану көптеген зерттеулерде қарастырылған. Бұршақ дақылдары өсімдік ақуызының, тағамдық талшықтардың, дәрумендер мен минералдардың маңызды көзі болып табылады. Оларды ет өнімдеріне қосу өнімнің құрылымын жақсартып, ылғал ұстау қабілетін арттырады және май мөлшерін азайтуға ықпал етеді. Мұндай үйлесім теңгерімді аминқышқылдық құрамы бар өнім алуды қамтамасыз етіп, биологиялық құндылығы жоғары тамақ өнімдерін өндірудің тиімді жолы болып табылады.

Зерттеулер бұршақ тұқымдастарын ет технологиясында қолдану өнімдердің құрылымдық-механикалық қасиеттеріне оң әсер ететінін көрсетті.

Функционалдық ет өнімдерін әзірлеуде инновациялық технологияларды қолдану маңызды болып табылады, себебі олар өнімнің биологиялық, тағамдық құндылығын арттырады, өнім сапасын жоғарлатады және өндіріс тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді.

Қорытындылай келе, ғылыми зерттеулердің нәтижелері бұршақ тұқымдастарын ет өнімдерімен үйлестіру тағамдық құндылығы жоғары, технологиялық қасиеттері жақсартылған және экономикалық тиімді өнімдер алуға мүмкіндік беретінін көрсетеді.

Функционалды ет өнімдерін өндіру – қазіргі тамақ өнеркәсібінің маңызды міндеттерінің бірі. Әсіресе, ет шикізатын, оның ішінде қосалқы өнімдерді ұтымды пайдалану ерекше маңызға ие, бұл жоғары тағамдық құндылығы мен жоғары органолептикалық қасиеттері бар өнімдерді жасау үшін арнайы технологиялық шешімдерді қажет етеді. Жоғары сұрыпты ет шикізатының тапшылығы мен биологиялық құндылығы жоғары өнімдерге тұтынушылар сұранысының артуын ескере отырып, өсімдік ингредиенттерін қолданатын инновациялық рецептураларды әзірлеу қажет. Осындай инновациялық жаңа рецептураның бірі - қойдың қосымша өнімдеріне маш пен ноқат қосып, паштет әзірлеу. Маш пен ноқат -өсімдік ақуызының, күрделі көмірсулардың, дәрумендер мен тамақтық талшықтың құнды көздері болып табылады. Оларды ет өнімдерінде қолдану құрылымдық тұрақтылықты арттырады, текстураны жақсартады және өндірістік шығындарды азайтуға көмекстеседі. Сондықтан маш пен ноқат қосылған қойдың қосалқы өнімдерінен паштет әзірлеу - ғылыми және практикалық тұрғыдан өзекті мәселелердің бірі болып табылады [1].

Зерттеу жағдайлары мен әдістері

Зерттеуде келесі материалдар пайдаланылды: майсыздандырылған қой еті, бауыр, жүрек, маш, ноқат, пияз, сәбіз, құйрық майы, сарымсақ, дәмдеуіштер және сорпа. Барлық ингредиенттер алдын ала дайындықтан өткізілді. Ет шикізаты мұқият жуылып, дәнекер

тіндерден тазартылып, ұсақталды. Бұршақ тұқымдастар 8-10 сағатқа жібітіліп, ісінуін жақсарту үшін дайындалды, содан кейін жұмсарғанға дейін пісірілді.

Органолептикалық зерттеулер арнайы дәм бағалау комиссиясы арқылы жүргізілді. Функционалды-технологиялық көрсеткіштер ылғалды байланыстыру қабілеті, пластикалылығы, құрылымдық тұрақтылығы және жағылғыштығы сияқты параметрлерді қамтитын әдістемелерге сәйкес анықталды [2].

Паштеттің рецептурасы

Қарапайым паштет құрамында бауыр, басты пияз, сарымсақ, тағамдық ас тұзы, ноқат, ұнтақталған қара бұрыш, сорпа немесе ауыз су болады, ал инновациялық паштет ерекшелігі – қойдың бауыры пайдаланылып, қосымша майсыздандырылған қой еті, қой жүрегі, маш бұршағы, сәбіз, құйрық майы немесе ерітілген май, кориандр, зире және паприка қосылды. Осындай шикізаттардың үйлесімі паштеттің құнарлылығын, дәрумендік құрамын және дәмін арттыруда маңызды рөл атқарды.

Кесте 1 берілген құрам тұрақты құрылымды қамтамасыз ете отырып, ақуыздың жоғары мөлшерін және жақсартылған органолептикалық қасиеттерді қамтамасыз етеді [3].

Кесте 1 – Өнім рецептурасы, массалық үлесі, %:

Ингредиенттер	Массалық үлесі, %
Майсыздандырылған қой етінің жұмсағы	49-51
Қойдың бауыры	8-10
Қойдың жүрегі	5-7
Сәбіз	2-4
Маш бұршағы	7,4-7,6
Ноқат	7,4-7,6
Басты пияз	4-6
Барлығы	100

Өндіріс технологиясы

Технологиялық процесс бірнеше кезеңнен тұрады:

– Шикізатты дайындау: жуу, тазалау, турау.
– Ет пен қосалқы өнімдерді пісіру.
– Маш бұршағы мен ноқатты жібіту және пісіру.
– Көкөністерді пассерлеу.
– Компоненттерді ұсақтап, сорпа мен дәмдеуіштермен араластыру.
– Массаны гомогенизациялау.
– Қаптау және 85-90°С температурада пастерлеу.
– Салқындату және сату.

Технологиялық процесс барысында пісірілген ет шикізаты мен қосалқы өнімдер (бауыр, жүрек) диаметрі 3-5 мм тор көзді волчокта бастапқы ұсақтаудан өткізіледі. Соңғы кезеңде компоненттер сорпамен және дәмдеуіштермен араластырылып, біртекті паста тәрізді консистенция алу үшін толық гомогенизацияланады.

Әзірленген паштет массасы металл консервілеу банкаларына (жестебанкаларға) герметикалық түрде қапталады. Бұл материал өнімді сыртқы ортаның әсерінен қорғап, оның сақтау барысындағы тұрақтылығын қамтамасыз етеді.Қапталған өнім 85-90°С температурада пастерлеу процесінен өтеді. Микробиологиялық зерттеулердің нәтижелері және герметикалық металл қаптама паштеттің сақтау мерзімі ішінде микробиологиялық қауіпсіздігі мен сапалық көрсеткіштерінің жоғары тұрақтылығын растайды.

Маш бұршағы мен ноқатты қолдану өнімнің ылғалды байланыстыру қабілетін арттырды, бұл термиялық өңдеу кезіндегі шығындарды азайтуға және жағылғыштығын жақсартуға мүмкіндік берді [4].

Төмендегі кестеде өнімнің тағамдық құндылығы мен функционалды-технологиялық көрсеткіштері келтірілген.

Зерттелген үлгіде (кесте 2) ақуыз мөлшері 12,8-13,6 г аралығында болды, бұл өнімнің жоғары тағамдық құндылығын көрсетеді [5]. Аталған көрсеткіштер паштет құрамында қосалқы ет өнімдері мен бұршақ тұқымдастарды үйлестіре пайдалану арқылы микронутриенттік құрамы теңгерімді, жоғары биологиялық құндылықты функционалдық өнім алынғанын

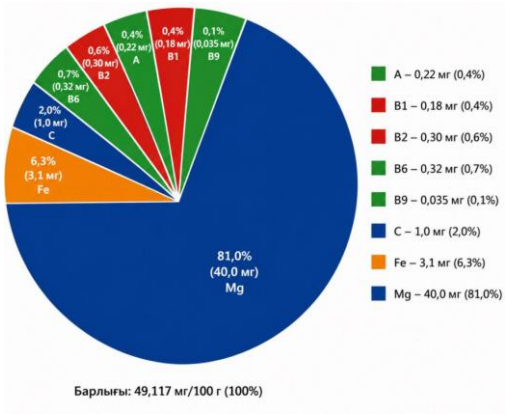
дәлелдейді. Мұндай комбинация өнімнің тағамдық сапасын арттырып қана қоймай, оның физиологиялық маңызын да күшейтеді. Ал ет өнімдеріндегі май мен ақуыз компоненттері энергия көзі ретінде маңызды рөл атқарады [6].

Кесте 2 – Өнімнің тағамдық құндылығының көрсеткіштері (100 г-ға г)

Көрсеткіші	Мәні
Ақуыздар	13,2
Майлар	7,6
Көмірсулар	10,2
Тағамдық талшықтар	2,5
Күлділігі	1,2
Ылғалдылығы	65,3
Энергетикалық құндылығы	140-165 ккал

Мұндай технологиялық тәсіл өнімнің құрылымдық және органолептикалық қасиеттерін де жақсартуға мүмкіндік береді. Паштет консистенциясының біркелкілігі, жағылмалығы, дәмі мен иісінің үйлесімділігі тұтынушылық тартымдылығын арттырады. Сонымен қатар, шикізаттарды тиімді пайдалану арқылы өндірістің экономикалық тиімділігі де жоғарылайды.

Витаминдік және минералдық құрамдар зерттеу нәтижелері қарастырылған өнімнің биологиялық құндылығының жоғары деңгейде екенін көрсетті (сурет 1).



Сурет 1 – Витаминдер мен минералдардың құрамдық көрсеткіштері, мг/100 г. [7]

А дәруменінің мөлшері 0,22 мг шамасында анықталып, оның өнімнің антиоксиданттық қасиеттерін күшейтуге ықпал ететіні байқалды.

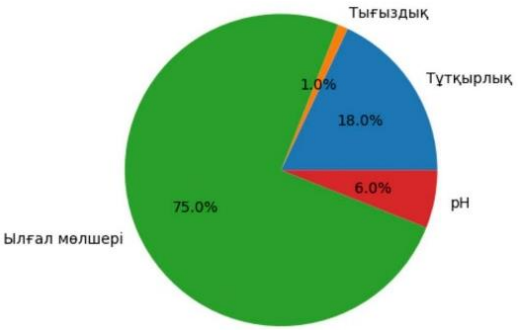
В тобына жататын дәрумендер, атап айтқанда B_1 (0,18 мг), B_2 (0,30 мг), B_6 (0,32 мг) және B_9 (0,035 мг), ағзадағы зат алмасу процестеріне қатысып, өнімнің жалпы тағамдық маңызын арттырады.

С дәрумені 1,0 мг деңгейінде анықталып, иммундық жүйені нығайтуға және антиоксиданттық әсер көрсетуге жағдай жасайды. Темірдің мөлшері 3,1 мг болды, ол қан түзілу процесінде маңызды рөл атқаратын элемент ретінде сипатталады. Магний 40 мг көлемінде анықталып, жүйке және бұлшықет қызметінің қалыпты жүруіне ықпал етеді [8].

Витаминдік және минералдық құрамдар өнімнің тамақтық және физиологиялық маңызын анықтайтын негізгі көрсеткіштердің бірі болып табылады. Өнімдегі дәрумендер мен минералдардың үйлесімді мөлшері оның адам ағзасына жағымды әсер етуін қамтамасыз етеді. А дәрумені жасушалардың жаңару процесіне қатысып, көру қабілетін сақтауда және иммундық жүйені нығайтуда маңызды рөл атқарады. Сонымен қатар, ол антиоксидант ретінде еркін радикалдардың әсерін төмендетуге ықпал етеді. Ал В тобының дәрумендерінің энергия алмасу процестерінде ерекше маңызы бар. Олар көмірсулар, майлар және ақуыздардың ыдырауына қатысып, ағзаны энергиямен қамтамасыз етеді. Сонымен бірге, жүйке жүйесінің қызметін реттеп, ферменттік реакциялардың жүруіне әсер етеді.

Қорыта келгенде, зерттелген өнімнің витаминдік және минералдық құрамы үйлесімді болып табылады және оны функционалдық тамақ өнімі ретінде пайдалануға мүмкіндік береді.

Өнімнің құрылымдық-механикалық көрсеткіштері оның физикалық қасиеттерін және технологиялық өңдеуге сәйкес құрылымын айқын сипаттайды. Жүргізілген зерттеулер нәтижесінде өнімнің тұтқырлығы 18 Па·с шамасында анықталды және бұл өнімнің консистенциясы жұмсақ әрі оңай жағылатынын көрсетеді (сурет 2).



Сурет 2 – Құрылымдық-механикалық көрсеткіштер

Тығыздық мәні 1,05 г/см³ деңгейінде болып, белгіленген нормативтік аралыққа (1,10-1,20 г/см³) жақын орналасқан. Тығыздықтың осындай деңгейі өнім құрылымының жеткілікті тұрақтылығын қамтамасыз етеді. Өнімдегі ылғал мөлшері 75%, яғни жеткілікті мөлшерде және бұл оның жұмсақтығы мен серпімділігін сақтауға мүмкіндік береді. pH көрсеткіші 6,1 деңгейінде анықталып, қышқылдықтың қалыпты шекте (5,6-6,4) екенін дәлелдейді. Мұндай көрсеткіш өнімнің сақталу ұзақтығына және микробиологиялық тұрақтылығына оң әсер етеді.

Жалпы нәтижелер өнімнің құрылымдық-механикалық қасиеттері тұрақты екенін және оны өңдеу мен сақтау барысында тиімді пайдалануға болатынын көрсетеді.

Микробиологиялық талдау нәтижелері диаграмма 1 көрсетілгендей зерттелген өнімнің санитарлық-гигиеналық талаптарға толық сәйкес келетінін көрсетті. Атап айтқанда, микроорганизмдердің жалпы саны (КМАФАнМ) 8×10⁴ КТБ/г деңгейінде анықталып, рұқсат етілген шекті мәннен (≤1×10⁵ КТБ/г) аспайтыны дәлелденді. Бұл көрсеткіш өнімнің технологиялық өңдеу процесінің тиімді жүргізілгенін және сақтау шарттарының дұрыс сақталғанын көрсетті. Ішек таяқшалары тобына жататын бактериялар (БГКП, колиформалар), сондай-ақ патогенді микроорганизмдер – Staphylococcus aureus және Salmonella – зерттеу барысында анықталған жоқ. Бұл өнімнің эпидемиологиялық тұрғыдан қауіпсіз екендігін және тұтынуға жарамдылығын айқындайды. Сонымен қатар, зең мен ашытқы саңырауқұлақтарының мөлшері 20 КТБ/г деңгейінде болып, рұқсат етілген ≤50 КТБ/г шегінен аспайтыны анықталды. Жоғарыда аталған көрсеткіштер өнімнің сақтау мерзімі ішінде микробиологиялық тұрақтылығын сақтай алатынын және бұзылу қаупінің төмен екенін көрсетеді.

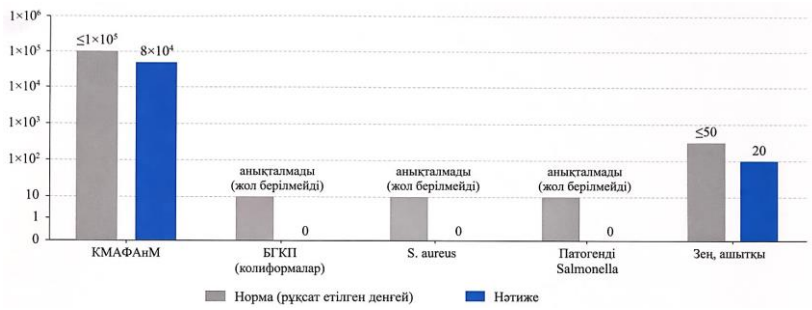


Диаграмма 1 – Микробиологиялық көрсеткіштер

Ақуыздық нұсқа (2-нұсқа) ақуыз және талшық құрамын арттырады (↑↑), ал калория мөлшері орташа деңгейде сақталады. Негізгі нұсқа (1-нұсқа) жоғары энергетикалық құндылық пен орташа май құрамымен ерекшеленеді, ал диеталық нұсқа (3-нұсқа) май мөлшері мен калорияны төмендетіп, ақуыздың жоғары құрамын сақтайды. Салыстырмалы талдау көрсеткендей, компоненттер пропорцияларын реттеу паштеттің тағамдық және энергетикалық құндылығын оның мақсаттарына сәйкес басқаруға мүмкіндік береді.

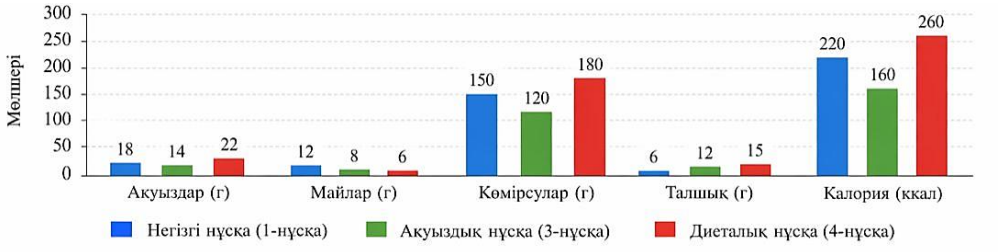


Диаграмма 2 – Рецептура нұсқаларының салыстырмалы талдауы [11]

Қорытынды:

1-нұсқа – ең тойымды және калориясы жоғары.

2-нұсқа – ақуызға бай, талшық мөлшері арттырылған.

3-нұсқа – диеталық, емдік тамақтануға арналған оңтайлы.

Үлгінің органолептикалық талдауы

Өнім біртекті массаға ие, ет пен көкөніс бөліктері біркелкі таралған, ашық қоңырдан қою қоңырға дейінгі түсті, зира, кориандр, паприка және ет иісі бар. Дәмі үйлесімді, орташа тұзды, консистенциясы икемді және оңай жағылатын сипатта. Мұндай көрсеткіштер әзірленген паштеттің жоғары тұтынушылық тартымдылығын білдіреді.

Зерттеулер көрсеткендей, ет өнімдерінің ағзада жақсы сіңірілуі ақуыз:май:су қатынасы 1:1(0,8):(4-5) болған кезде ең тиімді болады (кесте 3). Барлық алынған деректерді талдау нәтижесінде, ноқат бұршақтарын 5-6 сағат уақыт бойы суда тұндыру технологиялық режим ретінде ең оңтайлы әдіс болып табылады [12]. Себебі осы кезеңде pH және су белсенділігі ет шикізатының сәйкес көрсеткіштерімен ұқсас болып, паштет массалары мен дайын паштеттердің құрылымдық-механикалық және технологиялық параметрлерін жақсартуға қолайлы жағдай туғызады. Сонымен қатар, осы уақытта суға тұндырылған бұршақ массасы ең жоғары деңгейге жетеді, яғни артады [13].

Кесте 3 – Паштеттің пастерлеуге дейінгі массасының және дайын өнімнің pH, ЫБҚ және судың белсенділігін зерттеу нәтижелері.

Үлгілер	Көрсеткіштер					
	pH		ЫБҚ		a_w	
	М	Б	м	Б	М	Б
Пастерлеуге дейінгі паштет массасы	6,14	0,05	81,56	1,78	0,9881	0,0018
Дайын паштет	5,77	0,07	91,67	1,12	0,9710	0,0026

Нәтижелерді талқылау

Өнімнің тағамдық құндылығы мен функционалдық қасиеттерінің ғылыми негіздемесі қолданылатын шикізат пен оның технологиялық сипаттамаларын кешенді бағалауға негізделген. Бұршақ тұқымдастарының баяу сіңірілетін көмірсулары гликемиялық индекстің бірқалыпты болуын қамтамасыз етеді, ал олардың жоғары ылғал байланыстыру қабілеті тұрақты құрылым түзілуіне және текстураның жақсаруына ықпал етеді.

Рецептурада қолданылған қойдың қосалқы өнімдері жоғары биологиялық құндылығымен ерекшеленеді. Атап айтсақ, бауыр – А, B_2, B_{12+} дәрумендерінің, фолий қышқылы мен темірдің шоғырланған көзі болып табылады, бұл өз кезегінде өнімнің толыққанды витаминдік-минералдық құрамын қалыптастыруға мүмкіндік береді. Ал жүрек құрамында жеңіл сіңірілетін ақуыздар, коферменттер мен креатин бар, ал қой етінің жұмсағы айқын ет дәмін беріп, ақуызды-майлы құрылымның негізін құрайды. Рецептураға енгізілген дәмдеуіштер (қара бұрыш, зире, кориандр, паприка) қос функция атқарады: бір жағынан, олар субөнімдерге тән иісті жұмсартып, өнімнің дәмі мен хош иісін арттырады; екінші жағынан, олардың эфир майлары табиғи антимикробтық белсенділігі арқылы жағымсыз микрофлораның дамуын тежейді. Әзірленген паштет рецептурасы жоғары ылғал және май ұстап тұру қабілеті бар біртекті, икемді консистенция түзуге мүмкіндік береді, бұл өнімнің шөгуін азайтып, сақтау барысында құрылымдық тұрақтылығын қамтамасыз етеді. Паштеттің теңгерілген нутриенттік құрамының арқасында өнімді жаппай тұтынуға да, сондай-ақ емдік-профилактикалық тамақтану жүйесінде де қолдануға болады. Термиялық өңдеуді,

ылғалдылықты реттеуді және дәмдеуіштерді қолдануды қамтитын технологиялық шаралар кешені дайын өнімнің микробиологиялық қауіпсіздік талаптарына сәйкестігін қамтамасыз етеді, соның ішінде: патогенді микроорганизмдер анықталмайды, КМАФАнМ, ашытқылар мен зеңдердің көрсеткіштері бақыланады, ал су активтілігінің төмендігі мен дәмдеуіштердің антисептикалық қасиеттері микробтардың дамуына қосымша кедергі жасайды [14].

Паштеттің функционалды-технологиялық қасиеттеріне жүргізілген талдау өсімдік компоненттерін қосу өнімнің құрылымдық тұрақтылығын, біртектілігін және икемділігін жақсартатынын көрсетті. Ет пен дәнді дақылдардың үйлесімі арқылы паштетке тән жұмсақ консистенция мен айқын хош иіс қалыптасады. Ақуыз мөлшері бақылау үлгісімен салыстырғанда 12-15%-ға артты, ал май мөлшері 8–10%-ға төмендеді. Бұршақ дақылдарын қосу тағамдық талшықтар, дәрумендер және микроэлементтер мөлшерін арттыру арқылы өнімнің тағамдық құндылығын көтеріп, оны функционалдық бағыттағы толыққұнды өнімге айналдырды. Микроқұрылымдық талдау нәтижесінде тұрақты ақуыз-полисахаридтік матрица түзілуінің арқасында ақуыздық және майлы қосындылардың өнім көлемінде неғұрлым біркелкі таралғаны анықталды. Бұл құрылымның синерезиске және механикалық бұзылуға бейімділігі төмен, бұл өз кезегінде консистенция тұрақтылығының артқанын көрсетеді.

Органолептикалық бағалау нәтижесінде маш пен ноқатқа тән жеңіл жаңғақ дәмі, сондай-ақ дәмдеуіштер мен ет негізінің үйлесімділігі арқасында өнімнің дәмдік және хош иістік сипаттамаларының жақсарғаны анықталды [15]. Дегустациялық комиссия өнімнің дәмінің қанықтығы мен құрылымының біркелкі жұмсақтығын атап өтті, бұл оның тұтынушылық тартымдылығын арттырады. Жалпы алғанда, бұл нәтижелер қойдың қосалқы өнімдерінен жасалған паштет рецептурасына бұршақ тұқымдастарын қосу өнімнің функционалды-технологиялық қасиеттерін жақсартып қана қоймай, сонымен қатар пайдалы қасиеттерін арттыра түсетінін дәлелдейді. Сондықтан,жаңа өнімді функционалдық тамақтануда қолданудың айтарлықтай әлеуеті бар.

Қорытынды

Маш бұршағы мен ноқатты қойдың қосалқы өнімдерінен дайындалатын паштет рецептурасына енгізу, жеңіл сіңірілетін өсімдік ақуыздарының мөлшерін арттыру және аминқышқылдық құрамды оңтайландыру өнімнің биологиялық толыққандылығын едәуір арттыруға мүмкіндік береді. Өсімдік компоненттері өнімнің текстурасын жақсартуға, ылғал байланыстыру қабілетін күшейтуге және біртекті консистенция қалыптастыруға ықпал етеді, дәм, хош иіс және жағылғыштық сияқты органолептикалық қасиеттерге оң әсерін тигізеді. Жасалған рецептураны қолдану ет компоненттерінің бір бөлігін арзанырақ өсімдік шикізатымен алмастыру арқылы дайын өнім сапасын төмендетпей, өндіріс шығындарын азайтуға мүмкіндік береді. Паштет технологиясын ет өңдеу кәсіпорындарына енгізу ұсынылады, себебі бұл технология жоғары тағамдық және биологиялық құндылығы бар функционалды ет өнімдерін шығаруға мүмкіндік береді.

Әдебиеттер тізімі

1. Абдрахманова А.К. Ет өнімдерінің технологиясы / А.К. Абдрахманова. – Алматы, 2020. https://library.atu.edu.kz/files/155181/.
2. Рогов, И.А. Технология мяса и мясных продуктов. Кн. 1. Общая технология мяса / И.А. Рогов, А.Г. Забашта, Г.П. Казюлин. – 2019. – 565 с. https://www.studmed.ru/rogov-i-a-zabashta-a-g-kazyulin-g-p-tehnologiya-myasa-i-myasnyh-produktov-kniga-1-obschaya-tehnologiya-myasa_af5748bdaba.html.
3. Патент № 34521 Республика Казахстан. Способ производства паштета функционального назначения из субпродуктов / Я.М. Узаков, А.М. Каимова. – Опубл. 2020, Бюл. «Промышленная собственность», № 12.
4. Meat Technology: научный журнал. – 2023.
5. Скурихин, И.М. Таблицы химического состава и калорийности российских продуктов питания : справочник / И.М. Скурихин, В.А. Тутельян. – Москва: ДеЛи принт, 2008. – 276 с.
6. Анфимов А.Н. Технология мяса и мясопродуктов / А.Н. Анфимов и др. https://scinetwork.ru/disk/file/15875.
7. МР 2.3.1.0253-21. Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации : методические рекомендации. –

Москва: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2021. – 72 с.
8. Әлімбаев Б.А. Ет және ет өнімдерінің технологиясы / Б.А. Әлімбаев, Қ.С. Сәрсенбаев. – Алматы: ҚазҰАУ, 2015. – 276 б. https://kaznau.edu.kz.
9. Какимжанов, А.Т. Ет және ет өнімдерінің технологиясы: оқулық / А.Т. Какимжанов. – Алматы: Жазушы, 2012. – 304 б.
10. ТР ТС 021/2011. Тамақ өнімдерінің қауіпсіздігі туралы: Кеден одағының техникалық регламенті: Кеден одағы комиссиясының 2011 жылғы 9 желтоқсандағы № 880 шешімімен қабылданған. – Алматы: ЮРИСТ, 2011. – 212 б.
11. Мустафаева А.Л. Тамақ өнімдерінің технологиясын модельдеу және оңтайландыру: оқулық / А.Л. Мустафаева. – Алматы: АТУ, 2017. – 215 б.
12. Узаков Я.М. Физико-химические методы исследования мяса и мясных продуктов : учебное пособие / Я.М. Узаков. – Алматы: АТУ, 2015. – 184 с.
13. Қуанышбаев Е.К. Ет және ет өнімдерін өңдеу технологиясы: оқу құралы / Е.К. Қуанышбаев. – Алматы: Қазақ университеті, 2014. – 255 б. https://farabi.university.
14. Әбдірахманов Н.С. Тағам биотехнологиясы / Н.С. Әбдірахманов. – Алматы: Дәуір, 2019. – 310 б. https://kitap.kz.
15. Гуринович Г.В. Льняная мука и качество мясных полуфабрикатов / Г.В. Гуринович, О. Рунда // Мясная индустрия. – 2015. – № 9. – С. 38.

References

1. Abdrakhmanova A.K. Et onimderinin tekhnologiyasy / A.K. Abdrakhmanova. – Almaty, 2020. https://library.atu.edu.kz/files/155181/. (in Kazakh).
2. Rogov, I.A. Tekhnologiya myasa i myasnykh produktov. Kn. 1. Obshchaya tekhnologiya myasa / I.A. Rogov, A.G. Zabashta, G.P. Kazyulin. – 2019. – 565 s. https://www.studmed.ru/rogov-i-a-zabashta-a-g-kazyulin-g-p-tehnologiya-myasa-i-myasnyh-produktov-kniga-1-obschaya-tehnologiya-myasa_af5748bdaba.html. (in Russian).
3. Patent № 34521 Respublika Kazakhstan. Sposob proizvodstva pashteta funktsional'nogo naznacheniya iz subproduktov / Ya.M. Uzakov, A.M. Kaimova. – Opubl. 2020, Byul. «Promyshlennaya sobstvennost'», № 12. (in Russian).
4. Meat Technology : nauchnyi zhurnal. – 2023. (in English).
5. Skurikhin, I.M. Tablitsy khimicheskogo sostava i kaloriinosti rossiiskikh produktov pitaniya : spravochnik / I.M. Skurikhin, V.A. Tutel'yan. – Moskva: DeLi print, 2008. – 276 s. (in Russian).
6. Anfimov A.N. Tekhnologiya myasa i myasoproduktov / A.N. Anfimov i dr. https://scinetwork.ru/disk/file/15875. (in Russian).
7. MR 2.3.1.0253-21. Normy fiziologicheskikh potrebnostei v ehnergii i pishchevykh veshchestvakh dlya razlichnykh grupp naseleniya Rossiiskoi Federatsii : metodicheskie rekomendatsii. – Moskva: Federal'naya sluzhba po nadzoru v sfere zashchity prav potrebitelei i blagopoluchiya cheloveka, 2021. – 72 s. (in Russian).
8. Alimbaev B.A. Et zhane et onimderinin tekhnologiyasy / B.A. Alimbaev, K.S. Sarsenbaev. – Almaty: KazUAU, 2015. – 276 b. https://kaznau.edu.kz. (in Kazakh).
9. Kakimzhanov, A.T. Et zhane et onimderinin tekhnologiyasy: okulyk / A.T. Kakimzhanov. – Almaty: Zhazushy, 2012. – 304 b. (in Kazakh).
10. TR TS 021/2011. Tamak onimderinin kauipsizdigi turaly: Keden odagynyn tekhnikalyk reglamenti: Keden odagy komissiyasynyn 2011 zhylgy 9 zheltoksandagy № 880 sheshimimen kabyldangan. – Almaty: YURIST, 2011. – 212 b. (in Kazakh).
11. Mustafaeva A.L. Tamak onimderinin tekhnologiyasyn model'deu zhane ontailandyru: okulyk / A.L. Mustafaeva. – Almaty: ATU, 2017. – 215 b. (in Kazakh).
12. Uzakov Ya.M. Fiziko-khimicheskie metody issledovaniya myasa i myasnykh produktov : uchebnoe posobie / Ya.M. Uzakov. – Almaty: ATU, 2015. – 184 s. (in Russian).
13. Kuanyshbaev E.K. Et zhane et onimderin ondeu tekhnologiyasy: oku kuraly / E.K. Kuanyshbaev. – Almaty: Kazak universiteti, 2014. – 255 b. https://farabi.university. (in Kazakh).
14. Abdirakhmanov N.S. Tagam biotekhnologiyasy / N.S. Abdirakhmanov. – Almaty: Dauir, 2019. – 310 b. https://kitap.kz. (in Kazakh).
15. Gurinovich G.V. L'nyanaya muka i kachestvo myasnykh polufabrikatov / G.V. Gurinovich, O. Runda // Myasnaya industriya. – 2015. – № 9. – S. 38. (in Russian).

Ж.К. Токанова*, К.Ж. Амирханов, Ж.Б. Асиржанова
Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20А
*e-mail: judi.93@mail.ru

РАЗРАБОТКА МЯСНОГО ПАШТЕТА НА ОСНОВЕ СУБПРОДУКТОВ БАРАНИНЫ С ДОБАВЛЕНИЕМ МАША И НУТА

В данной статье представлена разработка рецептуры мясного паштета на основе субпродуктов баранины с добавлением маша и нута. В ходе исследования всесторонне изучено влияние растительных компонентов на органолептические, физико-химические и технологические свойства продукта. Разработана технологическая схема производства, проведён анализ пищевой ценности и функциональных особенностей используемого сырья. Кроме того, обоснованы научные и практические преимущества применения зернобобовых культур при производстве мясных продуктов.

По результатам исследования определена оптимальная рецептура продукта, подтверждены повышение его пищевой ценности, улучшение структурно-механических свойств и снижение производственных затрат. Анализ химического состава и технологических показателей показал, что растительные компоненты повышают эмульгирующую способность мясной системы, способствуя формированию однородной и стабильной пастообразной структуры. Использование маша и нута позволяет снизить содержание жира в продукте и повысить уровень пищевых волокон, витаминов и минеральных веществ.

Результаты сенсорной оценки показали, что разработанный продукт характеризуется высокими показателями вкуса, аромата, цвета и консистенции. Кроме того, применение зернобобовых культур способствует повышению влагоудерживающей и жироудерживающей способности продукта, обеспечивая стабильность качественных показателей в процессе хранения. Полученные результаты подтверждают возможность производства высококачественного, безопасного и экономически эффективного продукта за счёт рационального сочетания мясного и растительного сырья. Результаты исследования подтверждают высокий потенциал разработанного паштета как функционального и диетического продукта для широкого применения в пищевой промышленности и служат основой для расширения ассортимента новых мясорастительных продуктов.

Ключевые слова: *паштет, субпродукты баранины, маш, нут, бобовые культуры, функциональные мясные продукты, рецептура, технология производства.*

Zh.K. Tokanova*, K.Zh. Amirhanov, Zh. Assirzhanova
Shakarim University,
20A Glinki St., Semey 071412, Republic of Kazakhstan
*e-mail: judi.93@mail.ru

DEVELOPMENT OF MEAT PÂTÉ BASED ON LAMB BY-PRODUCTS ENRICHED WITH MUNG BEANS AND CHICKPEAS

This article presents the development of a pâté formulation based on sheep by-products with the addition of mung beans and chickpeas. The study comprehensively investigated the influence of plant-based ingredients on the organoleptic, physicochemical, and technological properties of the product. A technological production flowchart was developed, and the nutritional value and functional characteristics of the raw materials used were analyzed. In addition, the scientific and practical advantages of incorporating legumes into meat products were substantiated.

The research findings identified the optimal product formulation and demonstrated an increase in nutritional value, improved structural and mechanical properties, and reduced production costs. Analysis of the chemical composition and technological characteristics showed that plant-based ingredients enhance the emulsifying capacity of the meat system, resulting in a homogeneous and stable paste-like structure. The use of mung beans and chickpeas reduces the fat content of the product while increasing the levels of dietary fiber, vitamins, and minerals.

The sensory evaluation results demonstrated that the developed product exhibited high scores for taste, aroma, color, and consistency. Furthermore, the incorporation of legumes improved the water-holding and fat-binding capacities of the product, ensuring the stability of its quality characteristics during storage. The obtained results confirm that the effective combination of meat and plant-based raw materials makes it possible to produce a high-quality, safe, and cost-effective product. The findings also confirm the potential of the developed pâté as a functional and dietary food product suitable for widespread application in the food industry and provide a basis for expanding the range of innovative meat-plant products.

Key words: *pate, lamb by-products, mung bean, chickpea, legumes, functional meat products, recipe, production technology.*

Авторлар туралы мәліметтер

Жулдыз Канатовна Токанова* – PhD докторанты, Шәкәрім университеті, Қазақстан; e-mail: judi.93@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1974-6545.

Кумарбек Жунусбекович Амирханов – техника ғылымдарының докторы, «Тамақ технологиясы» кафедрасының профессоры, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: aspirant57@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7988-988X.

Жанна Баимбековна Асиржанова – «Тамақ технологиясы» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, техника ғылымдарының кандидаты; Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: aszb@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5699-7044.

Сведения об авторах

Жулдыз Канатовна Токанова* – PhD докторант, Шәкәрім университет, Казахстан; e-mail: judi.93@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1974-6545.

Кумарбек Жунусбекович Амирханов – доктор технических наук, профессор кафедры «Пищевая технология», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: aspirant57@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7988-988X.

Жанна Баимбековна Асиржанова – кандидат технических наук, ассоциированный профессор кафедры «Пищевая технология», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: aszb@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5699-7044.

Information about the authors

Zhuldyz Tokanova* – PhD student, Shakarim University, Kazakhstan; e-mail: judi.93@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1974-6545.

Kumarbek Amirkhanov – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of «Food Technology», Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: aspirant57@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7988-988X.

Zhanna Assirzhanova – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of «Food Technology», Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: aszb@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5699-7044.

Редакцияға енуі 17.06.2026
Өңдеуден кейін түсуі 30.06.2026
Жариялауға қабылданды 01.07.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-54

МРНТИ: 65.39.31

BY 4.0
Check for updates

Ф.Х. Смольникова*, Ж.М. Атамбаева, А.О. Утегенова, А.А. Даутова, Н.Р. Муслимова
Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А
*e-mail: f-smolnikova@mail.ru

ТЕХНОЛОГИЯ КИСЛОМОЛОЧНОГО НАПИТКА НӘРЛІ-КӨЖЕ

Аннотация: *В статье представлена разработка технологии кисломолочного напитка Нәрлі-көже. Актуальность исследования обусловлена реализацией концепции охраны здоровья населения Республики Казахстан, предусматривающей расширение ассортимента «здоровых» продуктов. В качестве основного сырья было использовано коровье молоко, рисовая, пшённая и перловая крупы. Использовалась закваска YO-MIX 300™300 LYO 100 DCU. Были апробированы экспериментальные рецептуры. Установлено оптимальное соотношение молочного и растительного сырья, позволяющее получить продукт с хорошими вкусовыми характеристиками, однородной консистенцией и повышенной пищевой ценностью. Наилучшие показатели качества продемонстрировала рецептура №2. Результаты анализа показали, что разработанный напиток*

©Ф.Х.Смольникова, Ж.М. Атамбаева, А.О. Утегенова, А.А. Даутова, Н.Р. Муслимова, 2026

содержит белки, жиры, углеводы, пищевые волокна, витамины и минеральные вещества, необходимые для поддержания здоровья человека. Установлено, что срок хранения продукта составляет до 7 суток, при этом оптимальное качество сохраняется в течение 36 часов. Продукт был исследован на пищевую безопасность, показатели не превышали установленных норм. Полученный кисломолочный напиток может быть рекомендован для широкого потребления, включая диетическое и профилактическое питание, а также для расширения ассортимента функциональных продуктов питания. На новый продукт получен патент на полезную модель Кисломолочный напиток и способ его производства № 11751.

Ключевые слова: *кисломолочный напиток, закваска, молоко цельное, сквашивание, пастеризация.*

Введение

Для производства питьевых кисломолочных напитков (йогуртов) используется специальная закваска – термофильный стрептококк и болгарская палочка.

Кисломолочные напитки, содержащие живые микроорганизмы, затормаживают гнилостные процессы в желудочно-кишечном тракте. Употребление подобных продуктов положительно влияет на состояние организма в целом [1].

В производстве кисломолочных напитков широко используются лиофилизированные закваски прямого внесения FD DVS – производитель фирма «Chr.Hansen» (Дания). Данные культуры являются фагоустойчивыми. Например, закваска YF-L811, в составе находятся культуры Streptococcus thermophilus и Lactobacillus delbrueckii [2].

В то же время для получения йогурта из молока используются бактерии *Streptococcus salivarius, Lactobacillus delbrueckii subsp. bulgaricus,* которые активно ферментируют молоко [3].

Значительная часть доступной научной литературы сообщает о положительном воздействии йогуртовых заквасок на здоровье человека [4].

Производство кисломолочных продуктов на современном этапе производства актуально с использованием заквасок прямого внесения, так как это упрощает технологический процесс производства кисломолочных продуктов [5].

Немаловажным фактором является использование нетрадиционных компонентов, как правило это могут быть ягоды, фрукты, злаки.

Одним из доступных злаковых является крупа, которая содержит значительное содержание крахмала до 70%, белки риса содержат различный спектр аминокислот [7]. Состав рисовой крупы продемонстрирован в таблице 1 [6].

Перловая крупа богата витаминами группы В и Е, минералами: магнием, фосфором, железом, медью и селеном. Благодаря высокому содержанию клетчатки, она нормализует работу пищеварительного тракта. Низкий гликемический индекс делает крупу идеальным продуктом для людей с диабетом. Антиоксиданты в её составе способствуют борьбе с воспалительными процессами и защищают клетки от повреждений [8]. Подробный химический состав представлен в таблице 1 [6].

Пшено является источником высокоусвояемых углеводов (65-70%), представленных преимущественно крахмалом. Благодаря этому продукт обеспечивает стабильное высвобождение энергии и поддерживает оптимальный уровень глюкозы в крови без резких гликемических колебаний. Белковая составляющая пшена (10-12%) содержит ряд незаменимых аминокислот, включая лейцин, изолейцин, треонин и фенилаланин, которые участвуют в синтезе структурных и ферментативных белков. Пшённая крупа характеризуется повышенным содержанием витаминов группы В, особенно тиамина (В1), пиридоксина (В6) и фолиевой кислоты (В9). Эти витамины обеспечивают: регуляцию углеводного, белкового и липидного обменов, поддержание функционального состояния нервной системы, участие в процессах кроветворения и синтеза нейромедиаторов. Данные свойства обосновывают целесообразность применения пшена в рационах, направленных на поддержание когнитивных функций и профилактику неврологических расстройств лёгкой степени [9, 10]. Пищевая ценность зерновых круп приведена в таблице 1 [6].

Целью данного исследования является разработка технологии кисломолочного напитка с использованием закваски прямого внесения и зерновых круп, обеспечивающих получение продукта с высокими показателями качества, пищевой ценности и потребительских свойств.

Таблица 1 – Пищевая ценность круп

	Рисовая крупа	Перловая крупа	Пшённая крупа
Белки, г	7	9,3	10,0-12,0
Жиры, г	1	1,1	2,5-4,0
Углеводы, г	74	74,7	65-70
Вода, г	14	14	14
Клетчатка, г	3	7,8	2,0-3,0
Витамины			
Витамин В1, мг	0,08	0,12	0,3-0,4
Витамин В2, мг	0,04	0,06	0,03-0,05
Витамин Е, мг	0,4	1,1	0,1-0,2
Витамин В3 (РР), мг	3,3	-	1,0-2,0
Витамин В4, мг	78	37,8	-
Витамин В5, мг	0,4г	0,5	-
Витамин В6, мг	0,2	0,36	0,5-0,7
Витамин В9, мкг	19	24	40-45
Витамин Н, мкг	3,5	11	-
Минеральные вещества			
Калий, мг	100	172	210-230
Кальций, мг	8	38	10-16
Магний, мг	50	40	80-120
Фосфор, мг	150	323	250-300
Железо, мг	1	1,8	2,5-3,0
Цинк, мг	1,42	0,92	1,2-1,7
Селен, мкг	15,1	37,7	-
Медь, мкг	250	280	0,3-0,5
Сера, мг	46	77	-
Фтор, мкг	50	60	-
Хром, мкг	1,7	12,5	-
Кремний, мг	100	-	60-70
Марганец, мг	1,25	0,65	0,5-0,8

Условия и методы исследования

В исследовании были использованы следующие методики:

ГОСТ 3624-92 – Молоко и молочные продукты. Титриметрические методы определения кислотности [11].

ГОСТ 30347-97 – Молоко и молочные продукты. Методы определения Staphylococcus aureus[12].

ГОСТ 3625-84 – Молоко и молочные продукты. Методы определения плотности [13].

ГОСТ 30178-96 – Сырье и продукты пищевые. Атомно-абсорбционный метод определения токсичных элементов [14]. Данный анализ выполнялся на атомно-абсорбционном спектрометре Shimadzu AA-7000 с использованием ламп с полым катодом, с длинами волн для таких элементов, как Hg, Pb, As Cd. Прибор калибровался стандартными растворами. Результаты анализа были представлены в мг/кг. Химический состав продукта исследовался на инфракрасном приборе Инфралюм ФТ-12. Пробы продукта загружали в кювету для ИК сканирования. Количество вещества определялось автоматически с помощью сканирования и выводилось на дисплей компьютера.

Все исследования проводились в трехкратной повторности. Для обработки данных использовали методы математической статистики с применением программного обеспечения (Microsoft Excel / Statistica / SPSS), включая расчёт средних значений, стандартного отклонения и сравнительный анализ показателей. Различия считали статистически значимыми при $p < 0,05$.

Подготовка компонентов рецептуры включала отбор сырья, взвешивание компонентов согласно разработанной рецептуре и их подготовку к дальнейшей технологической обработке. Зерновые наполнители для кисломолочного напитка отваривались в воде, время варки приведено в таблице 2.

Таблица 2 – Время варки зерновых круп

Крупа	Соотношение крупа:вода	Температура варки	Время варки	Примечание
Пшённая	1:2,5-3	90-100°С	20-30 мин	Желательно дать настояться 5-10 мин после варки
Рисовая (шлифованный рис)	1:2	95-100°С	15-25 мин	Круглозерный варится (15-18 мин), длиннозерный – до 25 мин.
Перловая	1:3	95-100°С	40-50 мин	Для ускорения варки рекомендуется предварительное замачивание 2-4 часа.

Данные таблицы 2 демонстрируют технологические режимы подготовки, которые характерны для определённого вида зерновых.

Подготовка закваски прямого внесения заключалась в выдержки упаковки закваски при 20 °С, чтобы ее температура была выравнена с окружающей средой. В дальнейшем закваска вносилась непосредственно в охлаждённое пастеризованное молоко до температуры заквашивания 40-42 ^{0}С.

Результаты исследования

Были составлены рецептуры кисломолочных напитков, состав представлен в таблице 3.

Таблица 3 – Рецептуры кисломолочного напитка «Нәрлі көже»

Сырье и основные материалы	Опытные образцы			Контроль Йогурт греческий со злаками 2,5 % («Савушкин»)
	Рецептура 1	Рецептура 2	Рецептура 3	
Молоко коровье с массовой долей жира 2,86%	79,498	84,498	74,498	87,98
Закваска для йогурта YO-MIX 300^{TM}300 LYO 100 DCU прямого внесения	0,002	0,002	0,002	-
Крупа рисовая отваренная	7,000	5,000	8,000	-
Крупа пшенная отваренная	7,000	5,000	8,000	-
Крупа перловая отваренная	6,000	5,000	9,000	-
Соль поваренная	0,500	0,500	0,500	-
Закваска для йогурта (болгарская палочка термофильный стрептококк (2:1)	-	-	-	-
Смесь злаков (овсяные, пшеничные, ржаные, ячменные хлопья)	-	-	-	3,0
Закваска йогуртовая *(Streptococcus thermophilus, Lactobacillus delbrueckii subsp. bulgaricus)*	-	-	-	0,02
Сахар-песок	-	-	-	5,0
Клетчатка льна	-	-	-	1,0
Мед натуральный	-	-	-	1,0
Крахмал кукурузный модифицированный	-	-	-	0,8
Пектин	-	-	-	0,15
Концентрированный лимонный сок	-	-	-	0,03
Натуральный ароматизатор	-	-	-	0,02
Вода питьевая	-	-	-	1,0
Итого	100	100	100	100

Опытные образцы кисломолочных напитков были исследованы на различные показатели – физико-химические, органолептические.

В таблице 4 приведены физико-химические показатели опытных образцов.

Таблица 4 – Физико-химические показатели кисломолочного напитка «Нәрлі көже»

Показатели	Опытные образцы			Контроль Йогурт греческий со злаками 2,5% («Савушкин»)
	Рецептура 1	Рецептура 2	Рецептура 3	
Титруемая кислотность, ^{0}Т	85±0,01	80 ±0,01	96 ±0,01	83±0,01
pH, ед	4,0±0,02	4,1±0,03	4,2±0,03	4,2±0,02
Вязкость напитка, с	25±0,01	24±0,01	28±0,01	20±0,01
Синеризис напитка, %	2% выделившейся сыворотки	1% выделившейся сыворотки	Выделение сыворотки не наблюдалось	Выделение сыворотки не наблюдалось
Плотность напитка, кг/м^3	1112±0,02	1113±0,02	1117±0,02	1115±0,02
Массовая доля белка, г	2,9±0,01	2,86±0,02	2,91±0,02	2,8±0,02
Массовая доля жира, г	2,511±0,02	2,508±0,02	2,514±0,02	2,5±0,02
Массовая доля углеводов, г	4,3±0,02	4,12±0,01	4,45±0,02	4±0,01
Массовая доля золы, г	0,664±0,01	0,652±0,01	0,658±0,01	0,7±0,02
Калорийность, ккал	61,5	61,5	61,5	53
Пищевые волокна, г	0,308±0,01	0,218±0,02	0,357±0,02	-
Общее число молочнокислых бактерий, КОЕ/г	1 x 10 ^{7}	1,2 x 10 ^{7}	1,1 x 10 ^{7}	1 x 10 ^{7}
Микроскопирование напитка (окрашивание метеленовым синим)	В поле зрения микроскопа видны лактобактерии, одиночные палочки, кокки	В поле зрения микроскопа видны лактобактерии, одиночные палочки, кокки	В поле зрения микроскопа видны лактобактерии, одиночные палочки, кокки	В поле зрения микроскопа видны кокки, палочки

Анализ данных показывает, что во 2 рецептуре структура была более устойчивой, наблюдался наименьший синерезис напитка, было обнаружено большее число молочнокислых бактерий. Вязкость напитка менялась в зависимости от внесённого зернового наполнителя от 24 до 28 с. Готовые образцы были продегустированы, описательный характер продемонстрирован в таблице 5.

Таблица 5 – Органолептические показатели кисломолочного напитка «Нәрлі көже»

Показатели	Опытные образцы			Контроль Йогурт греческий со злаками 2,5 % («Савушкин»)
	Рецептура 1	Рецептура 2	Рецептура 3	
Вкус	Чистый кисломолочный слабо-выраженный привкус наполнителей	Чистый кисломолочный слегка выраженный привкус наполнителей	Чистый кисломолочный с выраженным вкусом круп	Чистый, кисломолочный, без посторонних привкусов и запахов. Вкус слегка острый
Запах	Свойственный кисломолочному напитку, согласно внесенному наполнителю	Свойственный кисломолочному напитку, согласно внесенному наполнителю	Свойственный кисломолочному напитку, согласно внесенному наполнителю	Молочно – белый, равномерный по всей массе
Консистенция	Консистенция жидковатая, однородная	Консистенция в меру вязкая однородная	Консистенция в меру вязкая жидкая, однородная	Консистенция плотная с ненарушенным сгустком.
Внешний вид	Однородная жидкость светло-желтого цвета	Однородная жидкость светло-желтого цвета	Однородная жидкость светло-желтого цвета	Однородная жидкость светло-желтого цвета

В образце по рецептуре 2 были выявлены наилучшие свойства, как по физико-химическим, так и по сенсорным свойствам. Рецептура 2 в дальнейшем была исследована на различные технологические свойства и показатели пищевой безопасности.

Немаловажным является процесс хранения, при котором могут произойти заметные изменения, ухудшающие качество напитка, с этой целью были проведены исследования при хранении кисломолочного напитка «Нәрлі көже», данные представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Физико-химические, структурно-механические, органолептические показатели кисломолочного напитка «Нәрлі көже» при хранении

Продолжительность хранения, суток	pH	Плотность, кг/м^3	Вязкость, с	Органолептические показатели
0	4,1±0,01	1117±0,01	24±0,01±0,02	Вкус и запах – кисломолочный с привкусом злаков, консистенция однородная, слегка плотная, вязкая, цвет – молочно-белый с кремовым оттенком.
3	4,09±0,01	1115±0,01	22±0,01	Вкус и запах – кисломолочный с привкусом злаков, консистенция слегка плотная, однородная, вязкая слегка вязкая, цвет – молочно-белый с кремовым оттенком.
7	4,02±0,02	1116±0,01	20±0,03	Вкус и запах – кисломолочный с привкусом злаков, консистенция однородная плотная, цвет – молочно-белый с кремовым оттенком.

Результаты исследований показали, что изменения, происходящие в напитке незначительны. Кисломолочный напиток «Нәрлі көже» показал достаточно устойчивую вязкость, плотность в течении 7 суток, вкусовые свойства и консистенция не изменились.

Обсуждение научных результатов

Для кисломолочного напитка «Нәрлі көже» использовали цельное коровье молоко, закваску, зерновой наполнитель, соль поваренную пищевую.

Проводили пастеризацию, гомогенизацию и охлаждение смеси до температуры заквашивания, вносили закваску, сквашивали, охлаждали, вносили наполнители, перемешивали сгусток, расфасовывали.

В качестве закваски использовалась закваска для йогурта YO-MIX 300^{TM}300 LYO 100 DCU прямого внесения. В качестве зернового наполнителя использовали отварные крупы: рисовую, перловую, пшённую.

В таблице 7 приведена рецептура кисломолочного напитка.

Таблица 7 – Рецептура кисломолочного напитка «Нәрлі көже», 100 кг

Наименование сырья	Содержание, кг
Молоко коровье цельное с массовой долей жира 2,86 %	84,498
Перловая крупа отварная	5,000
Рисовая крупа отварная	5,000
Пшенная крупа отварная	5,000
Закваска YO-MIX 300^{TM}300 LYO 100 DCU	0,002
Соль поваренная	0,500
Всего	100

Технологический процесс производства кисломолочного напитка включает:

1) Взвешивание молока, оценка качества, подготовка зерновых компонентов (отваривание).
2) Сепарирование молока на сепараторе холодной очистки при температуре 10 ^{0}С.
3) Нормализация резервуарным способом до содержания жира 2,86 %.
4) Гомогенизация молока при температуре 60-65 ^{0}С и давлении 15 Мпа.
5) Пастеризация при температуре 85-87 ^{0}С 5-10 минут.
6) Охлаждение до температуры сквашивания 40-42 ^{0}С.
7) Заквашивание закваской прямого внесения YO-MIX 300^{TM}300 LYO 100 DCU.
8) Сквашивание в течение 5-6 часов при температуре 40-42 ^{0}С до кислотности сгустка 80 ^{0}Т, перемешивание, охлаждение до температуры 10 ^{0}С.
9) Внесение отварных круп, соли и перемешивание.

10) Розлив, упаковка, маркировка, хранение при температуре 2-4^{0}С не более 7 суток (168 часов).

По результатам работы проведённых исследований были разработаны стандарт предприятия, технологическая инструкция – Кисломолочный продукт (напиток) «Нәрлі көже» СТП КазНИСИ 30958956-01-2025 Стандарт предприятия, Кисломолочный продукт (напиток) «Нәрлі көже» ТИ КазНИСИ 30958956-01-2025 Технологическая инструкция.

Готовый продукт был исследован на пищевую безопасность, данные отражены в таблице 8.

Таблица 8 – Пищевая безопасность кисломолочного напитка «Нәрлі көже»

№ п/п	Наименование показателей, единицы измерений	НД на методы испытаний	Нормы по НД	Фактически получено
1	Токсичные элементы: мг/кг, не более: Свинец, мг/кг Мышьяк, мг/кг Кадмий, мг/кг Ртуть, мг/кг	 ГОСТ 26932-86 ГОСТ 26930-86 ГОСТ 26933-86 ГОСТ 26927-86	 0,1 0,05 0,03 0,005	 Не обнаружено Не обнаружено Не обнаружено Не обнаружено
2	Микотоксины: мг/кг, не более: Афлатоксин M_1	 ГОСТ 30711-01	 0,0005	 Не обнаружено
3	Антибиотики: Левомицетин мг/кг Тетрациклиновая группа мг/кг	 СТРК ИСО 13493-2007 СТ РК 1505-2006	 Не допускаются Не допускаются	 Не обнаружено Не обнаружено
4	Пестициды: мг/кг, не более: Гексахлорциклогексан (α-, β-, γ-изомеры) ДДТ и его метаболиты	 ГОСТ 23452-79 ГОСТ 23452-79	 0,05 0,05	 Не обнаружено Не обнаружено
5	Радионуклиды Бк/кг: не более Цезий-137 Стронций-90	 ГОСТ Р 54016-2010 ГОСТ Р 54017-2010	 не более 100 не более 25	 менее 10 менее 5,1

Результаты исследований пищевой безопасности кисломолочного напитка «Нәрлі көже» показали, что они находятся в пределах нормы.

В готовом продукте содержится: массовая доля белка – 2, 86%, массовая доля жира – 2,508%, массовая доля углеводов – 4,12%, массовая доля золы – 0,652%, массовая доля пищевых волокон – 0,218%, энергетическая ценность комбинированного кисломолочного напитка составила 90 ккал.

Проведены исследования кисломолочного напитка на аминокислотный состав, результаты представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Содержание незаменимых аминокислот кисломолочного напитка «Нәрлі көже»

Наименование аминокислот	Содержание незаменимых аминокислот, г, в 100 г белка		Аминокислотный скор, %		Степень удовлетворённости, %
	А*	С*	А*	С*	
Валин	5,0	2,46	100	49,2	49,2
Изолейцин	4,0	2,27	100	56,75	56,75
Лейцин	7,0	3,45	100	49,2	49,2
Лизин	5,5	2,91	100	52,9	52,9
Метионин	3,5	0,87	100	24,55	24,85
Треонин	4,0	1,66	100	41,5	41,5
Триптофан	1,0	0,56	100	56,0	56,0
Фенилаланин	6,0	1,77	100	29,5	29,5

А – идеальный белок*

С – расчётные данные по кисломолочному напитку*

Результаты исследований количества витаминов в кисломолочном напитке приведены в таблице 10.

Таблица 10 – Содержание витаминов кисломолочного напитка «Нәрлі көже»

Витамины	Количество, (мг%)
А (ретинол), (мг/л)	0,4
Е (α-, β-, γ-, δ– токоферолы)	1,4
С (аскорбиновая кислота)	20,0
B_1 (тиамин)	0,43
B_2 (рибофлавин), г/л	0,68

Анализ экспериментальных данных приведённых в таблице 11 показывает, что в продукте имеется профилактическое количество таких особо важных витаминов, как А, Е, С, B_1, B_2.

Для полной характеристики пищевой ценности кисломолочного напитка было определено содержание основных минеральных веществ в таблице 11.

Таблица 11 – Содержание минеральных веществ в кисломолочном напитке «Нәрлі көже», (100 г продукта)

Минеральные вещества	Содержание, мг	
	Кисломолочный напиток «Нәрлі көже»	Контроль Йогурт греческий со злаками 2,5 % («Савушкин»)
Фосфор	95±0,02	96,0±0,02
Калий	252±0,02	147,0±0,02
Натрий	250±0,02	52,0±0,02
Магний	45±0,02	15,0±0,02
Кальций	124±0,02	122,0±0,02
Железо	0,4±0,02	0,09

Комбинированный кисломолочный напиток содержит весь комплекс полезных биологически активных веществ аминокислоты, витамины, минеральные вещества. Напиток можно рекомендовать для повседневного и диетического питания.

Заключение

Разработанная технология и рецептура способствует расширению ассортимента традиционных казахских кисломолочных напитков и возможности использования при праздновании Наурыза. Готовый продукт имел сбалансированный состав, высокие технологические показатели. Отличительная особенность данного продукта от других кисломолочных напитков это сочетание традиционных национальных технологий и использование заквасок прямого внесения для йогурта, которые обеспечивают высокий уровень молочнокислых бактерий, обогащение продукта клетчаткой, витаминами и минеральными веществами. На полученный продукт имеется патент на полезную модель Кисломолочный напиток и способ его производства № 11751 [16]. В тоже время можно продолжить исследования по улучшению хранимоспособности напитка с целью повышения потребительских качеств.

Список литературы

1. Технология производства йогурта с биологически активными добавками растительного происхождения / А.Е. Бепеева и др. // Вестник Университета Шакарима. Серия технические науки. – 2025. – №. 4. – Р. 273-281.

2. Influence of sugar composition in yoghurt on sweet receptor activation and sensory sweetness perception / R. Ahmad et al // Food Chemistry. – 2026. – 148351.

3. El Kahlout, K.E., El Quqa, I.M., El Hindi, M.W., & El Bashiti, T.A. Isolation, biochemical characterization and DNA identification of yogurt starters Streptococcus thermophilus & Lactobacillus delbrueckii ssp. Bulgaricus in Gaza strip //Adv. Microbiol. – 2018. – Т. 8. – №. 12. – С. 1005-1020.

4. Morelli L. Bacteria in Yogurt and Strain-Dependent Effects on Gut Health //Yogurt in Health and Disease Prevention. – Academic Press, 2017. – С. 395-410.

5. Effect of freeze-dried protectants on the survival rate and fermentation performance of fermented milk's directed vat set starters / Yue Tian et al //Cryobiology. – 2024. – Vol. 114. – 104811.
6. Скурихин И.М. Химический состав пищевых продуктов: Справочные таблицы содержания основных пищевых веществ и энергетической ценности пищевых продуктов / И.М. Скурихин, М.Н. Волгарева. – М.: ВО Агропромиздат. – 1987. – 224 с.
7. Ахмедов А.Д. Рис (лат. Oryza) [Электронный ресурс] // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. https://cyberleninka.ru/article/n/ris-lat-or-za.
8. Исследование крупяных зерновых культур / К.Ж. Амирханов и др. // Вестник Алматинского технологического университета. – 2016. – № 1(110). – С. 18-22.
9. Био-энергетические и экологические процессы повышения урожайных, семенных свойств и технологических качеств зерна / А.И. Изтаев и др. – Алматы: ТОО «Издательство LEM», 2017. – 236 с..
10. Значение экструзионной технологии в производстве пищевых продуктов / М.Ж. Кизатова и др. // Вестник Алматинского технологического университета. – 2013. – С. 58-62.
11. ГОСТ 3624-92. Молоко и молочные продукты. Титриметрические методы определения кислотности. – М.: Госстандарт СССР. – 1992. – 8 с.
12. ГОСТ 30347-97. Молоко и молочные продукты. Методы определения *Staphylococcus aureus*. – М.: Госстандарт России. – 1997. – 14 с.
13. ГОСТ 3625-84. Молоко и молочные продукты. Методы определения плотности. – М.: Госстандарт СССР, 1984. – 12 с.
14. ГОСТ 30178-96. Сырье и продукты пищевые. Атомно-абсорбционный метод определения токсичных элементов. – М.: Госстандарт России, 1996. – 16 с.
15. Патент на полезную модель (РК) «Кисломолочный напиток и способ его производства» № 11751. Опубл. 06.02.2025. Авторы: Оралханов А.Ж., Смольникова Ф.Х., Асенова Б.К.

References

1. Tekhnologiya proizvodstva iogurta s biologicheski aktivnymi dobavkami rastitel'nogo proiskhozhdeniya / A.E. Bepeeva i dr. // Vestnik Universiteta Shakarima. Seriya tekhnicheskie nauki. – 2025. – №. 4. – R. 273-281. (in Russian).
2. Influence of sugar composition in yoghurt on sweet receptor activation and sensory sweetness perception / R. Ahmad et al // Food Chemistry. – 2026. – 148351. (in English).
3. El Kahlout, K.E., El Quqa, I.M., El Hindi, M.W., & El Bashiti, T.A. Isolation, biochemical characterization and DNA identification of yogurt starters Streptococcus thermophilus & Lactobacillus delbrueckii ssp. Bulgaricus in Gaza strip //Adv. Microbiol. – 2018. – Т. 8. – №. 12. – S. 1005-1020. (in English).
4. Morelli L. Bacteria in Yogurt and Strain-Dependent Effects on Gut Health //Yogurt in Health and Disease Prevention. – Academic Press, 2017. – S. 395-410. (in English).
5. Effect of freeze-dried protectants on the survival rate and fermentation performance of fermented milk's directed vat set starters / Yue Tian et al //Cryobiology. – 2024. – Vol. 114. – 104811. (in English).
6. Skurikhin I.M. Khimicheskii sostav pishchevykh produktov: Spravochnye tablitsy soderzhaniya osnovnykh pishchevykh veshchestv i ehnergeticheskoi tsennosti pishchevykh produktov / I.M. Skurikhin, M.N. Volgareva. – M.: VO Agropromizdat. – 1987. – 224 s. (in Russian).
7. Akhmedov A.D. Ris (lat. Oryza) [Ehlektronnyi resurs] // Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovanii. https://cyberleninka.ru/article/n/ris-lat-or-za. (in Russian).
8. Issledovanie krupyanykh zernovykh kul'tur / K.Zh. Amirkhanov i dr. // Vestnik Almatinskogo tekhnologicheskogo universiteta. – 2016. – № 1(110). – S. 18-22. (in Russian).
9. Bio-ehnergeticheskie i ehkologicheskie protsessy povysheniya urozhainykh, semennykh svoistv i tekhnologicheskikh kachestv zerna / A.I. Iztaev i dr. – Almaty: TOO «Izdatel'stvo LEM», 2017. – 236 s. (in Russian).
10. Znachenie ehkstruzionnoi tekhnologii v proizvodstve pishchevykh produktov / M.Zh. Kizatova i dr. // Vestnik Almatinskogo tekhnologicheskogo universiteta. – 2013. – S. 58-62. (in Russian).
11. GOST 3624-92. Moloko i molochnye produkty. Titrimetricheskie metody opredeleniya kislotnosti. – M.: Gosstandart SSSR. – 1992. – 8 s. (in Russian).

12. GOST 30347-97. Moloko i molochnye produkty. Metody opredeleniya Staphylococcus aureus. – M.: Gosstandart Rossii. – 1997. – 14 s. (in Russian).
13. GOST 3625-84. Moloko i molochnye produkty. Metody opredeleniya plotnosti. – M.: Gosstandart SSSR, 1984. – 12 s. (in Russian).
14. GOST 30178-96. Syr'e i produkty pishchevye. Atomno-absorbtsionnyi metod opredeleniya toksichnykh ehlementov. – M.: Gosstandart Rossii, 1996. – 16 s. (in Russian).
15. Patent na poleznuyu model' (RK) «Kislomolochnyi napitok i sposob ego proizvodstva» № 11751. Opubl. 06.02.2025. Avtory: Oralkhanov A.Zh., Smol'nikova F.Kh., Asenova B.K. (in Russian).

Ф.Х. Смольникова*, Ж.М. Атамбаева, А.О. Утегенова, А.А. Даутова, Н.Р. Муслимова
Шәкәрім университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинки көшесі, 20 А1
*e-mail: f-smolnikova@mail.ru

НӘРЛІ-КӨЖЕ СҮТҚЫШҚЫЛДЫ СУСЫН ТЕХНОЛОГИЯСЫ

Мақалада «Нәрлі-көже» қышқыл сүтті сусынының технологиясын әзірлеу нәтижелері ұсынылған. Зерттеудің өзектілігі Қазақстан Республикасы халқының денсаулығын сақтау тұжырымдамасын іске асырумен және функционалдық тағам өнімдерінің ассортиментін кеңейту қажеттілігімен негізделеді. Негізгі шикізат ретінде сиыр сүті, күріш, тары және арпа жармалары пайдаланылды. Ашытқы ретінде YO-MIX 300TM300 LYO 100 DCU өндірістік ашытқысы қолданылды.

Тәжірибелік рецептуралар сынақтан өткізіліп, жоғары органолептикалық көрсеткіштерімен, біркелкі консистенциясымен және тағамдық құндылығының жоғарылығымен ерекшеленетін өнім алуға мүмкіндік беретін сүт және өсімдік текті шикізаттың оңтайлы арақатынасы анықталды. Зерттелген нұсқалардың ішінде № 2 рецептура сапа көрсеткіштері бойынша ең жоғары нәтижелер көрсетті.

Зерттеу нәтижелері әзірленген сусын құрамында адам денсаулығын қолдауға қажетті нәруыздар, майлар, көмірсулар, тағамдық талшықтар, дәрумендер мен минералдық заттардың бар екенін көрсетті. Өнімнің сақтау мерзімі 7 тәулікке дейін жететіні анықталды, ал оның ең жоғары сапа көрсеткіштері 36 сағат бойы сақталды.

Өнім тағамдық қауіпсіздік көрсеткіштері бойынша зерттеліп, олардың белгіленген нормативтік талаптарға сәйкес келетіні анықталды. Алынған қышқыл сүтті сусын кеңінен тұтынуға, соның ішінде диеталық және профилактикалық тамақтануда пайдалануға, сондай-ақ функционалдық тағам өнімдерінің ассортиментін кеңейтуге ұсынылады.

Әзірленген өнімге «Қышқыл сүтті сусын және оны өндіру тәсілі» атты пайдалы модельге №11751 патенті алынды.

Түйін сөздер: *ашытылған сүт сусыны, ашытқы, тұтас сүт, ашыту, пастерлеу.*

F.H. Smolnikova*, J.M. Atambayeva, A.O. Utegenova, A.A. Dautova, N.R. Muslimova
Shakarim University,
071412, Republic of Kazakhstan, Semey, 20 Glinki St., A1
*e-mail: f-smolnikova@mail.ru

TECHNOLOGY OF THE FERMENTED MILK DRINK «NARLI-KOZHE»

The article presents the development of the technology for a fermented milk beverage called «Närli-Koje». The relevance of the study is determined by the implementation of the public health concept of the Republic of Kazakhstan, which aims to expand the range of functional and health-promoting food products. Cow's milk, rice, millet, and pearl barley were used as the main raw materials. The YO-MIX 300TM300 LYO 100 DCU starter culture was used for fermentation.

Experimental formulations were tested, and the optimal ratio of dairy and plant-based raw materials was determined, enabling the production of a beverage with high sensory quality, a homogeneous consistency, and enhanced nutritional value. Among the formulations studied, Formulation No. 2 demonstrated the best quality characteristics.

The results showed that the developed beverage contains proteins, fats, carbohydrates, dietary fiber, vitamins, and minerals essential for maintaining human health. The product was found to have a shelf life of up to 7 days, while its optimal quality characteristics were maintained for 36 hours.

The beverage was evaluated for food safety, and all indicators complied with the established regulatory requirements. The developed fermented milk beverage can be recommended for widespread consumption, including dietary and preventive nutrition, as well as for expanding the range of functional food products.

A utility model patent No. 11751, entitled «Fermented Milk Beverage and Method of Its Production», was obtained for the developed product.

Key words: *fermented milk drink, sourdough, whole milk, fermentation, pasteurization.*

Сведения об авторах

Фарида Харисовна Смольникова* – кандидат технических наук, ассоциированный профессор кафедры «Пищевые технологии», Шәкәрім университет, Казахстан; e-mail: f-smolnikova@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8777-5313.

Жибек Манаповна Атамбаева – старший преподаватель, PhD кафедры «Пищевая технология», Шәкәрім университет, Казакстан; e-mail: zh.atambayeva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7899-870X.

Асия Оразбековна Утегенова – PhD, и.о ассоцированного профессора кафедры «Пищевая технология», Шәкәрім университет, Казакстан; e-mail: asia_aksu@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3378-6815.

Асель Алибековна Даутова – старший преподаватель кафедры «Пищевая технология», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: a.dautova@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2373-2445.

Назерке Рахифовна Муслимова – магистр технических наук, докторант кафедры «Пищевых технологии», Шәкәрім университет, Республика Казакстан; e-mail: muslimova.n.r@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2536-0590.

Авторлар туралы мәліметтер

Фарида Харисқызы Смольникова* – техника ғылымдарының кандидаты, «Тамақ технологиясы» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Шәкәрім университеті, Қазақстан; e-mail: f-smolnikova@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8777-5313.

Жибек Манаповна Атамбаева – «Тамақ технологиясы» кафедрасының аға оқытушысы, PhD, Шәкәрім университеті, Қазақстан; e-mail: zh.atambayeva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7899-870X.

Асия Оразбековна Утегенова – PhD, «Тамақ технологиясы» кафедрасының қауымдастырылған профессор м.а., Шәкәрім университеті; e-mail: asia_aksu@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3378-6815.

Асель Алибековна Даутова – «Тамақ технологиясы» кафедрасының аға оқытушысы, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: a.dautova@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2373-2445.

Назерке Рахифовна Муслимова – техника ғылымдарының магистрі, «Тамақ технологиясы» кафедрасының докторанты, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: muslimova.n.r@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2536-0590.

Information about the authors

Farida Smolnikova* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department «Food Technology», Shakarim University, Kazakhstan; e-mail: f-smolnikova@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8777-5313.

Zhibek Atambayeva – senior lecturer, PhD, of the Department of Food Technology, Shakarim University, Kazakhstan; e-mail: zh.atambayeva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7899-870X.

Assiya Orazbekovna Utegenova – PhD, Acting Associate Professor of the Department of «Food Technology», Shakarim University, Kazakhstan; e-mail: asia_aksu@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3378-6815.

Assel Dautova – Master, Senior Lecturer of the Department of Food Technology, Shakarim University; e-mail: a.dautova@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2373-2445.

Nazereke Muslimova – Master of Technical Sciences, Doctoral Student at the Department of Food Technologies, Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: muslimova.n.r@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2536-0590.

Поступила в редакцию 02.06.2026
Поступила после доработки 17.08.2026
Принята к публикации 02.09.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-55

BY 4.0
Check for updates

МРНТИ: 65.63.33

А.М. Таева, Ф.Т. Диханбаева, Ж.К. Имангалиева, М.К. Изтилеуов, Р. Бақытжанұлы*
Алматинский технологический университет,
050061, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Фурката 348/4
*e-mail: rustem_zhanys@mail.ru

ОЦЕНКА КАЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КИСЛОМОЛОЧНОГО НАПИТКА, ОБОГАЩЕННОГО ЙОДОМ

Аннотация: *В работе представлена комплексная оценка кисломолочного напитка (йогурта), обогащённого йодом в форме йодказеина, как перспективного функционального продукта для профилактики йододефицитных состояний в Республике Казахстан. Актуальность исследования обусловлена сохраняющейся проблемой дефицита йода в рационе населения, несмотря на обязательное йодирование поваренной соли, а также необходимостью выявления новых пищевых носителей микроэлемента, традиционно употребляемых в стране. Целью стало изучение пищевой ценности и микробиологических показателей обогащённого продукта. В лабораторных условиях в пастеризованное молоко коровье добавляли йод в расчёте 25 мкг на порцию, вносили закваску штаммами Streptococcus thermophilus и Lactobacillus delbrueckii subsp. bulgaricus, проводили сквашивание и созревание. Установлено что оптимальной вносимой дозировкой считается 25 мкг йодказеина на 100г продукта. Анализ проводился по утверждённым методикам государственного стандарта (физико-химические и микробиологические показатели, уровень йода). Полученные данные свидетельствуют о полном соответствии продукта всем требованиям по безопасности. Обогащение не повлияло на технологические характеристики продукта. Разработанный йодированный йогурт является безопасным, стабильным и функционально улучшенным продуктом, способным эффективно использоваться в профилактике йододефицита без потери привычных потребительских качеств. Полученные результаты подтверждают перспективу промышленного применения технологии в пищевой промышленности Казахстана.*

Ключевые слова: *йододефицит, обогащение йодом, кисломолочный напиток, йогурт, микробиологические показатели, пищевая ценность.*

Введение

Йод один из важнейших микроэлементов, участвующих в синтезе гормонов щитовидной железы и обеспечивающих нормальное функционирование нервной системы. Недостаток йода остаётся серьёзной проблемой здравоохранения, особенно угрожающей беременным женщинам и детям. Дефицит йода способен вызывать рост перинатальной смертности, врождённые аномалии развития (включая кретинизм) и необратимое снижение когнитивных способностей [1]. По данным ВОЗ [2], значительная часть мирового населения (до трети школьников) по-прежнему страдает от дефицита йода, несмотря на отсутствие эффективных профилактических мер.

В Казахстане борьба с йододефицитом в основном ведётся за счёт массового йодирования поваренной соли. С 2003 года обязательное обогащение соли йодом закреплено законодательно [3]. Закон «О профилактике йододефицитных заболеваний» предусматривает механизмы контроля за качеством и стимулирует развитие производства продуктов, обогащённых йодом [4]. Однако объём потребления соли без учёта изменений в рационе или ограничений в питании может оказаться недостаточным, что делает актуальным поиск альтернативных пищевых носителей йода.

Следует отметить, что ранее проведённые исследования подтвердили, что традиционный пищевой набор (коровье молоко, овощи) не справляется с обеспечением организма необходимым количеством йода, поэтому внедрение йода в популярные продукты питания представляется логичной и эффективной стратегией [5].

При разработке и оценке йодированных напитков необходимо учитывать ряд специфических аспектов. В первую очередь, добавление йода может оказывать влияние на

©А.М. Таева, Ф.Т. Диханбаева, Ж.К. Имангалиева, М.К. Изтилеуов, Р. Бақытжанұлы, 2026

состав и свойства молочнокислых бактерий, а также на динамику развития дрожжей. Так, в ходе эксперимента с кефиром установлено, что йод замедляет рост лактобацилл: за 12 дней хранения их количество увеличилось лишь в 2,5 раза, в то время как в контрольной группе в 3,2 раза [6]. Зарубежные исследования демонстрируют общую эффективность ферментативного обогащения органическим йодом [7], однако с учётом различий в рационе и используемых сырьевых базах прямой перенос результатов затруднен.

Анализ зарубежного опыта в области обогащения йогуртов растительными компонентами демонстрирует, что оптимально подобранные матрицы способны не только защищать пробиотические штаммы от разрушения при длительном хранении, вместе с тем положительно влияя на текстуру продукта и его антиоксидантные свойства [8]. На основании этих данных можно предположить, что органические формы йода оказывают меньшее ингибирующее действие на молочнокислые бактерии по сравнению с неорганическими формами, что способствует сохранению в готовом продукте высокой пробиотической активности.

Обзор работ по фортификации йогурта указывает на необходимость одновременно оценивать содержание нутриента, его сохранность и показатели качества продукта [9]. Для йода существенное значение имеют форма соединения и условия технологической обработки [10]. Молочные продукты являются важным, но изменчивым пищевым источником йода [11], а при разработке функционального йогурта необходимо контролировать кислотность, структурные показатели и жизнеспособность заквасочной микрофлоры при хранении [12]. Как отмечено в работе, полученные результаты указывают на то, что использование йодказеина способствует повышению стабильности йода при сохранении качественных характеристик кисломолочных продуктов, что подтверждает потенциал его применения в разработке обогащенных йодом функциональных молочных продуктов [13].

В международных научных работах подчеркивается ключевое значение пребиотических веществ, при введении новых нутриентов они поддерживают стабильность микробного состава ферментированных молочных продуктов. В процессе ферментации и последующем хранении продукта определенные олигосахариды способствуют активному размножению Lactobacillus acidophilus и Bifidobacterium animalis ssp. Lactis, что позволяет гарантировать сохранение жизнеспособности полезных микроорганизмов на протяжении всего срока годности [14].

Особое внимание в зарубежных публикациях уделяется влиянию обогащения на физико-химические и органолептические параметры продукта в ходе хранения. Отмечается, что пробиотические ферментированные продукты, обогащённые микронутриентами, могут демонстрировать повышенную микробиологическую устойчивость и улучшенную биодоступность полезных веществ, если добавка не нарушает pH и не вызывает преждевременного окисления липидов или белков [15].

По данным Niero и соавторов, среднее содержание йода в исследованных розничных цельномолочных и нежирных йогуртах составляло соответственно 258,46 и 289,33 мкг/кг [16]. В другом исследовании медианная сохранность йода после производства йогурта достигала 104%, тогда как при производстве сыров 75-84% йода переходило в сыворотку [17]. Следовательно, исходный уровень йода и его сохранность зависят от сырья и технологии конкретного продукта.

Целью исследования является комплексная оценка микробиологических и пищевых характеристик йогурта, обогащённого йодом, включающая определение содержания йода и витаминов, исследование синерезиса и вязкости, оценку микробиологических показателей и пищевой ценности готового продукта. Для реализации поставленной задачи были приготовлены образцы продукта с заданной концентрацией и формой йода, после чего проведено исследование состава и качества. Необходимо определить содержание добавленного йода в готовом продукте, а также проанализировать его устойчивость в процессе хранения, оценить уровень основных микроорганизмов: лактобацилл, бифидобактерий, дрожжей и плесени, и измерить ключевые физико-химические показатели: белки, жиры, углеводы, кислотность и энергетическую ценность. Комплексный анализ позволит определить изменения технологических и питательных свойств напитка при йодировании и обосновать перспективы его использования в профилактических целях.

С учётом актуальности проблемы дефицита йода в Республике Казахстан и на международной арене, создание и изучение йодированного кисломолочного напитка представляется особенно значимым. Обогащение должно не только повысить пищевую ценность продукта, но и сохранить безопасные микробиологические и органолептические характеристики. Полученные результаты позволят сформулировать обоснованные рекомендации по технологии производства функционального ферментированного напитка, обогащённого йодом, которые могут быть использованы в пищевой промышленности Казахстана.

Условия и методы исследования

В ходе исследования обогащение кисломолочного напитка йодом осуществлялось по разработанной технологической схеме (рис. 1). В качестве основного сырья использовалось пастеризованное цельное коровье молоко, соответствующее всем требованиям согласно ГОСТ 31449-2013 «Молоко коровье сырое».

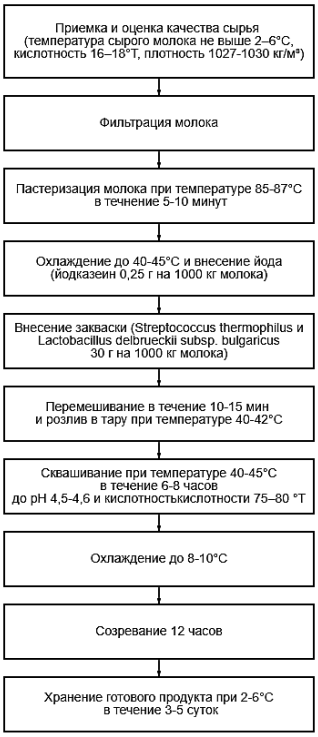


Рисунок 1 – Технологическая схема производства йогурта, обогащенного йодом

Вначале технологического этапа проводили фильтрацию молока с последующей пастеризацией молока при температуре 85-87 °С в течение 5-10 минут. После чего следует охлаждение до 40-45°С и дальнейшее введением йода в форме йодказеина в расчете 25 мкг йода на 100г молока. В состав закваски входили штаммы Streptococcus thermophilus и Lactobacillus delbrueckii subsp. Bulgaricus в расчете 3 мг на 100 г молока, компоненты тщательно перемешивались, проводился розлив с последующим сквашиванием при температуре 40-45°С в течение 6-8 часов. Далее следует охлаждение до 8-10°С и с последующим созреванием продукта в течение 12 часов и хранении при 2-6°С в течение 3-5 суток.

Все технологические этапы проводились в лабораторных условиях с постоянной проверкой соответствия параметров температуры и времени каждого отдельного процесса, что в свою очередь обеспечило стабильность показателей и соответствие установленным требованиям к кисломолочным продуктам.

Следующим этапом работы было определение физико-химических и микробиологических показателей йогурта, обогащенного йодом. Общее содержание белка определялось по ГОСТ 25179-2014 методом Кьельдаля на автоматизированной системе, включающей минерализацию пробы в концентрированной серной кислоте с добавлением катализатора и сульфата калия при 420°С. После чего следовал этап дистилляции аммиака

в борную кислоту и титрование полученного раствора стандартизированным раствором серной кислоты с использованием индикатора метилового красного и метиленового синего до изменения окраски.

Массовая доля жира определялась по ГОСТ 5867-90 ускоренным кислотным методом Гербера. В чистый жиромер отмеряли 10 см³ серной кислоты плотностью 1,81-1,82 г/см³ и вносили навеску йогурта массой 5 г, после чего добавляли 1 см³ изоамилового спирта. Далее смесь тщательно перемешивали и ставили на водяную баню в течение 5 минут при температуре 65±2°С. По истечение времени жиромер центрифугировали 5 минут при 1000-1200 об/мин. Измерение проводили по шкале жиромера предварительно выдержав на водяной бане в течение 5 минут при температуре 65±2°С.

Массовая доля углеводов определялась перманганатометрическим методом. После осаждения белков и последующей фильтрации пробы проводили реакцию с реагентами Фелинга. Образовавшийся осадок оксида меди растворяли в железоаммониевых квасцах и титровали раствором марганцовокислого калия до появления устойчивой розовой окраски.

Содержание йода определялось йодометрическим методом согласно ГОСТ 31505-2012. Выбор йодометрического метода обусловлен его высокой точностью и воспроизводимостью, а также доступностью реактивов. Подготовка проб включала подщелачивание навески, ее высушивание и сухое озоление в муфельной печи при температуре 450±25°С. Образец подвергался щелочной минерализации в муфельной печи при температуре 550-600°С, зола растворялась в воде, после чего подкислялась серной кислотой и обрабатывалась избытком йодказеина для выделения свободного йода. Затем свободный йод оттитровывался стандартизированным раствором тиосульфата натрия 0,005 М в присутствии крахмала до полного исчезновения синей окраски. Данный метод характеризуется пределом обнаружения 0,05 мг/кг (с рабочим диапазоном от 0,10 до 100 мг/кг), пределом повторяемости 8%, воспроизводимости 15% и погрешностью не более 10% (P = 0,95).

Содержание кальция определялось методом ГОСТ Р 55331-2012 основанном на предварительном осаждении белков молока трихлоруксусной кислотой. При последующем выделении кальция из полученного фильтрата при помощи осаждения оксалатом аммония. Заключительный этап титриметрическое определение массовой доли кальция.

Содержание витаминов группы В определялось методом согласно ГОСТ 31483-2012. Для подготовки пробы навеску массой 1 г смешивали с дистиллированной водой и подвергали ультразвуковой экстракции в течение 20 минут при температуре 50°С. Полученный раствор после охлаждения центрифугировали и фильтровали через мембранный фильтр 0,45 мкм. Разделение компонентов осуществляли в кварцевом капилляре с применением боратного буферного раствора при напряжении 20 кВ, фиксируя сигнал при длине волны 200 нм. Идентификацию веществ выполняли на основе сравнения времени их миграции с эталонными значениями, а вычисление концентраций проводили методом внешней калибровки по площади пиков в трехкратной повторности.

Микробиологическая оценка готового обогащенного напитка проводилась для подтверждения его безопасности и соответствия требованиям качества по комплексному определению ключевых показателей с применением утвержденных методик согласно ГОСТ 32901-2014 «Молоко и молочная продукция. Методы микробиологического анализа», что гарантировало высокую точность, воспроизводимость и сопоставимость полученных данных.

Перед проведением анализа образцы подвергались серийному десятикратному разведению в стерильном физиологическом растворе с целью полного высвобождения микроорганизмов из матрицы продукта и уменьшения влияния жировой и белковой составляющих. Далее определялось содержание бактерий группы кишечной палочки (БГКП) согласно ГОСТ 9225-87 по методу посева на жидкие селективные среды Кесслера с последующим контролем образования газа при инкубации при 37±1°С в течение 24-48 часов

Патогенные микроорганизмы, такие как сальмонеллы, определялись по ГОСТ 31659-2012 с применением горизонтального метода с предварительным обогащением в жидкой питательной среде, последующим пересевом на селективно-диагностический агар и идентификацией выросших колоний по результатам биохимических и серологических исследований.

Staphylococcus aureus выявлялся в соответствии с ГОСТ 30347-2016, проба инкубировалась при 37°С в течение 24-48 часов, подсчитывались типичные колонии и подтверждалась коагулазная активность.

Listeria monocytogenes выделялись по ГОСТ 32031-2012 с двухэтапным обогащением в жидких селективных средах, последующим выделением на хромогенных агарах и подтверждением ферментативных характеристик и гемолитических свойств.

Количество плесеней и дрожжей оценивалось по ГОСТ 33566-2015 методом поверхностного посева на агар с хлорамфениколом при температуре 25±1°С в течение 5 суток с подсчётом характерных колоний.

Содержание молочнокислых микроорганизмов, включая штаммы Streptococcus thermophilus и Lactobacillus delbrueckii subsp. bulgaricus, определялось по ГОСТ 33951-2016 путём посева на жидкие питательные среды, подсчёта колониеобразующих единиц и дифференциации по морфологическим, культуральным и биохимическим признакам.

Все исследования проводились в асептических условиях в аккредитованной лаборатории с соблюдением требований СанПиН 2.3.2.1078-01, включая использование средств индивидуальной защиты, регулярную дезинфекцию рабочих поверхностей, стерилизацию инструментов и исключение перекрёстного загрязнения.

Результаты исследования

По результатам проведённых исследований была выполнена комплексная оценка пищевой ценности, минерального состава, витаминного состава, показателей безопасности и микробиологического качества йогурта, обогащённого йодом. Полученные данные представлены на рисунках 2-3 и в таблицах 1-2.

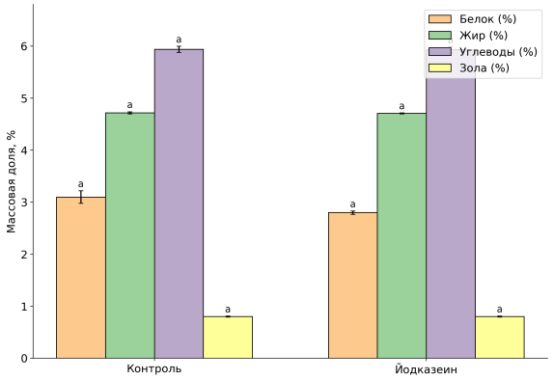


Рисунок 2 – Массовая доля нутриентов в кисломолочном напитке, обогащённом йодом

Физико-химический анализ показал, что опытный образец йогурта характеризовался сбалансированным содержанием основных нутриентов. Массовая доля белка составила 2,80±0,03%, жира – 4,71±0,01%, углеводов – 5,93±0,06%. Полученные значения свидетельствуют о сохранении пищевой ценности продукта после внесения йодсодержащего компонента.

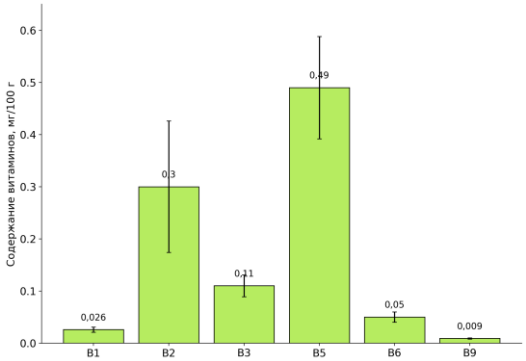


Рисунок 3 – Содержание витаминов группы В в кисломолочном напитке, обогащённом йодом

Анализ витаминного состава показал наличие в продукте витаминов группы В. Наиболее высокое содержание было установлено для витамина В5 – 0,490±0,098 мг/100 г и

витамина B2 – 0,300±0,126 мг/100 г. Содержание витамина B3 составило 0,110±0,021 мг/100 г, витамина B6 – 0,050±0,010 мг/100 г, витамина B1 – 0,026±0,005 мг/100 г, витамина B9 – 0,009±0,001 мг/100 г. Полученные данные подтверждают сохранение витаминной ценности кисломолочного продукта.

Таблица 1 – Показатели пищевой ценности и минерального состава йогурта, обогащённого йодом

Наименование показателей, единицы измерения	Контрольный образец	Фактические результаты
Энергетическая ценность, ккал	75,8	77
Минеральные элементы: – I, мкг/100г – Ca, мг/100г	 7,19±0,40 113,4±1,02	 28,07±0,31 113,95±1,08

Минеральный состав йогурта представлен в таблице 1. Установлено, что содержание йода в готовом продукте составило 28,07±0,31 мкг/100 г, а содержание кальция – 113,95±1,08 мг/100 г. Энергетическая ценность продукта составила 77 ккал/100 г.

Таблица 2 – Результаты определения микробиологических показателей йогурта обогащенного йодом

Наименование показателей, единицы измерения	Норма по НД	Контрольный образец	Фактические результаты
Токсичные элементы: – свинец, мг/л – кадмий, мг/л – мышьяк, мг/л – ртуть, мг/л	 0,02 0,02 0,05 0,005	 Не обнаружено Не обнаружено Не обнаружено Не обнаружено	 0,003±0,0001 Не обнаружено Не обнаружено Не обнаружено
Микробиологические показатели: – БГКП (коли-формы), $см^3$ (г), в 0,1г продукта – Патогенные, в т.ч. сальмонеллы, $см^3$ (г), в 25г продукта – L. Monocytogenes, $см^3$ (г), в 25г продукта	 Не допускается Не допускается Не допускается	 Не обнаружено Не обнаружено Не обнаружено	 Не обнаружено Не обнаружено Не обнаружено
– S. Aureus, $см^3$ (г), в 1г продукта – Плесень, КОЕ/ $см^3$ (г) – Дрожжи, КОЕ/ $см^3$ (г) – Молочнокислые микроорганизмы, не менее КОЕ/ $см^3$ (г)	Не допускается 50 50 $1*10^7$	Не обнаружено 6 5 $11*10^6$	Не обнаружено 7 3 $14*10^6$

Микробиологический анализ показал, что в исследуемом образце не были обнаружены БГКП, патогенные микроорганизмы, включая Salmonella, Listeria monocytogenes и Staphylococcus aureus. Количество плесеней составило 7 КОЕ/г, дрожжей – 3 КОЕ/г, что значительно ниже допустимого уровня. Содержание молочнокислых микроорганизмов составило $1,4×10^7$ КОЕ/г, что соответствует требованиям нормативной документации для кисломолочных продуктов.

Содержание токсичных элементов также находилось в пределах допустимых значений. Количество свинца составило 0,003±0,0001 мг/кг при нормативном значении не более 0,02 мг/кг, тогда как кадмий, мышьяк и ртуть не были обнаружены. Это подтверждает безопасность исследуемого продукта по санитарно-гигиеническим показателям.

Результаты сравнительной оценки контрольного и обогащённого йодказеином образцов при хранении представлены в таблицах 3-4. Основное внимание уделено сохранности йода, динамике кислотности, синерезису, вязкости и жизнеспособности характерной заквасочной микрофлоры.

В образце с йодказеином содержание йода снизилось с 24,9±0,35 мкг/100 г в 1-е сутки до 23,0±0,33 мкг/100 г на 7-е сутки; сохранность составила 92,4%, а потеря – 7,6%. В контроле содержание природного йода уменьшилось с 8,2±0,22 до 7,4±0,19 мкг/100 г. На 7-е сутки pH обогащённого образца составлял 4,24±0,03, а титруемая кислотность – 102,1±1,8°Т; значения оставались близкими к контролю (4,26±0,03 и 100,3±1,9°Т).

Таблица 3 – Содержание йода, pH и титруемая кислотность контрольного и обогащённого йодказеином йогурта при хранении

Сутки	pH К	pH ЙК	°Т К	°Т ЙК	Йод К, мкг/100 г	Йод ЙК, мкг/100 г
1	4,46±0,02	4,45±0,02	78,4±1,4	79,3±1,4	8,2±0,22	24,9±0,35
3	4,39±0,03	4,38±0,03	85,6±1,6	86,8±1,5	7,9±0,20	24,0±0,31
5	4,33±0,02	4,31±0,02	92,7±1,8	94,0±1,7	7,7±0,21	23,5±0,29
7	4,26±0,03	4,24±0,03	100,3±1,9	102,1±1,8	7,4±0,19	23,0±0,33

Таблица 4 – Синерезис, вязкость и количество молочнокислых бактерий в контрольном и обогащённом йодказеином йогурте при хранении

Сутки	Синерезис К, %	Синерезис ЙК, %	Вязкость К, мПа·с	Вязкость ЙК, мПа·с	LAB К, log КОЕ/г	LAB ЙК, log КОЕ/г
1	10,7±0,9	11,6±0,8	1874±51	1906±47	8,23±0,07	8,26±0,06
3	13,9±0,8	14,3±0,9	1762±44	1828±42	8,04±0,06	8,10±0,05
5	15,8±1,1	17,4±1,0	1669±41	1741±38	7,91±0,08	7,99±0,07
7	19,7±1,0	20,4±1,1	1581±35	1667±37	7,70±0,07	7,84±0,06

Синерезис возрастал в обоих вариантах и на 7-е сутки составлял 19,7±1,0% в контроле и 20,4±1,1% в образце с йодказеином. Вязкость снижалась соответственно до 1581±35 и 1667±37 мПа·с. Численность молочнокислых бактерий уменьшилась с 8,23±0,07 до 7,70±0,07 log КОЕ/г в контроле и с 8,26±0,06 до 7,84±0,06 log КОЕ/г в обогащённом образце. Йодказеин не снижал сохранность заквасочной микрофлоры относительно контроля.

Результаты исследования показали, что обогащение йогурта йодом позволяет повысить его функциональную ценность без ухудшения пищевой ценности, витаминного состава и микробиологической безопасности. Полученные данные подтверждают возможность использования разработанного продукта как функционального кисломолочного напитка, предназначенного для дополнительного поступления йода в рацион.

Обсуждение научных результатов

Научная новизна работы заключается в комплексной оценке содержания и сохранности белоксвязанной формы йода в йогурте, а также структурно-механических характеристик, физико-химических показателей продукта и жизнеспособности заквасочной микрофлоры в процессе хранения.

В исследовании Niero и соавторов среднее содержание йода составляло 25,85 мкг/100 г в цельномолочном и 28,93 мкг/100 г в нежирном йогурте [16]. В настоящей работе содержание природного йода в контроле было ниже и уменьшилось с 8,2±0,22 до 7,4±0,19 мкг/100 г, тогда как в образце с йодказеином оно составляло 24,9±0,35 и 23,0±0,33 мкг/100 г. Различия между контрольными значениями могут быть связаны с содержанием йода в исходном молоке, рационом животных, сезоном и условиями производства.

Van der Reijden и соавторы сообщили о медианной сохранности йода 104% непосредственно после производства йогурта [17]. В настоящем исследовании после 7 суток холодильного хранения сохранность составила 92,4%; различие может быть связано с продолжительностью хранения и формой источника йода. В работе Dalevska и соавторов количество лактобацилл в йодированном кефире за 12 суток увеличилось в 2,5 раза против 3,2 раза в контроле [6]. В настоящей работе на 7-е сутки численность молочнокислых бактерий составляла 7,84±0,06 log КОЕ/г в образце с йодказеином и 7,70±0,07 log КОЕ/г в контроле. Снижения относительно контроля не наблюдалось; различие с данными по кефиру может быть связано с белоксвязанной формой йода, дозировкой, составом закваски и режимом хранения.

Физико-химические характеристики экспериментального образца йогурта, обогащённого йодом, включают массовую долю белка 2,80±0,03%, жира 4,71±0,01% и углеводов 5,93±0,06%. При разработке обогащенных йогуртов необходимо учитывать, что каждая добавка нуждается в индивидуальной технологической оценке, так как способна влиять на органолептические, физико-химические и микробиологические свойства продукта [9]. Анализ полученных данных подтверждает, что введение йодсодержащей добавки в виде йодказеина не повлияло на сохранность пищевой ценности продукта, что доказывает совместимость выбранной добавки с молочной матрицей.

В готовом продукте содержание йода составило 28,07±0,31 мкг/100 г, что свидетельствует об успешном применении выбранного метода обогащения. Авторы Wachowska et al. [10] отмечают, что йодирование продуктов питания представляет собой значимое направление в профилактике йододефицитных состояний, особенно когда рацион человека не обеспечивает достаточное поступление этого микроэлемента. Вследствие чего применение кисломолочного напитка в качестве носителя йода можно считать перспективной стратегией для расширения ассортимента функциональных продуктов.

Содержание кальция в опытном образце составило 113,95±1,08 мг/100 г, что является важным показателем пищевой ценности продукта. Witard et al. [11] отмечают, что молочные продукты могут служить значимым источником как белка, так и йода в рационе человека. Это подтверждает целесообразность использования молочной основы для создания функциональных продуктов, направленных на дополнительное поступление эссенциальных нутриентов.

Микробиологические исследования показали, что внесение йода в используемой дозировке не нарушило стабильность заквасочной микрофлоры и не сопровождалось развитием патогенных или условно-патогенных микроорганизмов. В опытном образце концентрация молочнокислых микроорганизмов составила $1,4\times10^7$ КОЕ/г, что превышает минимально допустимый уровень $1,0\times10^7$ КОЕ/г. Сходные выводы о необходимости контроля жизнеспособности заквасочных культур при разработке функциональных йогуртов представлены в исследовании Sadighbathi et al. [12], где показано, что дополнительные функциональные компоненты могут влиять на качество йогурта и активность заквасочной микрофлоры в процессе хранения.

Уровень плесеней составил 7 КОЕ/г, дрожжей – 3 КОЕ/г, что значительно ниже установленного предельного значения 50 КОЕ/г. Отсутствие БГКП, Salmonella, Listeria monocytogenes и Staphylococcus aureus подтверждает соответствие продукта требованиям микробиологической безопасности. Внесение йода не ухудшило санитарно-гигиенические показатели в готовом продукте, что было определено за счет достаточного уровня молочнокислых бактерий и малого количества плесневых грибов и дрожжей.

Результаты исследования подтверждают, что обогащение йогурта йодом в виде йодказеина повышает его функциональную ценность, не ухудшая физико-химические и микробиологические свойства. Полученные данные соответствуют современным подходам к созданию функциональных йогуртов, согласно которым эффективность обогащения оценивается не только по содержанию вносимого нутриента, но и по сохранности пищевой ценности, безопасности и стабильности заквасочной микрофлоры [9-12].

Заключение

В рамках проведенного исследования была проведена комплексная оценка показателей пищевой ценности, качества и безопасности приготовленного обогащенного йодом йогурта. Результаты проведенного исследования показывают, что обогащение йодказеином усиливает функциональную направленность продукта, полностью соответствует техническим регламентам безопасности и стабильности микрофлоры и сохранности нутриентов, при этом не снижается пищевая ценность продукта.

Практическая значимость результатов исследования сводится к разработке доступного и безопасного функционального продукта, который послужит естественным источником йода для регионов с его дефицитом. После 7 суток хранения продукт содержал 23,0±0,33 мкг йода/100 г, а показатели качества оставались близкими к контролю. Дальнейшие исследования должны включать более длительное хранение, оценку биодоступности йода, потребительское тестирование и промышленную апробацию.

В образце с йодказеином содержание йода составляло 24,9±0,35 мкг/100 г в 1-е сутки и 23,0±0,33 мкг/100 г на 7-е сутки; сохранность йода составила 92,4%. Значения pH, титруемой кислотности, синерезиса и вязкости были близкими к контрольным, а численность молочнокислых бактерий на 7-е сутки была не ниже контрольного значения.

Согласно рекомендациям совместной экспертной консультации ФАО/ВОЗ, суточная потребность в йоде для подростков и взрослых составляет 150 мкг [18]. При содержании 23,0 мкг/100 г на 7-е сутки порция продукта массой 150–200 г обеспечивает 34,5-46,0 (42-56) мкг йода, или приблизительно 23-31 (30-40) % суточной потребности без необходимости

коррекции рациона или добавления биологически активных добавок. Расчёт основан на фактической концентрации йода и не является прямой оценкой его биодоступности. Продукт рекомендуется широкому кругу потребителей, включая детей, беременных и пожилых людей за счет его функциональности и высокой микробиологической безопасности.

Исследование выполнено в рамках научного проекта ИРН AP23488862 «Разработка комплекса интенсифицирующих способов глубокой переработки мясомолочного сырья с низкими технологическими показателями и получение на их основе фортифицированных продуктов».

Список литературы

1. Beisbekova A.K. Medico-social effectiveness of biological monitoring of iodine deficiency status (IDS) among women of reproductive age in Kazakhstan / A.K. Beisbekova, F.E. Ospanova, Z.T. Tolysbayeva // Ann. Agric. Environ. Med. – 2019. – Vol. 26, № 1. – P. 73-77. [Ehlektronnyi resurs]. https://www.aaem.pl/Medico-social-effectiveness-of-biological-monitoring-of-iodine-deficiency-status,90718,0,2.html (data obrashcheniya: 11.04.2026).
2. World Health Organization. Iodine deficiency (Nutrition Landscape Information System (NLiS) data) [Ehlektronnyi resurs]. https://www.who.int/data/nutrition/nlis/info/iodine-deficiency (data obrashcheniya: 11.04.2026).
3. Global Alliance for Improved Nutrition (GAIN), Kazakh Academy of Nutrition. Fortification Assessment Coverage Toolkit survey in Kazakhstan, 2016-2018. – 53 p. [Ehlektronnyi resurs]. https://www.gainhealth.org/resources/reports-and-publications/fortification-assessment-coverage-toolkit-fact-survey-kazakhstan (data obrashcheniya: 11.04.2026).
4. Zakon Respubliki Kazakhstan «O profilaktike iododefitsitnykh zabolevanii» ot 14 oktyabrya 2003 g. № 489-II. – Astana, 2003 [Ehlektronnyi resurs]. https://faolex.fao.org/docs/pdf/kaz52541.pdf (data obrashcheniya: 11.04.2026). (in Russian).
5. Bolger O.I. Obogashchenie kislomolochnykh produktov iodom v tselyakh profilaktiki i lecheniya iododefitsita / O.I. Bolger, G.E. Sarieva, F.B. Sariev // Mekhanika i tekhnologii. – 2024. – № 2(84). – S. 38-43 [Ehlektronnyi resurs]. https://journals.dulaty.kz/en/zh-n-mer/44-mekh-ni-zhane-tekhn-l-giyal-r/mekh-ni-zhane-tekhn-l-giyal-r-2024-2/440-obogashchenie-kislomolochnykh-produktov-jodom-v-tselyakh-profilaktiki-i-lecheniya-jododefitsita (data obrashcheniya: 11.04.2026). (in Russian).
6. Dalevska D. Changes in organoleptic, microbiological and biochemical properties of kefir with iodine addition during storage / D. Dalevska, O. Pokotylo, M.D. Kukhtyn // Potravinarstvo Slovak J. Food Sci. – 2021. – Vol. 15. – P. 732-740 [Ehlektronnyi resurs]. https://www.researchgate.net/publication/354179671_Changes_in_organoleptic_microbiological_and_biochemical_properties_of_kefir_with_iodine_addition_during_the_storage (data obrashcheniya: 11.04.2026).
7. Obogashchenie kislomolochnykh produktov iodorganicheskim probiotikom «Iodobfifivit» / E.Yu. Sergeeva i dr. // Biologiya v sel'skom khozyaistve. – 2025. – № 1(46) [Ehlektronnyi resurs]. https://cyberleninka.ru/article/n/obogaschenie-kislomolochnyh-produktov-yodorganicheskim-probiotikom-yodobifivit (data obrashcheniya: 11.04.2026). (in Russian).
8. Zhang T., Geng Sh., Cheng T. From the past to the future: Fermented milks and their health effects against human diseases. – 2023 [Ehlektronnyi resurs]. – URL: https://iadns.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/fft2.304 (data obrashcheniya: 11.04.2026).
9. Ahmad I., Hao M., Li Y., Zhang J., Ding Y., Lyu F. Fortification of yogurt with bioactive functional foods and ingredients and associated challenges: A review / I. Ahmad et al // Trends in Food Science & Technology. – 2022. – P. 558-580 [Ehlektronnyi resurs]. https://www.researchgate.net/publication/365248839_Fortification_of_yogurt_with_bioactive_functional_foods_and_ingredients_and_associated_challenges_-_A_review (data obrashcheniya: 11.04.2026).
10. Wachowska M. Importance of iodine fortification in food production: human health and technology / M. Wachowska, M. Adamczak // Journal of Elementology. – 2023. – Vol. 28, № 1. – P. 199-222. [Ehlektronnyi resurs]. https://www.researchgate.net/publication/368881052_Importance_of_iodine_fortification_in_food_production_human_health_and_technology (data obrashcheniya: 11.04.2026).

11. Dairy as a source of iodine and protein in the UK / O.C. Witard et al // Nutrients. – 2022 [Ehlektronnyi resurs]. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8866650/ (data obrashcheniya: 11.04.2026).
12. Development and properties of functional yoghurt enriched with postbiotics derived from yoghurt starter cultures / S. Sadighbathi et al // Frontiers in Microbiology. – 2023 [Ehlektronnyi resurs]. – https://www.frontiersin.org/journals/microbiology/articles/10.3389/fmicb.2023.1276268/full (data obrashcheniya: 11.04.2026).
13. Iodine Fortification of a Fermented Dairy Product: Development and Quality Assessment / A. Tayeva et al // Foods. – 2026. – Vol. 15, № 12. – Art. 2096. https://doi.org/10.3390/foods15122096.
14. Keyvan E., Adesemoye E., Champomier-Vergès M.-C. Vitamins formed by microorganisms in fermented foods: effects on human vitamin status — a systematic narrative review // Front. Nutr. – 2025 [Ehlektronnyi resurs]. – URL: https://www.frontiersin.org/journals/nutrition/articles/10.3389/fnut.2025.1653666/full (data obrashcheniya: 11.04.2026).
15. Nicol K., Thomas E.L., Nugent A.P. Iodine fortification of plant-based dairy and fish alternatives: the effect of substitution on iodine intake based on a market survey in the UK // British Journal of Nutrition. – 2023 [Ehlektronnyi resurs]. – URL: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9975780/ (data obrashcheniya: 11.04.2026).
16. Niero G., Pozza M., Marchi M.D. Iodine concentration in milk, ricotta cheese and yogurt and their contribution to dietary iodine intake // Dairy. – 2025. – Vol. 6, № 1. – P. 55-66 [Ehlektronnyi resurs]. https://www.researchgate.net/publication/399262540_Iodine_Concentration_in_Milk_Ricotta_Cheese_and_Yogurt_and_Their_Contribution_to_Dietary_Iodine_Intake (data obrashcheniya: 11.04.2026).
17. van der Reijden O.L., Galetti V., Zeder C., Krzystek A. Iodine bioavailability from cow milk: a randomized, crossover balance study in adults // The American Journal of Clinical Nutrition. – 2019. – Vol. 110, № 3. – P. 652-661 [Ehlektronnyi resurs]. – URL: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31788697/ (data obrashcheniya: 11.04.2026).
18. Food and Agriculture Organization of the United Nations; World Health Organization. Human Vitamin and Mineral Requirements: Report of a Joint FAO/WHO Expert Consultation. – Rome: FAO, 2002. – Chapter 12: Iodine. – URL: https://www.fao.org/4/y2809e/y2809e0i.htm (data obrashcheniya: 11.04.2026).

А.М. Таева, Ф.Т. Диханбаева, Ж.К. Имангалиева, М.К. Изтилеуов, Р. Бақытжанұлы*
Алматы технологиялық университеті,
050061, Қазақстан Республикасы, Алматы қаласы, Фурката көшесі, 348/4
*e-mail: rustem_zhanys@mail.ru

ЙОДПЕН БАЙЫТЫЛҒАН АШЫТЫЛҒАН СҮТ СУСЫНЫҢ САПАЛЫҚ СИПАТТАМАЛАРЫН БАҒАЛАУ

Бұл мақала Қазақстанда йод тапшылығынан болатын бұзылыстарды алдын алуға арналған перспективалы функционалдық өнім ретінде йодказеин түрінде йодпен байытылған ашытылған сүт сусынының (йогурттың) жан-жақты бағалауын ұсынады. Зерттеудің өзектілігі – тұзды міндетті йодтауға қарамастан, халықтың тағамында йод тапшылығының тұрақты мәселесі және елде дәстүрлі тұтынылатын осы микроэлементтің жаңа тағам көздерін анықтау қажеттілігі. Зерттеудің мақсаты – йодпен байытылған өнімнің қоректік құндылығы мен микробиологиялық көрсеткіштерін зерттеу. Зертханалық жағдайда пастеризацияланған сиыр сүтіне порциясына 25 мкг мөлшерінде йод қосылып, Streptococcus thermophilus және Lactobacillus delbrueckii subsp. bulgaricus штаммдарымен егіліп, ферментация мен пісіру процесінен өткізілді. Өнімнің 100 г-ына 25 мкг йодокэзин қосу – ең тиімді доза екені анықталды. Талдау бекітілген ұлттық стандартта әдістеріне (физико-химиялық және микробиологиялық параметрлер, йод мөлшері) сәйкес жүргізілді. Алынған мәліметтер өнімнің барлық қауіпсіздік талаптарына толық сәйкес келетінін көрсетеді. Йод қосу өнімнің технологиялық сипаттамаларына әсер етпеді. Әзірленген йодталған йогурт – тұтынушыларға таныс қасиеттерін жоғалтпай, йод тапшылығын алдын алуда тиімді қолдануға болатын қауіпсіз, тұрақты және функционалдық тұрғыдан жетілдірілген өнім. Алынған нәтижелер технологияны Қазақстанның тамақ өнеркәсібінде өнеркәсіптік қолдану әлеуетін растайды.

Түйін сөздер: *йод тапшылығы, йодпен байыту, ашытылған сүт сусыны, йогурт, микробиологиялық параметрлер, қоректік құндылық.*

A.M. Taeva, F.T. Dikhanbayeva, Zh.K. Imangaliyeva, M.K. Iztileuov, R. Bakytzhanuly*
Almaty Technological University,
050061, Republic of Kazakhstan, Almaty, 348/4 Furkata St.
*e-mail: rustem_zhanys@mail.ru

EVALUATION OF QUALITATIVE INDICATORS OF AN IODINE-ENRICHED FERMENTED MILK DRINK

This study presents a comprehensive evaluation of a fermented milk drink (yogurt) fortified with iodine in the form of iodocasein as a promising functional product for the prevention of iodine deficiency disorders in the Republic of Kazakhstan. The relevance of the study stems from the persistent problem of iodine deficiency in the population's diet, despite mandatory iodization of table salt, as well as the need to identify new food sources of this trace element that are traditionally consumed in the country. The objective was to study the nutritional value and microbiological parameters of the fortified product. Under laboratory conditions, iodine was added to pasteurized cow's milk at a rate of 25 μg per serving, inoculated with strains of Streptococcus thermophilus and Lactobacillus delbrueckii subsp. bulgaricus, and subjected to fermentation and ripening. It has been established that the optimal dosage is 25 μg of iodocasein per 100 g of product. Analysis was performed according to approved state standard methods (physicochemical and microbiological parameters, iodine content). The data obtained indicate that the product fully complies with all safety requirements. Fortification did not affect the product's technological characteristics. The developed iodized yogurt is a safe, stable, and functionally improved product capable of being effectively used in the prevention of iodine deficiency without losing its customary consumer qualities. The results obtained confirm the prospects for the industrial application of this technology in the food industry of Kazakhstan.

Key words: *iodine deficiency, iodine fortification, fermented milk drink, yogurt, microbiological parameters, nutritional value.*

Сведения об авторах

Айгуль Маратовна Таева – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология продуктов питания», Алматинский технологический университет, Республика Казахстан, г. Алматы; e-mail: aigul_taeva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6663-4282.

Фатима Токтаровна Диханбаева – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология продуктов питания», Алматинский технологический университет, Республика Казахстан, г. Алматы; e-mail: fatima6363@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4257-3774.

Жадыра Кенжегазыевна Имангалиева – PhD, и.о. ассоцированного профессора кафедры «Технология продуктов питания», Алматинский технологический университет, Республика Казахстан, г. Алматы; e-mail: i.zhadra@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3419-7852.

Максат Карсыбекович Изтилеуов – PhD кафедры «Безопасность и качество пищевых продуктов»; Алматинский технологический университет, Республика Казахстан, г. Алматы; e-mail: m.iztileuov@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4843-4030.

Рустем Бақытжанұлы* – Магистрант кафедры «Технология продуктов питания»; Алматинский технологический университет, Республика Казахстан, г. Алматы; e-mail: rustem_zhanys@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-9679-0258.

Авторлар туралы мәліметтер

Айгуль Маратовна Таева – техникалық ғылымдар докторы, профессор, «Тамақ өнімдері технологиясы» кафедрасы, Алматы технологиялық университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы; e-mail: aigul_taeva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6663-4282.

Фатима Токтаровна Диханбаева – техникалық ғылымдар докторы, профессор, «Тамақ өнімдері технологиясы» кафедрасы, Алматы технологиялық университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы; e-mail: fatima6363@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4257-3774.

Жадыра Кенжегазыевна Имангалиева – PhD, қауымдастырылған профессор м.а., «Тамақ өнімдері технологиясы» кафедрасы, Алматы технологиялық университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы; e-mail: i.zhadra@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3419-7852.

Максат Карсыбекович Изтилеуов – PhD, «Тамақ өнімдерінің қауіпсіздігі және сапасы» кафедрасы, Алматы технологиялық университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы; e-mail: m.iztileuov@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4843-4030.

Рустем Бақытжанұлы* – магистрант, «Тамақ өнімдерін технологиясы» кафедрасы; Алматы технологиялық университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы; e-mail: rustem_zhanys@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-9679-0258.

Information about the authors

Aigul Maratovna Taeva – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of «Food Technology», Almaty Technological University, Republic of Kazakhstan, Almaty; e-mail: aigul_taeva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6663-4282.

Fatima Toktarovna Dikhanbayeva – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of «Food Technology», Almaty Technological University, Republic of Kazakhstan, Almaty; e-mail: fatima6363@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4257-3774.

Zhadyra Kenzhegazyevna Imangaliyeva – PhD, Acting Associate Professor, Department of «Food Technology», Almaty Technological University, Republic of Kazakhstan, Almaty; e-mail: i.zhadra@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3419-7852.

Maksat Karsybekovich Iztileuov – PhD, Department of «Food Safety and Quality», Almaty Technological University, Republic of Kazakhstan, Almaty; e-mail: m.iztileuov@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4843-4030.

Rustem Bakytzhanuly* – Master's student, Department of «Food Technology», Almaty Technological University, Republic of Kazakhstan, Almaty; e-mail: rustem_zhanys@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-9679-0258.

Поступила в редакцию 01.06.2026
Поступила после доработки 01.09.2026
Принята к публикации 04.09.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-56

IRSTI: 65.53.29

A.A. Kaisarova*, A.U. Shingisov, E.U. Mailybayeva, M.B. Kenzhekhanova
M. Auezov South Kazakhstan University,
160000, Shymkent, Republic of Kazakhstan,Tauke Khan avenue, 5
*e-mail: kaisarova-92@mail.ru

STUDY OF THE CHEMICAL COMPOSITION AND FUNCTIONAL-TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF *SALICORNIA EUROPAEA* PLANT POWDER

Annotation: *The aim of this study was to investigate the physicochemical, mineral, and functional-technological properties of powder obtained from the plant Salicornia europaea collected near the village of Kumkent, Suzak district, Turkestan region, and to scientifically substantiate the possibility of its use as a natural salt substitute in food products. The results showed that the moisture content of the plant raw material was 2.61%, while the total ash content was 15.17%. Mineral composition analysis revealed the predominance of sodium (Na) (32.89%) and chlorine (Cl) (33.51%), together with Mg, Si, K and Ca elements. The powder contained 2.41% total phenolic compounds and 1.37% flavonoids. Sieve analysis showed that the main fraction ranged from 0.25 to 0.5 mm, while SEM analysis revealed a porous microstructure of the particles. The swelling coefficient was 3.2, indicating high water-binding capacity. Safety assessment confirmed that the levels of toxic elements, pesticide residues and microbiological indicators complied with regulatory requirements. Unlike our previous study, which focused on the application of Salicornia europaea as a partial salt substitute in meat chips, the present work provides a comprehensive characterization of the powder itself. In addition to confirming its mineral composition, this study presents new data on moisture and ash content, biologically active compounds, particle-size distribution, microstructure, swelling capacity and safety indicators. These findings expand the current knowledge of the functional-technological properties of Salicornia europaea powder and substantiate its potential use as a natural salt substitute and functional food ingredient. The obtained results demonstrate that Salicornia europaea powder is a promising natural salt substitute and functional ingredient for use in the food industry.*

Key words: *Salicornia europaea, plant powder, salt substitute, mineral composition, phenolic compounds, flavonoids, microstructure, functional properties.*

Introduction

Nowadays, the problem of proper nutrition of the population and improving the quality of food products is one of the most important scientific directions in the food industry. In recent years, special

©A.A. Kaisarova, A.U. Shingisov, E.U. Mailybayeva, M.B. Kenzhekhanova, 2026

attention has been paid to the problem of reducing the amount of table salt in food products. Scientific studies have proven that excessive consumption of sodium chloride increases the risk of developing cardiovascular diseases, arterial hypertension and kidney diseases [1, 2]. In this regard, reducing the amount of table salt in the production of food products and using natural salt substitutes instead is one of the current scientific problems [3].

In our previous study [10], *Salicornia europaea* was investigated as a natural partial substitute for table salt in meat chips, and the optimal ratio of table salt to *Salicornia* powder was determined based on the organoleptic characteristics of the finished product. However, that study focused primarily on the formulation of meat chips rather than on the comprehensive characterization of *Salicornia* powder itself. Therefore, the present study extends our previous research through a comprehensive investigation of the physicochemical composition, biologically active compounds, particle-size distribution, microstructure, functional-technological properties, and safety indicators of *Salicornia europaea* powder, thereby providing a scientific basis for its application as a natural salt substitute and functional food ingredient.

One of the promising plant raw materials for use as a salt substitute is Salicornia europaea. This plant belongs to the group of halophytic plants that grow in saline soils and is characterized by a high content of mineral elements, especially sodium and potassium [4]. Scientific studies show that Salicornia contains phenolic compounds, flavonoids, mineral elements and other biologically active substances [5]. Such a composition provides the antioxidant properties of the plant and allows it to be used as a functional food ingredient [6].

The potential of Salicornia in food production has been widely discussed in the literature. Some studies have shown that the powder of this plant can replace part of the table salt in food products, reducing the sodium content while maintaining the organoleptic properties of the product [7]. In addition, the minerals and biologically active compounds contained in Salicornia contribute to increasing the nutritional and biological value of food products [8].

In recent years, special attention has been paid to the development of low-salt products in food technology. In this direction, the use of functional ingredients of plant origin allows to increase the nutritional value of the product while maintaining its structural-mechanical and organoleptic properties [9]. The use of natural salt substitutes is especially important in the production of meat products [10].

In Kazakhstan, the Salicornia plant grows mainly on saline soils, in desert and semi-desert areas. Our previous study [10] demonstrated that Salicornia europaea growing near the village of Kumkent, Sozak district, Turkestan region, is characterized by a high content of sodium and chlorine. These findings indicate its potential for use as a natural salt substitute in food production.

In this regard, the purpose of the research work is to study the chemical composition and functional and technological properties of powder obtained from the Salicornia plant, as well as to scientifically substantiate the possibility of its use as a natural salt substitute component in the production technology of low-salt meat chips.

Research methods

The object of the study was the powder obtained from the aboveground part of the halophyte plant Salicornia europaea, which grows in saline soils. The plant samples were collected from the saline soil zone of the Moyinkum sandy valley near the village of Kumkent, Sozak district, Turkestan region, Republic of Kazakhstan. Our previous study [10] demonstrated a high sodium and chlorine content in Salicornia europaea collected from this region. The collected plant samples were cleaned of mechanical impurities in laboratory conditions and dried at a temperature of 40-50°C. The dried plant material was crushed using a porcelain mortar and ground to a homogeneous powder.

The determination of the physicochemical parameters of the plant powder was carried out using standard laboratory methods. The moisture content of the raw material was determined by the drying method, and the ash content was determined by the method of calcination in a muffle furnace. The elemental (mineral) composition of the Salicornia europaea plant powder was determined in the scientific research laboratory «Building Materials and Structures» of the M. Auezov South Kazakhstan University. The analysis was carried out using the method of energy-dispersive X-ray spectroscopy (SEM-EDS) combined with a scanning electron microscope. This method allows to determine the qualitative and quantitative composition of the elements in the studied sample. According to the results of the study, the main elements in the sample were oxygen (O), sodium

(Na), chlorine (Cl), carbon (C), sulfur (S) and potassium (K), their amounts were calculated in mass percent.

Spectrophotometric methods were used to determine the amount of biologically active compounds in Salicornia powder. The amount of total phenolic compounds was determined using the Folin–Chocalteu reagent, and the amount of flavonoids was determined by a spectrophotometric method based on the complexation reaction with aluminum chloride. Measurements were carried out using a spectrophotometer, and the percentage of compounds was calculated based on the results obtained.

The determination of the fractional composition of the powder was carried out by the method of sieve analysis. During the study, a set of laboratory sieves with cell sizes of 1.25; 0.63 and 0.315 mm was used. A 100 g sample of the powder was sieved for 10 minutes using a mechanical vibrating sieve. The mass of each fraction was measured on an analytical balance (measurement accuracy ±0.01 g), and their percentage was calculated.

The microstructure of the powder particles was studied using a scanning electron microscope (SEM). The shape, surface structure and porosity of the particles were analyzed based on microphotographs taken at different magnifications (×50, ×100, ×250, ×500 and ×1000). The obtained microphotographs were processed using the ImageJ program for morphometric analysis, and the equivalent diameters of the particles were determined. Based on these data, the characteristic particle sizes d10, d50 and d90 were calculated.

In order to evaluate the functional and technological properties of Salicornia powder, its water-binding capacity was studied. For this, the swelling coefficient of the powder was determined. During the experiment, a certain amount of powder was mixed with distilled water, and then its water-absorption and retention capacity were evaluated using the centrifugation method.

The safety indicators of plant powder were determined in the Research Laboratory for Assessment of Quality and Safety of Food Products of Almaty Technological University. The studies were conducted in accordance with the requirements of the Technical Regulation TR TS 021/2011 "On Food Safety". The content of toxic elements was determined according to the standards GOST 30178-96 and GOST 32689.1-2014. The residual amounts of pesticides were studied according to the methodology of GOST 32689.1-2014. Microbiological indicators were determined according to the standards GOST 10444.12-2013, GOST 10444.15-94, GOST 31747-2012 and GOST 31659-2012.

The obtained experimental results were analyzed using statistical processing methods, allowing us to evaluate the physicochemical, mineral, and functional-technological properties of Salicornia plant powder.

Research results

The study investigated the physicochemical, mineral, and functional-technological properties of powder obtained from the plant Salicornia europaea. The results showed that the plant powder is a promising raw material for use in the food industry, especially in the development of low-salt products.

First, one of the main indicators characterizing the quality of the studied plant raw materials was determined – humidity. According to the results of the study, the humidity of the plant raw materials was 2.61%. This indicator meets the requirements for the storage of plant raw materials and ensures their stability during storage. Low humidity allows you to prevent microbiological deterioration of plant raw materials and maintain their quality for a long time.

One of the important indicators characterizing the mineral composition of plant raw materials is the ash content. According to the results of the study, the total ash content of the Salicornia plant was 15.17%. This indicator indicates that the plant accumulates a high amount of mineral elements. This feature is characteristic of halophytic plants growing in saline soils.

The mineral composition was determined using the scanning electron microscope-combined energy dispersive X-ray spectroscopy (SEM-EDS) method. According to the results of the study, the plant was dominated by sodium and chlorine elements (Fig. 1-2, Table 1). The sodium content was 32.89%, and the chlorine content was 33.51%. In addition, elements such as magnesium (1.80%), silicon (1.32%), potassium (1.94%) and calcium (0.74%) were found in the plant. The high content of sodium and chlorine indicates that this plant is a salt-accumulating halophyte and proves its potential use as a natural salt substitute in food products.

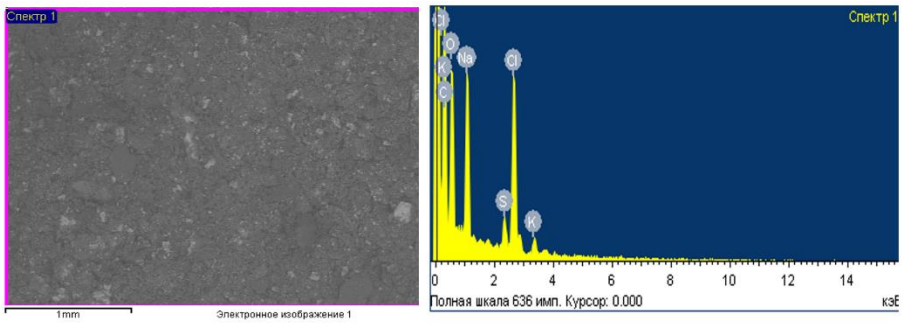


Figure 1 – Microstructure of Salicornia europaea powder

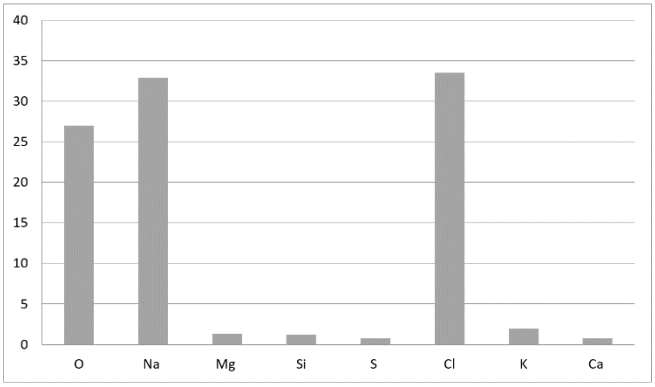


Figure 2 – Mineral composition of Salicornia europaea powder

Table 1 – Composition of mineral elements in the aboveground part of Salicornia europaea

Element	Mass fraction, %
O	27,02
Na	32,89
Mg	1,80
Si	1,32
S	0,78
Cl	33,51
K	1,94
Ca	0,74
Total	100,00

The content of extractive substances is also one of the important indicators in assessing the quality of plant raw materials. According to the results of the study, the highest content of extractive substances was determined when using 50% ethyl alcohol (29.42%). At the same time, when extracting with water, this indicator was 25.52%, and when using 70% ethyl alcohol, it was 20.36%. These results indicate that the plant contains a sufficient amount of biologically active substances.

The content of biologically active compounds in Salicornia europaea powder is given in Table 2. According to the results of the study, the plant contains phenolic compounds and flavonoids. These compounds characterize the antioxidant and biologically active properties of the plant. According to the results of quantitative analysis, the content of phenolic acids is 2.41%, and flavonoids is 1.37%. The presence of phenolic compounds indicates the antioxidant properties of the plant powder and increases its potential for use in the production of functional food products.

Table 2 – Biologically active compounds and extractive content of Salicornia europaea powder

Indicator	Solvent (extractant)	Size, %
Total phenols	–	2,41
Flavonoids	–	1,37
Extractives	Ethyl alcohol (70 %)	20,36
Extractives	Ethyl alcohol (50 %)	29,42
Extractives	Water	25,52

The dispersion composition of plant powder directly affects the uniform distribution of ingredients in food systems. According to the results of sieve analysis, it was determined that the main part of the particles of Salicornia europaea powder consists of medium and fine fractions. The majority of the powder belongs to the 0.25-0.5 mm fraction (42.7%). At the same time, the share of the 0.5-1 mm fraction was 24.5%, and the share of particles smaller than 0.25 mm was 26.5%. The large fraction (>1 mm) was relatively small, its share was 6.3%. The results obtained indicate that the powder has a finely dispersed structure, which allows for uniform distribution in food systems.

The microstructure of the powder of Salicornia europaea was studied using an electron microscope at different magnification levels (Figure 3-4). The results of the study showed that the powder particles are irregular in shape and have different sizes. At low magnification levels (×50 and ×100), the general structure of the powder particles and their arrangement with each other are observed. At this level, large aggregates of particles and their uniform distribution are visible.

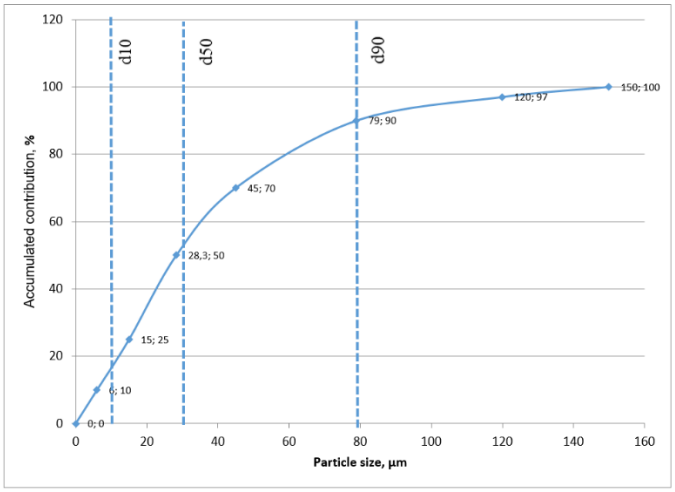


Figure 3 – Particle size distribution of Salicornia europaea powder

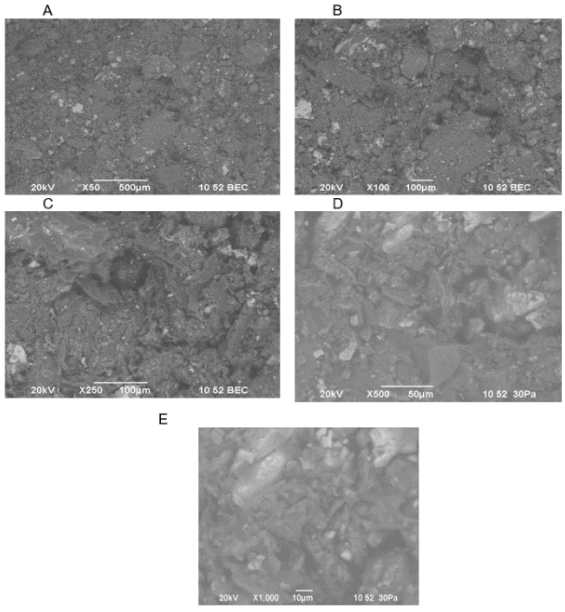


Figure 4 – Microstructure of Salicornia europaea powder at different magnification levels:
A – ×50; B – ×100; C – ×250; D – ×500; E – ×1000

In order to more deeply assess the dispersion composition, the characteristic particle sizes were determined. According to the results of granulometric analysis, the characteristic particle sizes were determined: d10 = 6 μm, d50 = 28.3 μm and d90 = 79 μm. These indicators indicate that the powder has a finely dispersed and polydisperse structure. The predominance of fine particles in the

powder contributes to an increase in its specific surface area, increased water binding capacity and uniform distribution in food systems.

As the magnification level increases (×250 and ×500), the surface structure of the powder particles becomes more clearly visible. The surface of the particles is characterized by a porous structure, which contributes to their high water absorption and retention capacity. In addition, microcracks and small cavities are observed on the surface of the particles.

At the highest magnification (×1000), the microporous structure of the powder particles is clearly visible. Such a structure indicates the high adsorption properties of the plant powder and may increase its water-binding capacity in food products. The results obtained indicate that the structural features of Salicornia europaea powder are closely related to its functional and technological properties.

Swelling capacity is one of the important indicators in food technology, because this property characterizes the ability of the ingredient to bind water. The results of the study showed that Salicornia powder can absorb water well and retain it in a certain amount. This property plays an important role in forming the structure of the product and improving its consistency. In addition, high water binding capacity contributes to improving the technological properties of the product and increasing the quality of the finished product. According to the results of the study, it was determined that the swelling coefficient of the powder is 3.2. This indicator indicates that the powder has a good water binding ability.

As a result of the research conducted in this way, the physicochemical, mineral and functional properties of Salicornia plant powder were determined, and its possibility of use as a natural salt substitute and functional ingredient in the food industry was scientifically substantiated.

The safety indicators of Salicornia europaea powder were studied. According to the results of determining the amount of toxic elements, the content of lead (Pb) was 0.0021 mg/kg, cadmium (Cd) was 0.0006 mg/kg, and arsenic and mercury were not detected. These indicators do not exceed the permissible levels established in regulatory documents (Table 3).

Table 3 – Amount of toxic elements in Salicornia europaea powder

Көрсеткіш	Norm	Result	RD for test methods
Pb, mg/kg, no more	≤0,5	0,0021 ± 0,0001	GOST 32689.1-2014
Cd, mg/kg, no more	≤0,03	0,0006 ± 0,0002	
As, mg/kg, no more	≤0,5	Not specified	
Hg, mg/kg, no more	≤0,1	Not specified	

In addition, no pesticide residues were detected in the plant powder. HCH isomers and DDT and its metabolites were not detected during the study. These results indicate that the studied plant raw materials are environmentally safe (Table 4).

Table 4 – Pesticide residues in Salicornia europaea powder

Indicator	Norm	Result	RD For test methods
ГХЦГ (α, β, γ-изомерлері)	≤0,1	Not specified	GOST 32689.1-2014
ДДТ and its metabolites	≤0,1	Not specified	

The results of microbiological analysis also showed the safety of the studied powder. The content of mesophilic aerobic and facultative anaerobic microorganisms did not exceed the permissible level. In addition, pathogenic microorganisms such as Escherichia coli, Salmonella and Staphylococcus aureus were not detected (Table 5).

Table 5 – Microbiological parameters of Salicornia europaea powder

Indicator	Norm	Result	Regulatory documents
Mold fungi, КОЕ/г	≤10^3	1,2×10^2	GOST 10444.12-2013
Yeasts, КОЕ/г	≤100	31	GOST 10444.12-2013
КМАFАnМ, КОЕ/г	≤5×10^5	3,8×10^4	GOST 10444.15-94
Escherichia coli bacteria (coliforms)	No way	Not specified	GOST 31747-2012
Pathogenic microorganisms (including Salmonella), per 25 g of product	No way	Not specified	GOST 31659-2012
Staphylococcus aureus, 1,0 г in the product	No way	Not specified	GOST 31746-2012

The results of the study are of practical importance for the development of low-salt functional products in the food industry. The study revealed that Salicornia europaea plant powder is rich in mineral elements and contains phenolic compounds and flavonoids. In addition, the porous microstructure of the powder particles and the high swelling coefficient indicate its high water-binding capacity. These properties allow the use of plant powder as a technological ingredient in food products. The results obtained indicate that Salicornia europaea powder can be used as a natural salt substitute in the production technology of low-salt meat products, including meat chips. The use of such plant-based raw materials allows to increase the nutritional and biological value of the finished product, as well as to reduce the sodium content.

Conclusion

As a result of the conducted research, the physicochemical, mineral and functional-technological properties of the powder obtained from the Salicornia europaea plant growing in the Sozak district of the Turkestan region were determined. According to the research results, the moisture content of the plant raw materials was 2.61%, and the total ash content was 15.17%. As a result of the analysis of the mineral composition, it was determined that the elements sodium (32.89%) and chlorine (33.51%) predominate, as well as the presence of magnesium, silicon, potassium and calcium. In addition, the plant powder contained phenolic compounds and flavonoids, the amount of which was 2.41% and 1.37%, respectively. The results of the sieve analysis showed that the main part of the powder particles belonged to the 0.25-0.5 mm fraction. Microstructural study revealed that the powder particles have a porous structure and show a high water binding capacity. The swelling coefficient was 3.2. In terms of safety indicators, toxic elements, pesticide residues and microbiological indicators met the regulatory requirements. The results of the conducted research have shown that Salicornia europaea plant powder is a promising raw material for use as a natural salt substitute and functional ingredient in the food industry. These results indicate the possibility of introducing Salicornia europaea powder into the technology of production of low-salt functional food products. The issue of using halophyte plants in food production in Kazakhstan has not been sufficiently studied, therefore, the study of the chemical composition and functional properties of Salicornia europaea plant is of scientific and practical importance.

References

1. World Health Organization. Guideline: Sodium Intake for Adults and Children. – Geneva: WHO, 2012.
2. Kozhakhmetova G. Proper nutrition for a healthy lifestyle of the population of the Republic of Kazakhstan / G. Kozhakhmetova, O. Lashkareva // Problemy Agrorynka. – 2020. – № 3. – P. 102-108.
3. Decker E.A. Healthier meat products as functional foods / E. . Decker, Y. Park // Meat Science. – 2015. – Vol. 86. – P. 49-55.
4. Flowers T.J. Salinity tolerance in halophytes / T.J. Flowers, T.D. Colmer // New Phytologist. – 2015. – Vol. 206. – P. 90-103.
5. Patel S. Salicornia: evaluating the halophytic extremophile as a food and pharmaceutical candidate / S. Patel // 3 Biotech. – 2016. – Vol. 6. – Art. 104.
6. Ksouri R. Halophytes as a source of bioactive compounds / R. Ksouri, W. Megdiche, A. Debez // Food Chemistry. – 2012. – Vol. 135. – P. 1419-1425.
7. Kim H.J. Utilization of Salicornia herbacea as a salt substitute in processed foods / H.J. Kim, J.H. Lee, J.K. Kim // Food Science and Biotechnology. – 2014. – Vol. 23. – P. 123-130.
8. Barreira L. Halophytes: gourmet food with nutritional health benefits / L. Barreira, M.J. Rodrigues, H. Pereira // Journal of Food Composition and Analysis. – 2017. – Vol. 59. – P. 35-42.
9. Shishkina D.I. Analysis of technologies for functional meat products / D.I. Shishkina, A. Yu. Sokolov // Vestnik VGUIT. – 2018. – Vol. 80, № 2. – P. 189-194.
10. Ispol'zovanie rasteniya Salicornia v kachestve zamenitelya povarennoi soli v retsepture izgotovleniya myasnykh chipsov / A.A. Kaisarova i dr. // Vestnik Almatinskogo tekhnologicheskogo universiteta. – 2024. – № 3. – P. 39-48. (in Russian).

А.А. Қайсарова*, А.У. Шингисов, Э.У. Майлыбаева, М.Б. Кенжеханова
М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті
160000, Қазақстан Республикасы, Шымкент қ., Тәуке хан даңғылы, 5
*e-mail: kaisarova-92@mail.ru

SALICORNIA EUROPAEA ӨСІМДІГІ ҰНТАҒЫНЫҢ ХИМИЯЛЫҚ ҚҰРАМЫ ЖӘНЕ ФУНКЦИОНАЛДЫ-ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ

Бұл зерттеудің мақсаты – Түркістан облысы, Созақ ауданы, Құмкент ауылы маңынан жиналған Salicornia europaea өсімдігінен алынған ұнтақтың физика-химиялық, минералдық және функционалды-технологиялық қасиеттерін зерттеу және оны тағам өнімдерінде табиғи тұз алмастырғыш ретінде қолдану мүмкіндігін ғылыми тұрғыдан негіздеу. Зерттеу барысында өсімдік шикізатының ылғалдылығы 2,61%, жалпы күл мөлшері 15,17% екендігі анықталды. Минералдық құрамды талдау нәтижесінде натрий (Na) – 32,89% және хлор (Cl) – 33,51% элементтерінің басым екендігі, сондай-ақ Mg, Si, K және Ca элементтерінің бар екендігі көрсетілді. Ұнтақтың биологиялық белсенді қосылыстары анықталып, жалпы фенолдар мөлшері 2,41%, флавоноидтар мөлшері 1,37% болды. Ситалық талдау нәтижелері ұнтақтың негізгі бөлігі 0,25-0,5 мм фракциясына тиесілі екенін көрсетті, ал микроструктуралық зерттеу бөлшектер бетінің кеуекті құрылымымен сипатталатынын анықтады. Ұнтақтың ісіну коэффициенті 3,2 болып, су байланыстыру қабілетінің жоғары екендігін көрсетті. Қауіпсіздік көрсеткіштері бойынша токсикалық элементтер, пестицид қалдықтары және микробиологиялық көрсеткіштер нормативтік талаптарға сәйкес келді. Зерттеудің ғылыми жаңалығы – Түркістан облысы Созақ ауданы аумағында өсетін Salicornia europaea өсімдігінен алынған ұнтақтың химиялық құрамы мен функционалды-технологиялық қасиеттерінің кешенді түрде зерттелуі және оның тағам өнеркәсібінде табиғи тұз алмастырғыш ретінде қолдану мүмкіндігінің ғылыми тұрғыдан негізделуі болып табылады. Алынған нәтижелер Salicornia europaea ұнтағының табиғи тұз алмастырғыш және функционалды ингредиент ретінде тағам өнеркәсібінде қолдануға перспективалы екенін дәлелдейді.

Түйін сөздер: *Salicornia europaea, өсімдік ұнтағы, тұз алмастырғыш, минералдық құрам, фенолдық қосылыстар, флавоноидтар, микроструктура, функционалды қасиеттер.*

А.А. Қайсарова*, А.У. Шингисов, Э.У. Майлыбаева, М.Б. Кенжеханова
Южно-Казахстанский университет им.М.Ауэзова,
160000, Республика Казахстан г. Шымкент,пр.Тауке-хана,5
*e-mail: kaisarova-92@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И ФУНКЦИОНАЛЬНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОРОШКА РАСТЕНИЯ *SALICORNIA EUROPAEA*

Целью данного исследования является изучение физико-химических, минеральных и функционально-технологических свойств порошка, полученного из растения Salicornia europaea, собранного вблизи села Кумкент Сузакского района Туркестанской области, а также научное обоснование возможности его использования в пищевых продуктах в качестве природного заменителя поваренной соли. В ходе исследования установлено, что влажность растительного сырья составила 2,61%, а общее содержание золы – 15,17%. Результаты анализа минерального состава показали преобладание натрия (Na) – 32,89% и хлора (Cl) – 33,51%, а также наличие таких элементов, как Mg, Si, K и Ca. Определено содержание биологически активных соединений: общий уровень фенольных соединений составил 2,41%, флавоноидов – 1,37%. Результаты ситового анализа показали, что основная часть порошка представлена фракцией размером 0,25-0,5 мм, а микроструктурные исследования выявили пористую структуру поверхности частиц. Коэффициент набухаемости порошка составил 3,2, что свидетельствует о высокой водосвязывающей способности. По показателям безопасности содержание токсичных элементов, остаточных количеств пестицидов и микробиологические показатели соответствуют нормативным требованиям. Научная новизна исследования заключается в том, что проведено комплексное исследование химического состава и функционально-технологических свойств порошка растения Salicornia europaea, произрастающего на территории Сузакского района Туркестанской области, а также научно обоснована возможность его использования в пищевой промышленности в качестве природного заменителя поваренной соли. Полученные результаты подтверждают перспективность использования порошка Salicornia europaea в пищевой промышленности в качестве природного заменителя соли и функционального ингредиента.

Ключевые слова: *Salicornia europaea, растительный порошок, заменитель соли, минеральный состав, фенольные соединения, флавоноиды, микроструктура, функциональные свойства.*

Information about authors

Araylym Kaisarova* – Master's degree holder, M. Auezov South Kazakhstan University, Faculty of Mechanics, Mechanical Engineering and Oil and Gas Engineering, Shymkent, Kazakhstan; e-mail: kaisarova-92@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4112-0220.

Azret Shingisov – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Food Technology and Safety, Higher School of Textile and Food Engineering, M. Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Kazakhstan; e-mail: azret_utebai@mail.ru. ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0726-8232.

Elvira Mailybayeva – Master's degree holder, Higher School of Textile and Food Engineering, M. Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Kazakhstan; e-mail: emu1204@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6322-4496.

Mereke Kenzhekhanova – PhD, M. Auezov South Kazakhstan University, Faculty of Mechanics, Mechanical Engineering and Oil and Gas Engineering, Shymkent, Kazakhstan; e-mail: mikosha.ken.25@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-4295-9416.

Сведения об авторах

Арайлым Алмасовна Кайсарова* – магистр, Южно-Казахстанский университет имени М. Ауэзова, факультет «Механика, машиностроение и нефтегазовое дело», г. Шымкент, Казахстан; e-mail: kaisarova-92@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4112-0220.

Азрет Утебаевич Шингисов – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология и безопасность продовольственных продуктов», Высшая школа Текстильной и пищевой инженерии, Шымкент, Казахстан; e-mail: azret_utebai@mail.ru. ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0726-8232.

Эльвира Урисбаевна Майлыбаева – магистр, Южно-Казахстанский университет имени М. Ауэзова, Высшая школа Текстильной и пищевой инженерии, Шымкент, Казахстан; e-mail: emu1204@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6322-4496.

Мереке Батырхановна Кенжеханова – PhD доктор, Южно-Казахстанский университет имени М. Ауэзова, факультет «Механика, машиностроение и нефтегазовое дело», г. Шымкент, Казахстан; e-mail: mikosha.ken.25@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-4295-9416.

Авторлар туралы мәліметтер

Арайлым Алмасқызы Қайсарова* – магистр, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, «Механика, машинажасау және мұнай газ ісі» факультеті, Шымкент, Қазақстан; e-mail: kaisarova-92@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4112-0220.

Азрет Утебаевич Шингисов – техника ғылымдарының докторы, «Азық-түлік өнімдерінің технологиясы және қауіпсіздігі» кафедрасының профессоры, Шымкент,Қазақстан; e-mail: azret_utebai@mail.ru. ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0726-8232.

Эльвира Урисбаевна Майлыбаева – магистр, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, «Тоқыма және тамақ инженериясы» Жоғары мектебі, Шымкент, Қазақстан; e-mail: emu1204@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6322-4496.

Мереке Батырханқызы Кенжеханова – phD докторы, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, «Механика, машинажасау және мұнай газ ісі» факультеті, Шымкент, Қазақстан; e-mail: mikosha.ken.25@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-4295-9416.

Received 01.06.2026
Revised 06.07.2026
Accepted 03.09.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-57

BY 4.0
Check for updates

МРНТИ: 65.59.03

Э.К. Окусханова*, Г.Б. Абдилова, Ж.М. Атамбаева, А.А. Даутова, Ш.К. Жакупбекова
Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А
*e-mail: eleonora-okushan@mail.ru

ВЛИЯНИЕ СУБЛИМИРОВАННОГО ПОРОШКА ПРОРОЩЕННЫХ ЗЕРЕН ПШЕНИЦЫ НА ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И КАЧЕСТВО ВАРЁНЫХ СОСИСОК ИЗ МЯСА ПТИЦЫ

Аннотация: *В статье представлены результаты разработки варёных сосисок из мяса птицы с заменой пшеничной муки сублимированным порошком пророщенных зерен пшеницы. Целью исследования являлась оценка влияния внесения растительного ингредиента на пищевую ценность, физико-химические, функционально-технологические, структурно-механические и органолептические показатели готового продукта. Контрольный образец изготавливали с использованием пшеничной муки, опытный – с добавлением порошка пророщенной пшеницы, полученного путём замачивания, проращивания, сублимационной сушки и последующего измельчения. Установлено, что опытный образец характеризовался повышением массовой доли белка с 13,9 до 14,4%, золы – с 2,15 до 2,25%, углеводов, включая пищевые волокна, – с 2,6 до 3,0% при незначительном снижении энергетической ценности. Значения pH и активности воды находились в технологически допустимых пределах. Введение растительного компонента способствовало повышению влагоудерживающей способности с 108 до 120%, жироудерживающей способности – со 160 до 175%, а также увеличению выхода после варки с 93,8 до 96,1%. Органолептическая оценка опытного образца составила 23,6 балла. Полученные результаты подтверждают целесообразность использования сублимированного порошка пророщенной пшеницы для повышения пищевой ценности и технологической стабильности варёных колбасных изделий функциональной направленности.*

Ключевые слова: *варёные сосиски; мясо птицы; пророщенная пшеница; сублимационный порошок; функциональный продукт.*

Введение

Производство колбасных изделий занимает значительное место в пищевой промышленности Казахстана и других стран. Эти продукты относятся к массовому сегменту мясной продукции и пользуются устойчивым потребительским спросом. Однако их пищевая ценность часто оценивается неоднозначно, поскольку традиционные варёные колбасные изделия могут содержать повышенное количество жира, соли и углеводных наполнителей при сравнительно ограниченном содержании биологически ценных компонентов [1, 2]. В промышленной практике крахмал и пшеничная мука широко применяются для связывания влаги, стабилизации структуры и повышения выхода продукции. Вместе с тем такие ингредиенты практически не обогащают продукт витаминами, минеральными веществами и пищевыми волокнами, что снижает его диетическую и функциональную направленность [3].

В связи с этим актуальным направлением является поиск альтернативных растительных ингредиентов, способных не только выполнять технологическую функцию структурообразования, но и повышать пищевую ценность мясных изделий. Особый интерес представляют злаковые культуры, содержащие растительный белок, сложные углеводы, пищевые волокна, витамины группы В, витамин Е, магний, железо, цинк и другие биологически значимые вещества [4]. Введение таких компонентов в рецептуры мясных продуктов позволяет формировать комбинированные мясорастительные системы, соответствующие современным требованиям рационального питания [5].

Перспективным способом повышения биологической ценности злакового сырья является проращивание. В процессе проращивания активизируются ферментативные процессы, частично расщепляются запасные вещества зерна, повышается доступность

©Э.К. Окусханова, Г.Б. Абдилова, Ж.М. Атамбаева, А.А. Даутова, Ш.К. Жакупбекова, 2026

отдельных нутриентов, улучшается усвояемость белков и минеральных веществ [6]. Пророщенные зерна могут рассматриваться как функциональный ингредиент, способный влиять не только на химический состав, но и на технологические свойства фаршевых систем.

Для сохранения ценных компонентов пророщенного зерна целесообразно применять сублимационную сушку. Лиофилизация позволяет удалять влагу при пониженной температурной нагрузке, что способствует сохранению витаминов, минеральных веществ, цвета, аромата и функциональных свойств сырья [7]. Полученный сублимированный порошок удобен для внесения в рецептуры мясных изделий, хорошо распределяется в фаршевой массе и может участвовать в связывании влаги и жира.

Несмотря на растущий интерес к комбинированным мясорастительным продуктам, применение сублимированного порошка пророщенных зерен пшеницы в технологии варёных сосисок изучено недостаточно [8]. Поэтому целью настоящей работы являлась разработка рецептуры и оценка качества диетических варёных сосисок из мяса птицы с заменой пшеничной муки на сублимированный порошок пророщенных зерен пшеницы. Исследование направлено на повышение пищевой ценности продукта, улучшение его функционально-технологических свойств, структуры и выхода после термической обработки.

Материалы и методы

2.1. Сырье и материалы

В качестве основного мясного сырья использовали бескостное мясо цыплят-бройлеров и мясо механической обвалки кур (ММО), полученные с птицефабрики ТОО «Восток Бройлер» (г. Семей, Казахстан).

В контрольном варианте в качестве структурообразующего компонента применяли пшеничную муку, в опытном варианте – сублимированный порошок пророщенных зерен пшеницы.

Дополнительно использовали: посолочную смесь, соль пищевую, смесь пряностей, фосфат пищевой, стабилизатор цвета и технологическую воду.

2.2. Методика проращивания и сублимационной сушки зерен пшеницы

В качестве растительного сырья использовали зерна мягкой яровой продовольственной пшеницы сорта «Костанай», выращиваемой в Восточно-Казахстанской области. Зерно было приобретено у ТОО «SBA-Agro Group» (Глубоковский район, Восточно-Казахстанская область, Казахстан) и соответствовало требованиям качества и безопасности, предъявляемым к продовольственной пшенице.

Перед проращиванием зерно сортировали, очищали от посторонних примесей и повреждённых зерен, промывали проточной питьевой водой и дезинфицировали 0,01-0,02% раствором перманганата калия в течение 10-15 мин с последующим тщательным промыванием питьевой водой.Зерна замачивали в воде при 18-20°C в соотношении 1:3 в течение 8-10 ч до влажности 40-45%. Затем их распределяли слоем 1,5-2,0 см на перфорированных лотках и проращивали при 20-22°C и влажности воздуха 85-95% в течение 24-48 ч до появления проростков длиной 1-2 мм.

Сублимационная (лиофильная) сушка пророщенных зерен

Для сохранения биологически активных веществ пророщенные зерна пшеницы подвергали сублимационной сушке.

Предварительное замораживание.

Пророщенные зерна равномерно распределяли на поддонах слоем не более 10-15 мм и замораживали при температуре –18…–25 °C в течение 8-12 часов до полного промерзания.

Сублимационная сушка.

Сушку проводили в лабораторной сублимационной сушилке Scientz-12N (Ningbo Scientz Biotechnology Co., Ltd., Нингбо, Китай) при остаточном давлении 0,05-0,1 мбар. Температура нагревательных полок составляла –20…–10 °C на начальной стадии с последующим постепенным повышением до +20…+25 °C.

Продолжительность сушки составляла 18-24 часа до достижения остаточной влажности не более 5-7%.

После завершения процесса высушенные пророщенные зерна измельчали в лабораторной мельнице до порошкообразного состояния с размером частиц менее 300 мкм.

Полученный сублимированный порошок хранили в герметичной светонепроницаемой таре при температуре +4…+10 °С и относительной влажности воздуха не более 60 %.

2.3. Рецептура и технология приготовления колбасных изделий (табл. 1).

Таблица 1 – Рецептура контрольного и опытного вариантов сосисок

№	Компонент	Контрольный вариант, %	Опытный вариант, %
Основное сырьё			
1	Бескостное мясо цыплят-бройлеров	62,5 %	62,5 %
2	Мясо механической обвалки кур	14,1 %	14,1 %
3	Мука пшеничная	1,6 %	-
4	Сублимированный порошок пророщенных зерен пшеницы	-	1,6 %
	Итого основного сырья	78,2 %	78,2 %
Добавки и специи			
5	Посолочная смесь	1,4 %	1,4 %
6	Соль пищевая	0,3 %	0,3 %
7	Смесь пряностей	0,5 %	0,5 %
8	Фосфат пищевой	0,2 %	0,2 %
9	Стабилизатор цвета	0,1 %	0,1 %
10	Вода технологическая	19,5 %	19,5 %
	Итого фарша	100 %	100 %

Технология приготовления сосисок

Сосиски изготавливали по классической технологии эмульсионных варёных колбасных изделий. Мясное сырьё охлаждали до 0…+4 °С и измельчали на волчке с диаметром отверстий решётки 2-3 мм. Затем сырьё куттеровали с добавлением фосфата, соли, охлаждённой воды, посолочной смеси, пряностей и стабилизатора цвета при температуре фарша не выше 12°С. В контрольном варианте вносили пшеничную муку, в опытном – сублимированный порошок пророщенной пшеницы. Готовый фарш шприцевали в оболочку диаметром 18-22 мм, выдерживали при +4…+6 °С 1-2 ч, подсушивали при 50-55°С и варили при 75-80°С до 72°С в центре изделия. Контрольный образец изготавливали на основе ГОСТ 31639 «Изделия колбасные варёные из мяса и субпродуктов птицы. Общие технические условия». Уровень внесения порошка (1,6%) был выбран исходя из содержания пшеничной муки в контрольной рецептуре и соответствовал её полной замене растительным ингредиентом, что обеспечивало сопоставимость контрольного и опытного вариантов по общей рецептурной массе.

2.4. Методы исследований

Определение содержания белка проводилось в соответствии с ГОСТ 25011-2017 [9].

Массовую долю влаги определяли по ГОСТ 9793-2016 [10].

Содержания жира определяли согласно ГОСТ 23042- 2015 [11].

Определения массовой доли общей золы определяли по [12].

Определение активной кислотности среды

Активную кислотность среды (pH) определяли потенциометрическим методом на приборе pH-метр-340 (Завод измерительных приборов, Гомель, Беларусь), погружением двух электродов в раствор с фиксацией значения pH на шкале прибора. Раствор (водную вытяжку) готовили из измельченного продукта с водой (в соотношении 1:10). pH измеряли после настаивания в течение 30 минут при температуре 200С [13].

Методика определение предельного напряжения сдвига (ПНС) и напряжения среза продукта

Для определения ПНС продукта использовали автоматический универсальный прибор «Структурометр СТ-2» (НПФ «Радиус», Россия), соответствующий ТУ 2011-011-17326295-01, с использованием пакета программ на ЭВМ.

Методика определения влагоудерживающей (ВУС) и жироудерживающей (ЖУС) способности растительного порошка.

ВУС и ЖУС растительного порошка определяли методом центрифугирования: навеску порошка смешивали с водой или растительным маслом в соотношении 1:10, выдерживали 30 мин при комнатной температуре и центрифугировали при 3000 об/мин (центрифуга ОПн-3, АО

«Дастан», Бишкек, Кыргызская Республика) в течение 10 мин. После удаления несвязанной воды или масла осадок взвешивали, а ВУС и ЖУС рассчитывали по отношению прироста массы осадка к массе сухой навески; измерения проводили в трёхкратной повторности [14].

Влагоудерживающую (ВУС) и жироудерживающую (ЖУС) способность контрольного и опытного образцов сосисок определяли по методике Н.В. Тимошенко и соавт. (2015), основанной на оценке количества влаги и жира, удерживаемых мясной фаршевой системой после термической обработки [14].

Органолептическая оценка готовой продукции оценивалась дегустационной комиссией в количестве 9 человек по пятибалльной шкале. При органолептической оценке устанавливали соответствие основных качественных показателей изделия (внешний вид, цвет на разрезе, запах, вкус, консистенцию), и присваивалось количественное значение в балах [15].

2.5. Статистическая обработка результатов

Все эксперименты проводили не менее чем в трёхкратной повторности. Полученные данные обрабатывали методами вариационной статистики с расчётом среднего арифметического значения (M) и стандартного отклонения (±SD).

Результаты исследований

3.1. Исследование химического состава сосисок

Результаты определения химического состава контрольного и опытного вариантов сосисок представлены в таблице 2. Установлено, что замена 1,6% пшеничной муки на сублимированный порошок пророщенных зерен пшеницы оказала умеренное влияние на пищевую ценность продукта.

Таблица 2 – Химический состав сосисок

Показатель	Контроль	Опыт
Влага, %	68,2±0,4	69,0±0,5
Белок, %	13,9±0,2	14,4±0,2
Жир, %	10,3±0,3	10,1±0,3
Зола, %	2,15±0,05	2,25±0,06
Углеводы (в т.ч. волокна), %	2,6±0,2	3,0±0,2
Энергетическая ценность, ккал/100 г	150±5	148±5

Массовая доля влаги в опытном образце составила 69,0±0,5%, что выше по сравнению с контролем (68,2±0,4%). Это может быть связано с наличием в пророщенной пшенице пищевых волокон и гидрофильных компонентов, способных связывать влагу в фаршевой системе.

Содержание белка в опытном варианте увеличилось до 14,4±0,2% против 13,9±0,2% в контроле, что объясняется внесением растительного белка с порошком пророщенной пшеницы. Массовая доля жира оставалась сопоставимой: 10,3±0,3% в контроле и 10,1±0,3% в опыте.

Содержание золы в опытном образце было выше (2,25±0,06%) по сравнению с контролем (2,15±0,05%), что отражает увеличение общей массовой доли минерального остатка. Углеводы, включая пищевые волокна, увеличились с 2,6±0,2 до 3,0±0,2%. Энергетическая ценность опытного варианта составила 148±5 ккал/100 г против 150±5 ккал/100 г в контроле.

Таким образом, внесение сублимированного порошка пророщенной пшеницы не ухудшало химический состав сосисок и способствовало повышению белковой, минеральной и функциональной ценности продукта.

3.2. Исследование кислотности pH и активности воды сосисок

Результаты определения pH показали, что в контрольном образце значение составило 6,20±0,03, тогда как в опытном варианте оно было несколько ниже – 6,14±0,03 (рис. 1). Незначительное снижение pH может быть связано с внесением сублимированного порошка пророщенных зерен пшеницы, содержащего органические кислоты и продукты ферментативных превращений, образующихся при проращивании.

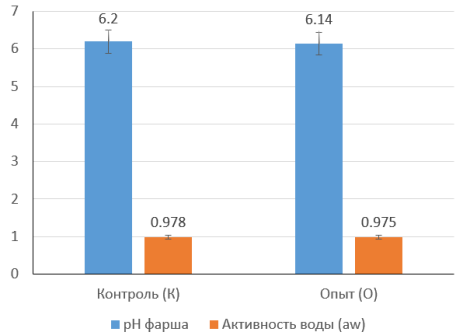


Рисунок 1 – Значения pH и активности воды (aw) сосисок контрольного и опытного вариантов

Различия между образцами были умеренными и находились в пределах технологически допустимого диапазона для варёных колбасных изделий. Это свидетельствует о сохранении стабильности белково-эмульсионной системы фарша.

Активность воды (aw) в контрольном образце составила 0,978±0,002, в опытном – 0,975±0,002. Снижение aw объясняется присутствием пищевых волокон и гидрофильных компонентов растительного происхождения, способных связывать свободную влагу. В целом, использование порошка пророщенной пшеницы не вызывает критических изменений pH и aw, а наблюдаемые изменения имеют благоприятный технологический характер.

3.3. Исследование влагоудерживающей и жироудерживающей способности сосисок

Функционально-технологические свойства фарша определяют стабильность белково-жировой эмульсии, структуру готового изделия и выход после термической обработки. В контрольном варианте влагоудерживающая способность (ВУС) составила 108±3%, тогда как в опытном образце с сублимированным порошком пророщенных зерен пшеницы она увеличилась до 120±4% (рис. 2). Рост ВУС можно объяснить присутствием пищевых волокон и гидрофильных полисахаридов, способных связывать свободную влагу и стабилизировать водную фазу фарша.

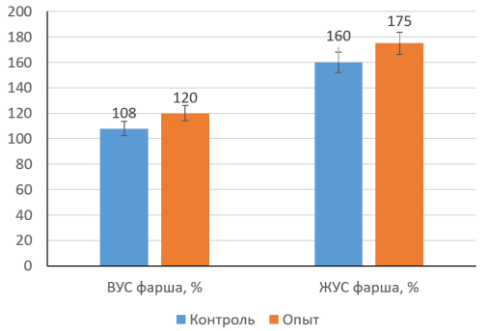


Рисунок 2 – Значения влагоудерживающей и жироудерживающей способности сосисок контрольного и опытного вариантов

Жироудерживающая способность (ЖУС) также повысилась: с 160±6% в контроле до 175±7% в опытном варианте. Это свидетельствует о более устойчивой эмульсионной системе и лучшей фиксации жировой фазы. Данный эффект связан с эмульгирующими свойствами растительных белков и структурообразующей ролью пищевых волокон.

Таким образом, замена 1,6% пшеничной муки на порошок пророщенной пшеницы улучшает ВУС и ЖУС, способствует повышению выхода и стабилизации текстуры сосисок.

3.4. Исследование предельного напряжение сдвига

Структурно-механические свойства сосисок оценивали по показателю предельного напряжения сдвига (τ_0), характеризующему устойчивость белково-жировой матрицы к деформации. В контрольном варианте значение τ_0 составило 240±15 Па, тогда как в опытном образце с сублимированным порошком пророщенных зерен пшеницы показатель увеличился до 285±18 Па (рис. 3).

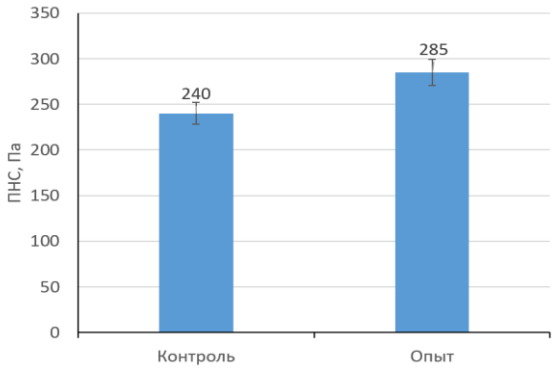


Рисунок 3 – Значения ПНС сосисок

Рост предельного напряжения сдвига на 45 Па свидетельствует о формировании более прочной и стабильной структуры. Это может быть связано с присутствием пищевых волокон и растительных белков, усиливающих взаимодействие в системе «белок–вода–жир». Кроме того, повышение влаго- и жироудерживающей способности способствует более равномерному распределению компонентов фарша и уменьшению структурных дефектов.

Полученные данные подтверждают стабилизирующее действие растительного ингредиента на белково-эмульсионную систему. Введение 1,6 % порошка пророщенной пшеницы улучшает структурно-механические характеристики сосисок и может положительно влиять на текстуру готового продукта.

3.5. Выход сосисок после термической обработки

Выход готовой продукции после варки является одним из ключевых технологических показателей, отражающих степень сохранения влаги и жировой фазы в процессе термообработки, а также стабильность белково-эмульсионной системы.

В контрольном варианте выход после варки составил 93,8 ± 0,6%, тогда как в опытном образце данный показатель достиг 96,1 ± 0,5%. Таким образом, использование сублимированного порошка пророщенных зерен пшеницы обеспечило увеличение выхода готового продукта на 2,3 процентных пункта (рис. 4).

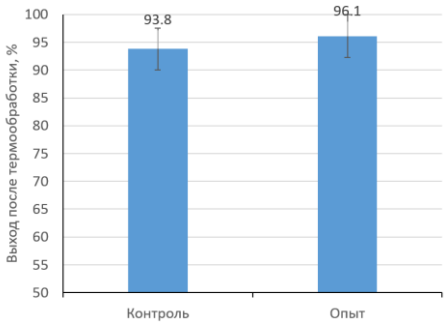


Рисунок 4 – Выход сосисок после термообработки

Повышение выхода в опытном варианте связано с улучшением влаго- и жироудерживающей способности фарша. Присутствие пищевых волокон и гидрофильных компонентов растительного происхождения способствует связыванию свободной влаги и её удержанию в структуре белково-жировой матрицы. Кроме того, формирование более устойчивой эмульсии снижает интенсивность бульонно-жировых потерь при нагревании.

Увеличение выхода после термообработки свидетельствует о снижении технологических потерь массы и формировании более стабильной структуры продукта. Это имеет не только технологическое, но и экономическое значение, поскольку позволяет повысить эффективность производства без увеличения доли жировых компонентов или использования синтетических стабилизаторов.

Таким образом, замена 1,6% пшеничной муки на сублимированный порошок пророщенных зерен пшеницы сопровождается увеличением выхода сосисок после варки, что

подтверждает целесообразность использования данного растительного ингредиента в рецептурах варёных колбасных изделий.

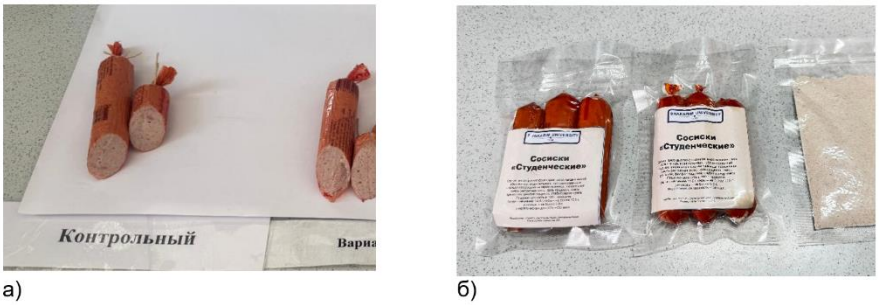
3.5. Органолептическая оценка сосисок

Органолептические показатели сосисок оценивали по 5-балльной шкале по следующим критериям: внешний вид, цвет на разрезе, вкус, аромат и консистенция. Полученные результаты свидетельствуют о сохранении высоких потребительских характеристик в обоих вариантах продукции (табл. 3).

Таблица 3 – Органолептическая оценка сосисок

Показатель	Контроль	Опыт
Внешний вид	4,4	4,6
Цвет на разрезе	4,7	4,7
Вкус	4,8	4,8
Аромат	4,5	4,8
Консистенция	4,4	4,7
Общий балл	22,8	23,6

Контрольный образец характеризовался светло-розовым цветом на разрезе, равномерной структурой и упругой консистенцией (рис. 5). Вкус и аромат были нейтральными, с выраженным, но сбалансированным присутствием пряностей, без посторонних оттенков. По сумме баллов контроль получил 22,8 из 25 возможных, что соответствует высокому уровню качества варёных колбасных изделий.



а) б)

Рисунок 5 – Внешний вид сосисок контрольного и опытного вариантов:
а) вид на разрезе; б) продукция в вакуумной упаковке

Опытный вариант, содержащий сублимированный порошок пророщенных зерен пшеницы, продемонстрировал ряд отличительных особенностей. Цвет на разрезе характеризовался более тёплым, слегка кремовым оттенком, что, вероятно, связано с присутствием растительного компонента. При этом показатель «цвет на разрезе» сохранился на уровне контроля (4,7 балла), что свидетельствует об отсутствии негативного влияния добавки на визуальные характеристики продукта.

Вкус опытного образца оценён в 4,8 балла, аналогично контрольному варианту, однако дегустационная комиссия отметила появление лёгкого зернового и слегка сладковатого оттенка, обусловленного использованием пророщенной пшеницы. Данный нюанс не воспринимался как посторонний и не снижал общую гармоничность вкуса, а, напротив, способствовал формированию более сложного вкусового профиля.

Наиболее выраженные различия выявлены по показателям «аромат» и «консистенция». Аромат опытного варианта получил 4,8 балла против 4,5 в контроле, что может быть связано с дополнительными летучими соединениями растительного происхождения, образующимися в процессе проращивания зерна. Консистенция опытного образца оценена выше (4,7 против 4,4 балла), что коррелирует с ранее установленным увеличением влаго- и жироудерживающей способности, а также повышением предельного напряжения сдвига. Более плотная и стабильная структура объясняется усиленным связыванием влаги и жировой фазы в эмульсионной системе.

Суммарная органолептическая оценка опытного варианта составила 23,6 балла, что на 0,8 балла превышает показатель контрольного образца. Полученные данные

свидетельствуют о том, что введение 1,6 % сублимированного порошка пророщенных зерен пшеницы не ухудшает потребительские свойства сосисок и способствует улучшению отдельных сенсорных характеристик, прежде всего консистенции и аромата.

Таким образом, разработанный опытный образец сохраняет традиционные органолептические признаки варёных сосисок и демонстрирует тенденцию к повышению общей сенсорной привлекательности продукта.

Заключение

В результате исследований разработана рецептура варёных сосисок с заменой 1,6% пшеничной муки на сублимированный порошок пророщенных зерен пшеницы. Установлено, что внесение растительного ингредиента улучшает пищевую ценность продукта: содержание белка изменилось с 13,9 до 14,4%, золы – с 2,15 до 2,25%, углеводов, включая пищевые волокна, – с 2,6 до 3,0%. Использование порошка не вызвало критических изменений pH и активности воды. Функционально-технологические показатели улучшились: ВУС повысилась с 108 до 120%, ЖУС – с 160 до 175%, предельное напряжение сдвига – с 240 до 285 Па. Выход после термообработки увеличился с 93,8 до 96,1%. Органолептическая оценка также повысилась с 22,8 до 23,6 балла. Полученные результаты подтверждают целесообразность применения пророщенных зерновых компонентов в технологии варёных сосисок функционального назначения.

Список литературы

1. Мелещеня А.В. Оценка пищевой и биологической ценности варено-копченых колбасных изделий с учетом рационального использования сырья и калорийности / А.В. Мелещеня, О.Г. Ходорева, К.А. Марченко // Актуальные вопросы переработки мясного и молочного сырья. – 2022. – № 1(15). – С. 155-165.
2. Impact on lipid profile and influence on sensory, texture and structural properties when replacing saturated fats with rapeseed oil in frankfurter-type sausages / S. Leivers et al // European Food Research and Technology. – 2025. – Vol. 251, № 8. – P. 2211-2224.
3. Vitamins in Cereals: A Critical Review of Content, Health Effects, Processing Losses, Bioaccessibility, Fortification, and Biofortification Strategies for Their Improvement / M. Garg et al // Frontiers in Nutrition. – 2021. – Vol. 8. https://doi.org/10.3389/fnut.2021.586815.
4. Unlocking the potential of buckwheat hulls, sprouts, and extracts: innovative food product development, bioactive compounds, and health benefits – a review / Z. Atambayeva et al // Polish Journal of Food and Nutrition Sciences. – 2024. – Vol. 74, № 3. – P. 293-312.
5. Чижикова О.Г. Использование продуктов переработки зерна пшеницы для мясных рубленых полуфабрикатов геродиетического назначения / О.Г. Чижикова, К.В. Нижельская, Л.О. Коршенко // Известия Дальневосточного федерального университета. Экономика и управление. – 2017. – № 4(84). – С. 123-131.
6. Чижикова О.Г. Перспективы использования пророщенного зерна ржи для мясных рубленых полуфабрикатов геродиетического назначения / О.Г. Чижикова, К.В. Нижельская // Вестник Камчатского государственного технического университета. – 2017. – № 40. – С. 51-57.
7. Бакуменко О.Е. Возможности использования сублимированных растительных порошков при производстве зерновых экструдированных продуктов / О.Е. Бакуменко, Е.В. Алексеенко, Н.В. Рубан // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2019. – № 1. – С. 116-129.
8. Harguindeguy M. On the effects of freeze-drying processes on the nutritional properties of foodstuff: A review / M. Harguindeguy, D. Fissore // Drying Technology. – 2020. – Vol. 38. – P. 846-868. https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1599905.
9. ГОСТ 25011-2017. Мясо и мясные продукты. Методы определения белка. – М.: Стандартинформ, 2018. – 15 с.
10. ГОСТ 9793-2016. Мясо и мясные продукты. Методы определения влаги. – М.: Стандартинформ, 2017. – 6 с.
11. ГОСТ 23042-2015. Мясо и мясные продукты. Методы определения жира. – М.: Стандартинформ, 2019. – 9 с.
12. Антипова Л.В., Глотова И.А., Рогов И.А. Методы исследования мяса и мясных продуктов / под ред. И.А. Рогова. – М.: Колос, 2001. – 376 с.
13. СТ РК ИСО 2917-2009. Мясо и мясные продукты. Определение pH. Контрольный метод. – Астана : Госстандарт Республики Казахстан, 2010. – 16 с.

14. Функционально-технологические свойства мяса: метод. указания к лаб.-практ. работе / Н.В. Тимошенко и др. – Краснодар: КубГАУ, 2015. – 26 с.
15. ГОСТ 9959-2015. Мясо и мясные продукты. Общие условия проведения органолептической оценки. – М.: Стандартинформ, 2016. – 20 с.

References

1. Meleshchenya A.V. Otsenka pishchevoi i biologicheskoi tsennosti vareno-kopchenykh kolbasnykh izdelii c uchetom ratsional'nogo ispol'zovaniya syr'ya i kaloriinosti / A.V. Meleshchenya, O.G. Khodoreva, K.A. Marchenko // Aktual'nye voprosy pererabotki myasnogo i molochnogo syr'ya. – 2022. – № 1(15). – S. 155-165. (in Russian).
2. Impact on lipid profile and influence on sensory, texture and structural properties when replacing saturated fats with rapeseed oil in frankfurter-type sausages / S. Leivers et al // European Food Research and Technology. – 2025. – Vol. 251, № 8. – P. 2211-2224. (in English).
3. Vitamins in Cereals: A Critical Review of Content, Health Effects, Processing Losses, Bioaccessibility, Fortification, and Biofortification Strategies for Their Improvement / M. Garg et al // Frontiers in Nutrition. – 2021. – Vol. 8. https://doi.org/10.3389/fnut.2021.586815. (in English).
4. Unlocking the potential of buckwheat hulls, sprouts, and extracts: innovative food product development, bioactive compounds, and health benefits – a review / Z. Atambayeva et al // Polish Journal of Food and Nutrition Sciences. – 2024. – Vol. 74, № 3. – P. 293-312. (in English).
5. Chizhikova O.G. Ispol'zovanie produktov pererabotki zerna pshenitsy dlya myasnykh rublenykh polufabrikatov gerodieticheskogo naznacheniya / O.G. Chizhikova, K.V. Nizhel'skaya, L.O. Korshenko // Izvestiya Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta. Ehkonomika i upravlenie. – 2017. – № 4(84). – S. 123-131. (in Russian).
6. Chizhikova O.G. Perspektivy ispol'zovaniya proroshchennogo zerna rzhi dlya myasnykh rublenykh polufabrikatov gerodieticheskogo naznacheniya / O.G. Chizhikova, K.V. Nizhel'skaya // Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2017. – № 40. – S. 51-57. (in Russian).
7. Bakumenko O.E. Vozmozhnosti ispol'zovaniya sublimirovannykh rastitel'nykh poroshkov pri proizvodstve zernovykh ehkstrudirovannykh produktov / O.E. Bakumenko, E.V. Alekseenko, N.V. Ruban // Khranenie i pererabotka sel'khozsyr'ya. – 2019. – № 1. – S. 116-129. (in Russian).
8. Harguindeguy M. On the effects of freeze-drying processes on the nutritional properties of foodstuff: A review / M. Harguindeguy, D. Fissore // Drying Technology. – 2020. – Vol. 38. – P. 846-868. https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1599905. (in English).
9. GOST 25011-2017. Myaso i myasnye produkty. Metody opredeleniya belka. – M.: Standartinform, 2018. – 15 s. (in Russian).
10. GOST 9793-2016. Myaso i myasnye produkty. Metody opredeleniya vlagi. – M.: Standartinform, 2017. – 6 s. (in Russian).
11. GOST 23042-2015. Myaso i myasnye produkty. Metody opredeleniya zhira. – M.: Standartinform, 2019. – 9 s. (in Russian).
12. Antipova L.V., Glotova I.A., Rogov I.A. Metody issledovaniya myasa i myasnykh produktov / pod red. I.A. Rogova. – M.: Kolos, 2001. – 376 s. (in Russian).
13. ST RK ISO 2917-2009. Myaso i myasnye produkty. Opredelenie rN. Kontrol'nyi metod. – Astana : Gosstandart Respubliki Kazakhstan, 2010. – 16 s. (in Russian).
14. Funktsional'no-tekhnologicheskie svoistva myasa: metod. ukazaniya k lab.-prakt. rabote / N.V. Timoshenko i dr. – Krasnodar: KubGAU, 2015. – 26 s. (in Russian).
15. GOST 9959-2015. Myaso i myasnye produkty. Obshchie usloviya provedeniya organolepticheskoi otsenki. – M.: Standartinform, 2016. – 20 s. (in Russian).

Э.К. Окусханова*, Г.Б. Абдилова, Ж.М. Атамбаева, А.А. Даутова, Ш.К. Жакупбекова
Шәкәрім университеті, 071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинки к-сі, 20 А
*e-mail: eleonora-okushan@mail.ru

ӨНГЕН БИДАЙ ДӘНДЕРІНІҢ СУБЛИМАЦИЯЛЫҚ КЕПТІРІЛГЕН ҰНТАҒЫНЫҢ ҚҰС ЕТІНЕН ДАЙЫНДАЛҒАН ПІСІРІЛГЕН СОСИСКАЛАРДЫҢ ХИМИЯЛЫҚ ҚҰРАМЫНА, ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІНЕ ЖӘНЕ САПАСЫНА ӘСЕРІ

Мақалада бидай ұнын өнген бидай дәндерінің сублимациялық кептірілген ұнтағымен алмастыру арқылы дайындалған құс етінен жасалған пісірілген сосискаларды әзірлеу нәтижелері

келтірілген. Зерттеудің мақсаты өсімдік текті ингредиентті енгізудің дайын өнімнің тағамдық құндылығына, физика-химиялық, функционалдық-технологиялық, құрылымдық-механикалық және органолептикалық көрсеткіштеріне әсерін бағалау болды. Бақылау үлгісі бидай ұнын қолдану арқылы дайындалса, тәжірибелік үлгі өнген бидайды жібіту, өндіру, сублимациялық кептіру және ұнтақтау арқылы алынған ұнтақ қосу арқылы өндірілді. Зерттеу нәтижелері тәжірибелік үлгіде ақуыздың массалық үлесі 13,9%-дан 14,4%-ға, күл мөлшері 2,15%-дан 2,25%-ға, көмірсулар, оның ішінде тағамдық талшықтар 2,6%-дан 3,0%-ға дейін артқанын көрсетті, ал энергетикалық құндылығы аздап төмендеді. pH және су белсенділігі көрсеткіштері технологиялық тұрғыдан рұқсат етілген шектерде болды. Өсімдік компонентін енгізу ылғал ұстап тұру қабілетінің 108%-дан 120%-ға, май ұстап тұру қабілетінің 160%-дан 175%-ға дейін артуына, сондай-ақ қайнатудан кейінгі шығымның 93,8%-дан 96,1%-ға дейін жоғарылауына ықпал етті. Тәжірибелік үлгінің органолептикалық бағасы 23,6 балды құрады. Алынған нәтижелер өнген бидайдың сублимациялық кептірілген ұнтағын функционалдық бағыттағы қайнатылған шұжық өнімдерінің тағамдық құндылығы мен технологиялық тұрақтылығын арттыру мақсатында қолданудың тиімділігін дәлелдейді.

Түйін сөздер: *пісірілген сосискалар; құс еті; өнген бидай; сублимациялық ұнтақ; функционалдық өнім.*

E.K. Okuskhanova*, G.B. Abdilova, Zh.M. Atambayeva, A.A. Dautova, Sh.K. Zhakupbekova
Shakarim University, 071412, Republic of Kazakhstan, Semey, Glinka Street, 20 A
*e-mail: eleonora-okushan@mail.ru

EFFECT OF FREEZE-DRIED GERMINATED WHEAT GRAIN POWDER ON THE CHEMICAL COMPOSITION, TECHNOLOGICAL PROPERTIES, AND QUALITY OF COOKED POULTRY SAUSAGES

This study presents the results of developing cooked poultry sausages in which wheat flour was replaced with freeze-dried germinated wheat grain powder. The aim of the study was to evaluate the effect of the plant-based ingredient on the nutritional value, physicochemical, functional-technological, structural-mechanical, and sensory properties of the final product. The control sample was produced using wheat flour, while the experimental sample contained germinated wheat powder obtained through soaking, germination, freeze-drying, and subsequent milling. The experimental sample showed an increase in protein content from 13.9% to 14.4%, ash content from 2.15% to 2.25%, and carbohydrates, including dietary fiber, from 2.6% to 3.0%, accompanied by a slight decrease in energy value. The pH and water activity values remained within technologically acceptable limits. The addition of the plant ingredient increased water-holding capacity from 108% to 120%, fat-holding capacity from 160% to 175%, and cooking yield from 93.8% to 96.1%. The sensory evaluation score of the experimental sample reached 23.6 points. The obtained results confirm the feasibility of using freeze-dried germinated wheat powder to improve the nutritional value and technological stability of functional cooked sausage products.

Key words: *cooked sausages; poultry meat; germinated wheat; freeze-dried powder; functional food.*

Сведения об авторах

Элеонора Курметовна Окусханова* – ассоц. профессор, PhD, Шәкәрім университет, Республика Казахстан, г. Семей; e-mail: eleonora-okushan@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5139-9291.

Галия Бекеновна Абдилова – кандидат технических наук, ассоциированный профессор кафедры «Биоинженерные системы», Шәкәрім университет, Семей, Республика Казахстан; e-mail: g.abdilova@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6647-6314.

Жибек Манаповна Атамбаева – старший преподаватель кафедры «Технология пищевых продуктов», Шәкәрім университет, г. Семей, Казахстан; e-mail: zh.atambayeva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7899-870X.

Асель Алибековна Даутова – магистр, старший преподаватель кафедры «Пищевая технология», Шәкәрім университет; e-mail: a.dautova@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2373-2445.

Шугыла Кадыровна Жакупбекова – постдокторант кафедры «Пищевая технология», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: siyanie__88@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7558-9871.

Автор туралы мәлімет

Элеонора Құрметқызы Окусханова* – қауымдастырылған профессор, PhD, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы, Семей қ.; e-mail: eleonora-okushan@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5139-9291.

Галия Бекеновна Абдилова – техника ғылымдарының кандидаты, «Биоинженерлік жүйелер» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Шәкәрім университеті, Семей, Қазақстан; e-mail: g.abdilova@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6647-6314

Жібек Манапқызы Атамбаева – «Тамақ өнімдерінің технологиясы» кафедрасының аға оқытушысы, Шәкәрім университеті, Семей қ., Қазақстан; e-mail: zh.atambayeva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7899-870X.

Асель Алибековна Даутова – магистр, «Тамақ технологиясы» кафедрасының аға оқытушысы; Шәкәрім университеті; e-mail: a.dautova@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2373-2445.

Шугыла Кадыровна Жакупбекова – «Тамақ технологиясы» кафедрасының постдокторанты, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: siyanie__88@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7558-9871.

Information about the author

Eleonora Kurmetovna Okuskhanova* – Assoc. Professor, PhD, Shakarim University, Republic of Kazakhstan, Semey city, senior lecturer; e-mail: eleonora-okushan@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5139-9291.

Galiya Bekenovna Abdilova – candidate of technical sciences, associate professor of the department «Bioengineering systems», Shakarim University, Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: g.abdilova@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6647-6314.

Zhibek Manapovna Atambayeva – Senior Lecturer, Department of Food Technology, Shakarim University, Semey, Kazakhstan; e-mail: zh.atambayeva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7899-870X.

Assel Dautova – Master, Senior Lecturer of the Department of Food Technology, Shakarim University; e-mail: a.dautova@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2373-2445.

Shugyla Kadyrovna Zhakupbekova – postdoctoral fellow of the Department of «Food Technology», National Academy of Sciences of Kazakhstan, Republic of Kazakhstan; e-mail: siyanie__88@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7558-9871.

Поступила в редакцию 01.06.2026
Поступила после доработки 07.09.2026
Принята к публикации 09.09.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-58

CC BY 4.0
Check for updates

МРНТИ: 65.09.05

Г.Т. Жуманова*, Г.Н. Нурымхан[1], Р.У. Ашакаева[2], С.К. Касымов[1], Б.М. Кулуштаева[1]
[1]Шәкәрім университет,
071412, Казахстан, г.Семей, ул Глинки 20 А
[2]Alikhan Bokeikhan University,
071400, Республика Қазақстан,г. Семей, ул. Мәңгілік ел 11
*e-mail: g-7290@mail.ru

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ МЯСНЫХ РУБЛЕНЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ ПРОТИВОАЛЛЕРГИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

Аннотация: *В работе рассмотрены вопросы разработки технологии мясных рубленых полуфабрикатов лечебно-профилактического назначения, обладающих противоаллергическими свойствами. Актуальность исследования обусловлена необходимостью расширения ассортимента продуктов функционального питания, способствующих повышению пищевой и биологической ценности рационов населения, а также снижению риска развития пищевых аллергических реакций. Целью исследования является подбор и научное обоснование рецептурных компонентов для создания мясных полуфабрикатов с оптимальными органолептическими, пищевыми и функциональными характеристиками.*

В качестве основного сырья использовали говядину, мясо птицы, молочные компоненты, овощное и растительное сырье, богатое витаминами, минеральными веществами, пищевыми волокнами и биологически активными соединениями. Проведена оценка химического состава

Г.Т. Жуманова, Г.Н. Нурымхан, Р.У. Ашакаева, С.К. Касымов, Б.М. Кулуштаева, 2026

ингредиентов, их технологических свойств и влияния на качество готовой продукции. С использованием методов математического моделирования разработаны и оптимизированы рецептуры мясных зраз с творожным, рисовым и фруктово-овощным компонентами. Установлено, что применение натуральных компонентов позволяет повысить биологическую ценность продукта, улучшить аминокислотный и минеральный состав, сохранить высокие органолептические показатели и обеспечить перспективность использования разработанных полуфабрикатов в системе лечебно-профилактического питания.

Ключевые слова: *выбор сырья, аллергические заболевания, медико-биологические требования, мясные полуфабрикаты, оптимизация рецептур, лабораторная выработка, качественные показатели.*

Введение

Создание новых видов замороженных продуктов питания, обладающих повышенной пищевой и биологической ценностью – актуальная и своевременная задача в условиях современного рынка и потребления. Большое значение придается развитию замороженных мясных кулинарных изделий. Быстрое замораживание пищевых продуктов – наиболее прогрессивный метод консервирования. Замороженные кулинарные изделия имеют высокую степень готовности, сводящую к минимуму затраты времени на приготовление пищи в домашних условиях и в общественном питании..

Целью настоящей работы является создание новых отечественных продуктов питания высокой степени готовности к употреблению на мясной основе для массового потребления и лечебно-профилактического питания.

Увеличение в последние годы количества общих аллергогенных воздействий на организм (бытовых, химических, производственных, лекарственных и др.) способствует формированию состояния аллергической готовности организма, в том числе и к пищевым продуктам. Отечественные мясоперерабатывающие предприятия выпускают незначительный объем замороженной кулинарной продукции с ограниченным ассортиментом. Перспективным направлением производства быстрозамороженных изделий является создание новых видов продуктов на основе мясного фарша и растительных добавок, позволяющих сбалансировать питание по основным ингредиентам.

В настоящее время многие ученые и специалисты отрасли отдают предпочтение натуральным добавкам, способным оказать выраженное позитивное воздействие на организм человека. Активно формируется новое научно-практическое направление – разработка рецептур пищевых ингредиентов, обладающих лечебно-профилактическими свойствами [1].

При создании продуктов питания повышенной биологической ценности и лечебно-профилактического назначения противоаллергического действия четко прослеживается стремление отечественных и зарубежных организаций к использованию биологически активных добавок, содержащих хорошо усвояемые соединения кальция и фосфора, достаточного количества витаминов С, Р, А, группы В.

Медико-биологические требования к сырью, компонентам, рецептурам, нутриентному составу и готовому продукту регламентируют содержание белка, жира (и их соотношение), незаменимых аминокислот, минеральных веществ, соли, а также показатели безопасности - микробиологические, токсикологические [2].

Улучшение лечебных и диетических свойств мясных продуктов достигается введением в различные основы пищевых добавок из натурального растительного сырья, например плодов и фруктов, соевого белка, пектина, неочищенных зерен овса, ячменя, пшеницы, гречихи, а также настоев трав и водорослей, сухофруктов [3].

Использование их в качестве наполнителей при производстве продуктов лечебно-профилактического назначения своевременно и целесообразно. Создание подобных продуктов – важное звено в цепи рационального и полноценного питания. Введение с пищей солей кальция и фосфора способствует нормализации проницаемости кишечника и улучшению обменных процессов. Режим с ограниченным количеством углеводов снижает гидрофильность тканей, активность воспалительной реакции, аллергическую готовность организма.

Учитывая необходимость получения продуктов с привычными в питании традиционными потребительскими свойствами при одновременном обеспечении заданного

состава с максимально высокой степенью сохранности вносимых биологически активных веществ в современной технологии пищевых продуктов широко используют принципы математического моделирования и проектирования рецептур мясных продуктов. Используя данные принципы можно осуществить аналитический расчет химического состава и базовых показателей биологической ценности исследуемых продуктов [4].

В связи с изложенным целесообразно проведение научно-исследовательской работы, задачами которой будут являться:

– установление возможности использования пищевых добавок в технологии производства мясных полуфабрикатов;

– разработка научно-обоснованных рецептур и технологий производства новых видов мясных полуфабрикатов.

Объектами исследования являются патентная и научно-техническая литература в области разработки и совершенствования способов производства продуктов высокой степени готовности к употреблению, справочные данные химического состава сырья животного и растительного происхождения, оптимизация рецептур мясных полуфабрикатов, мясное сырье (мясо говядина, мясо куриное), молочное сырье (творог, молоко, масло сливочное), растительное сырье (масло подсолнечное, морковь, яблоки сушеные, горошек зеленый, капуста белокочанная, крупа манная, рис), специи, функционально-технологические свойства, технологическая схема, параметры и режимы обработки сырья, новые продукты, качественные показатели.

Методы исследований

Определение показателей проводилось следующими методами:

– данные химического состава сырья животного и растительного происхождения в соответствии с данными [5];

– определение содержания незаменимых аминокислот в белке и их скоры – расчетным способом ;

– определение массовой доли жира общепринятым методом – по ГОСТ 23042-86;

– органолептическая оценка по пятибалльной системе в соответствии с ГОСТ 9959-91.

Результаты исследования

Медико-биологические требования к диетическим мясным продуктам основаны на изучении особенностей специфических факторов алиментарно-обменных заболеваний при аллергических заболеваниях.

Общепринятая теория позитивного питания требует установления в продуктах физиологически оправданного соотношения между белками, жирами и другими составными частями пищи: содержание белка и жира не должно превышать физиологическую норму; ограничение углеводов, особенно быстрорастворимых (сахара и др.). Соотношение белков и жиров и сбалансированность незаменимых аминокислот устанавливается по проценту адекватности идеальной шкалы ФАО/ВОЗ.

При разработке продуктов для лечебно-профилактического питания при аллергических заболеваниях особое внимание уделено активным кальций – и фосфорсодержащим компонентам и пищевым добавкам, обладающих противоаллергическими и противовоспалительными свойствами. Ограничение углеводов снижает гидрофильность тканей, активность воспалительных реакций, аллергическую готовность организма. Наряду с этим предусматривается ограничение экстрактивных веществ богатых пуринами, поваренной соли; увеличение содержания витаминов С, Р, А, группы В способствующих укреплению стенок кровеносных сосудов и нормализующих реактивность организма [6].

Пищевое сырье животного происхождения (мясо и молочные продукты) отличается высокой пищевой ценностью. Содержание белков в пищевых продуктах животного происхождения: в мясных – 15-20%, молоке – 3-4%. Кроме того, они являются источником высокоценного белка и жира, витаминов А, Д, B_2, минеральных веществ (кальция, фосфора, натрия, серы и др.), а также других необходимых для организма веществ.

Для производства диетических мясных изделий используют говядину 1 категории с низким пределом жира (12 %) и 2 категории, телятину. Данные химического состава сырья приведенные в таблице 1 свидетельствуют о его высокой пищевой ценности: в говядине 1 категории съедобная часть составляет примерно 79 %, в говядине 2 категории и телятине –

не более 66 % всей туши. Говядина 1 и 2 категории содержит соответственно: белков 19-8,9 и 20,2 %; жиров 12,4 и 7,0 %; кальция – 9 и 10 мг, фосфора – 198 и 210 мг, калия – 315 и 334 мг; витамина B_1 – 0,06 и 0,07 мг, B_2 – 0,18 и 0,15 мг, B_6 – 0,37 – 0,39 мг, B_{12} – 0,37 – 0,39 мг.

Таблица 1 – Пищевая и биологическая ценность мясного и молочного сырья (на 100 г съедобной части продукта)

Сырье	Белки, г	Жиры, г	Калорийность, ккал	Минеральные вещества и микроэлементы, мг						Витамины, мг					Аминокислоты, мг		
				калий	натрий	кальций	марганец	фосфор	железо	B_1	B_2	B_6	B_{12}	PP	лизин	метионин	триптофан
Мясо говядины 1 категории	18,9	12,4	187,0	315,060	60,0	9,0	21,0	198,0	2,6	0,06	0,15	0,37	2,6	2,8	1590	440	210
Мясо говядины 2 категории	20,2	7,0	144,0	334,0	65,0	10,0	23,0	210,0	2,8	0,07	0,18	0,39	2,8	3,0	1670	520	230
Мясо телятина	19,7	1,2	90,0	344,0	108	11	24	189,0	1,7	0,14	0,23	0,38	-	3,3	1683	414	245
Творог нежирный	18,0	0,6	86,0	115,0	44,0	176,0	24,0	224,0	0,3	0,04	0,25	0,19	1,32	0,64	1450	480	180

Исключительными пищевыми и биологическими свойствами обладает творог, что обусловлено благоприятным сочетанием минеральных веществ и микроэлементов, а также незаменимой аминокислоты – метионина, обуславливающим физиологическую ценность и придающим свойства полезные для использования при аллергических заболеваниях. Кальция в твороге определяется 150-176 мг %, фосфора – 112-115, магния – 23-24, натрия – 41-44, железа – 0,3-0,4, меди в среднем – 0,74, цинка – 3,94, фтора – 0,32 мг %. Творог содержит примерно 0,05 мг % витамина B_6; 0,5 мг % витамина Р; 0,06 мг % провитамина А; 0,35 мг % фолиевой кислоты; 0,38 мг % витамина Е; 0,01 мг % витамина B_{12}.

Пищевое сырье растительного происхождения (зерна злаков, бобовые, овощи, семена масличных и др.) занимают основное место в питании человека при аллергических заболеваниях. Главное значение имеют злаковые, зерно и продукты его переработки (мука, крупа и др.). В пищевых рационах за счет злаковых обеспечивается более половины суточной калорийности рациона, а также поступление основных компонентов углеводов, белка, витаминов группы В и минеральных солей.

Основные показатели, характеризующие пищевую и биологическую ценность растительного сырья приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Пищевая и биологическая ценность растительного сырья (на 100 г съедобной части продукта)

Сырье	Белки, г	Углеводы, г	Пищевые волокна, г	Калорийность, ккал	Минеральные вещества и микроэлементы, мг								Витамины, мг				
					калий	магний	фосфор	кальций	Железо	цинк	марганец	кобальт	A	B_1	B_2	PP	E
Капуста белокочанная	1,8	5,4	0,7	28,0	185,0	16,0	-	16,0	1,0	-	-	-	0,02	0,05	0,05	0,05	6,0
Тыква	1,0	6,5	1,2	29,0	170,0	14,0	25,0	40,0	0,8	0,240	0,04	0,01	1,5	0,03	0,05	0,5	-
Горох	5,0	13,3	1,5	72,0	238,0	-	122,0	-	-	3,18	1,75	0,13	0,40	0,4	0,19	2,0	4,5
Фасоль	22,3	54,5	3,9	309,0	103,0	541,0	150,0	12,4	3,21	3,21	1,34	0,18	0,02	0,5	0,18	2,10	-
Крупа кукурузная	10,3	67,3	2,1	338,0	292,0	104,0	301,0	46,0	4,1	4,0	0,3	2,4	0,32	0,38	0,14	2,10	10,0
Крупа цельная овсяная	11,9	65,4	2,1	345,0	292,0	116,0	328,0	64,0	3,9	7,7	5,7	1,0	-	0,49	0,11	1,1	15,0
Рис	7,3	63,1	9,0	284,0	202,0	96,0	328,0	66,0	2,6	1,4	1,2	-	-	0,52	0,12	3,82	-
Морковь красная	1,3	7,0	0,8	33,0	200,0	38,0	-	51,0	1,2	0,4	0,08	0,2	9,0	0,07	0,07	1,0	-
Картофель	2,0	19,7	1,0	83,0	568,0	23,0	58,0	10,0	0,9	3,60	23,0	0,50	0,02	0,12	0,05	0,90	0,10

Большое значение в питании человека имеют овощи, являющиеся источниками витамина С, а также каротина, легкоусвояемых углеводов, необходимых органических кислот и клетчатки, способствующей процессам переваривания. Для организации диетического питания наибольшее значение имеют пищевые волокна, включающие полисахариды (целлюлозу, гемицеллюлозу, пуриновые вещества). Много клетчатки и пектина в свекле, тыква богата солями калия, каротина, но содержит малое количество клетчатки и органических кислот. Овощи являются важным источником веществ – кальция, железа и др., а также микроэлементов. Более привлекательными для будущего диетического продукта являются морковь и свекла. В моркови 7% сахаров, много каротина и фолацина. Морковь, как источник β – каротина, не только не вызывает аллергических реакций, но и обладает антиоксидантной активностью, способствуя защите организма от влияния вредных факторов окружающей среды, укреплению иммунной системы. К числу пищевых добавок, характеризующихся диетическими свойствами, относятся меланиновые пигменты из красной свеклы.

С точки зрения функционального питания представляет интерес содержание в жирах ненасыщенных жирных кислот, в особенности полиненасыщенных, обладающих наибольшей биологической активностью. В растительных маслах(хлопковое) содержится витамин Е, антиокислитель для синтезируемой в организме из линолевой кислоты, арахидоновой кислоты, являющейся наиболее ненасыщенной и биологически активной. В этих маслах содержится лецитин, благоприятно влияющий на обмен холестерина и обладающий липотропными свойствами. В связи с указанными свойствами очень важно включение растительного масла(хлопкового) во все диеты в пределах примерно 30% общего количества жира. Состав жирных кислот в некоторых основных жирах растительного происхождения, а также количество минеральных веществ и витаминов масличного сырья приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Состав жирных кислот в основных жирах растительного происхождения и количество минеральных веществ и витаминов в масличном сырье

Продукт	Состав жирных кислот			Содержание в исходном масличном сырье, мг						
				Минеральных веществ				Витаминов		
	НЖК	МНЖК	ПНЖК	калий	кальций	фосфор	железо	B_1	B_2	РР
Подсолнечное	10	30	60	647	367	530	61	1,84	0,18	10,1
Арахисовое	18	56	26	658	76	350	5	0,74	0,11	13,2
Кунжутное	12	45	43	497	1474	720	91	1,27	0,36	4,0
Соевое	14	35	51	1607	348	510	11,8	0,94	0,22	2,2
Кукурузное	11	30	57	292	46	1100	10,0	1,43	0,39	2,1
Хлопковое	25	25	50	1100	171	1100	10,0	1,47	0,39	2,7

Магния больше всего в семенах кунжута (540 мг), натрия в семенах хлопчатника, фосфора – в кукурузном масле, в семенах сои есть провитамин А (0,07 мг). По различным данным, лецитинов в подсолнечном масле содержится от 700 до 1400 мг, в хлопковом от 1500 до 2000 мг, в соевом – от 1500 до 3900 мг.

С учетом индивидуальных характеристик рецептурных компонентов, учитывая химический состав, а также такие факторы как адекватная биологическая ценность для производства полуфабрикатов противоаллергичекого действия используют хлопковое масло.

Обсуждение результатов исследования

Для создания продуктов питания, обладающих противоаллергическими свойствами с учетом индивидуальных характеристик рецептурных ингредиентов, химического состава, а также пищевой и биологической ценности применяется следующее исходное сырье натурального происхождения:

– говядина, куриное мясо;

– источники солей Са и Р (творог, морковь, рис, сухофрукты, горошек зеленый, капуста белокочанная, картофель);

– стабилизирующие добавки (хлеб пшеничный, молоко, крахмал, крупа манная).

Зразы мясные вырабатываются из котлетного мяса (говядина) с внесением творожного и рисового компонента, фруктово-овощной массы (сухофрукты, морковь) с добавлением соли, пряностей и стабилизирующих добавок.

Рецептуры разработанных мясных полуфабрикатов «Зразы мясные» представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Рецептуры мясных полуфабрикатов «Зразы мясные»

Наименование сырья	Варианты								
	творожный компонент			рисовый компонент			фруктово-овощная масса		
Массовая доля компонента, % Говядина (котлетное мясо)	58,0	55,0	52,0	61,0	58,0	55,0	57,0	50,0	43,0
Молоко	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
Хлеб пшеничный	13,0	13,0	13,0	12,0	12,0	12,0	13,0	13,0	13,0
Морковь	-	-	-	-	-	-	5,0	10,0	15,0
Творог	6,0	9,0	12,0	-	-	-	-	-	-
Сухофрукты яблоки сушеные)	-	-	-	-	-	-	4,0	6,0	8,0
Рис	-	-	-	6,0	9,0	12,0	-	-	-
Масло сливочное	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	3,0	3,0	3,0
Сахар-песок	-	-	-	-	-	-	3,0	3,0	3,0
Крахмал картофельный	2,0	2,0	2,0	-	-	-	-	-	-
Соль поваренная	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	-	-	-
Итого:	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Разработано 9 видов рецептур, где изменялся компонентный состав творожного компонента – 6, 9, 12%; фруктово-овощной массы (сухофрукты и морковь) – 4, 6, 8% и 5, 10, 15%; рисового компонента – 6, 9, 12%. Отрабатывалось их количество и дозы, их взаимосвязь и влияние друг на друга. Методом математического моделирования оптимизированы разработанные рецептуры.

Технологический процесс производства лабораторной партии мясных полуфабрикатов «Зразы мясные» включают в себя следующие этапы:

Вариант 1 «Зразы из говядины с творогом»

1. Приготовление котлетной массы

Мясо ⟶ Измельчение (волчок, d отв.=2-3 мм) ⟶ Перемешивание с хлебом;

Хлеб пшеничный ⟶ Нарезание на куски ⟶ Замачивание (молоко, t=20-25 ^{0}C,τ=20 мин.) ⟶ Отжатие;

Молоко ⟶ Охлаждение (t=20-25 ^{0}C, τ=20 мин.).

2. Приготовление творожного компонента

Творог ⟶ Протирка (волчок, d отв.=2-3 мм).

3. Измельчение (мясной, творожный компоненты; волчок, d отв.=2-3 мм).

4. Перемешивание (охлажденное молоко, крахмал, масло сливочное, соль).

5. Формование

6. Запекание (духовой шкаф, (t=180-220 ^{0}C, τ=60 мин); варка на пару (пароварочная камера, (t=100 ^{0}C, τ=25 мин).

Вариант 2 «Зразы из говядины фаршированные рисом»

1. Приготовление котлетной массы

Мясо ⟶ Измельчение (волчок, d отв.=2-3 мм) ⟶ Перемешивание с хлебом;

Хлеб пшеничный ⟶ Нарезание на куски ⟶ Замачивание (молоко, t=20-25 ^{0}C, τ=20 мин.) ⟶ Отжатие;

Молоко ⟶ Охлаждение (t=20-25 ^{0}C, τ=20 мин.).

2. Приготовление рисового компонента

Крупа рисовая ⟶ Очистка ⟶ Мойка (t=20-25 ^{0}C, τ=20 мин.) ⟶ Замачивание (1,0-1,5 % р-р NaCl; t=20-25 ^{0}C, τ=30 мин.) ⟶ Припускание (масло сливочное, τ=10 -12 мин.).

3.Перемешивание с молоком.
4. Формование (рисовый компонент).
5. Запекание (духовой шкаф (t=180-220 ^{0}C, τ=60 мин); варка на пару (пароварочная камера (t=100 ^{0}C, τ=25 мин).

Вариант 3 «Зразы из говядины с морковью и сухофруктами»
1. Приготовление котлетной массы
Мясо ⟶ Измельчение (волчок, d отв.=2-3 мм) ⟶ Перемешивание с хлебом;
Хлеб пшеничный ⟶ Нарезание на куски ⟶ Замачивание (молоко, t=20-25 ^{0}C, τ=20 мин.) ⟶ Отжатие;
Молоко ⟶ Охлаждение (t=20-25 ^{0}C, τ=20 мин.).
2. Приготовление фруктово-овощной массы
Сухофрукты ⟶ Очистка ⟶ Мойка (t=20-25 ^{0}C, τ=20 мин.) ⟶ Варка (t=100 ^{0}C, τ=30 мин.) ⟶ Удаление косточек ⟶ Перемешивание с морковью и сахаром.
Морковь ⟶ Очистка ⟶ Мойка (t=20-25 ^{0}C, τ=20 мин.) ⟶ Шинкование (τ=20 мин.) ⟶ Припускание (масло сливочное, τ=10 -12 мин.).
3. Перемешивание (охлажденное молоко).
4. Формование (фруктово-овощная масса);
5. Запекание (духовой шкаф (t=180-220 0C, =60 мин.).

Заключение

В лабораторных условиях проведена отработка технологических параметров и режимов обработки сырья и коррекция моделей рецептур мясных полуфабрикатов, обладающих противоаллергическими свойствами.

При обогащении мясных полуфабрикатов биологически активными добавками учитывали возможность химического взаимодействия обогащающих компонентов между собой с учетом пищевой и биологической ценности, обеспечивающих сочетаемость, структуру и биодоступность.

На основании проведенных исследований, учитывая органолептические показатели исследуемых продуктов, из 9 видов разработанных рецептур где бралось разное соотношение составных частей мяса и разное количество творожного и рисового компонентов и фруктово-овощной массы были отобраны рецептуры с творожным и рисовым компонентами в количестве 9%, фруктово-овощной массой с количественным соотношением сухофруктов (яблоки сушеные) – 6% и моркови – 10%, где компоненты подобраны по оптимальным параметрам аминокислотного состава, жирно-кислотного состава и общей суммы минеральных веществ и соответствовало заданным требованиям.

Список литературы

1. Жуманова Г.Т. Разработка технологии и оценка качества рубленых полуфабрикатов из конины с использованием белковых обогатителей: дис. … д-ра философии (PhD) : 6D073500 – Пищевая безопасность / Г.Т. Жуманова. – Семей, 2022. – 126 с.
2. Покровский А А. Справочник по диетологии / А.А. Покровский, М.А. Самсонов. – Москва: Медицина, 1981. – 704 с.
3. Сизенко Е.И. Технологии пищевых продуктов для населения экологически неблагополучных регионов России / Е.И. Сизенко // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2002. – № 9. – С. 3-6.
4. Prospects of using poultry by-products in the technology of chopped semi-finished products / G. Zhumanova et al // International Journal of Engineering & Technology. – 2018. – Vol. 7, № 3.34. – P. 495-498.
5. Нестеренко М.Ф. Химический состав пищевых продуктов: справочные таблицы содержания аминокислот, жирных кислот, витаминов и минеральных веществ / М.Ф. Нестеренко. – Москва: Пищевая промышленность, 1979. – 226 с.
6. ТР ТС 021/2011. О безопасности пищевой продукции: технический регламент Таможенного союза: утверждён решением Комиссии Таможенного союза от 9 декабря 2011 г. № 880. – 2011.

7. Тутельян В.А. Теория и практика здорового питания / В.А. Тутельян. – Москва: Издательский дом «Панорама», 2015. – 784 с.
8. Ипатова Л.Г. Функциональные пищевые продукты: основные понятия и современное состояние проблемы / Л.Г. Ипатова, А.А. Кочеткова, А.П. Нечаев // Пищевая промышленность. – 2010. – № 2. – С. 10-13.
9. Rogov I.A. Food biotechnology and functional meat products / I.A. Rogov, L.V. Antipova, N.I. Dunchenko. – Moscow: Kolos, 2009. – 472 p.
10. Jiménez-Colmenero F. Healthier meat and meat products: their role as functional foods / F. Jiménez-Colmenero, J. Carballo, S. Cofrades // Meat Science. – 2001. – Vol. 59, № 1. – P. 5-13. – https://doi.org/10.1016/S0309-1740(01)00053-5.

References

1. Zhumanova G.T. Razrabotka tekhnologii i otsenka kachestva rublenykh polufabrikatov iz koniny s ispol'zovaniem belkovykh obogatitelei: dis. … d-ra filosofii (PhD) : 6D073500 – Pishchevaya bezopasnost' / G.T. Zhumanova. – Semei, 2022. – 126 s. (in Russian).
2. Pokrovskii A A. Spravochnik po dietologii / A.A. Pokrovskii, M.A. Samsonov. – Moskva: Meditsina, 1981. – 704 s. (in Russian).
3. Sizenko E.I. Tekhnologii pishchevykh produktov dlya naseleniya ehkologicheski neblagopoluchnykh regionov Rossii / E.I. Sizenko // Khranenie i pererabotka sel'khozsyr'ya. – 2002. – № 9. – S. 3-6. (in Russian).
4. Prospects of using poultry by-products in the technology of chopped semi-finished products / G. Zhumanova et al // International Journal of Engineering & Technology. – 2018. – Vol. 7, № 3.34. – P. 495-498. (in English).
5. Nesterenko M.F. Khimicheskii sostav pishchevykh produktov: spravochnye tablitsy soderzhaniya aminokislot, zhirnykh kislot, vitaminov i mineral'nykh veshchestv / M.F. Nesterenko. – Moskva: Pishchevaya promyshlennost', 1979. – 226 s. (in Russian).
6. TR TS 021/2011. O bezopasnosti pishchevoi produktsii: tekhnicheskii reglament Tamozhennogo soyuza: utverzhden resheniem Komissii Tamozhennogo soyuza ot 9 dekabrya 2011 g. № 880. – 2011. (in Russian).
7. Tutel'yan V.A. Teoriya i praktika zdorovogo pitaniya / V.A. Tutel'yan. – Moskva: Izdatel'skii dom «Panorama», 2015. – 784 s. (in Russian).
8. Ipatova L.G. Funktsional'nye pishchevye produkty: osnovnye ponyatiya i sovremennoe sostoyanie problemy / L.G. Ipatova, A.A. Kochetkova, A.P. Nechaev // Pishchevaya promyshlennost'. – 2010. – № 2. – S. 10-13. (in Russian).
9. Rogov I.A. Food biotechnology and functional meat products / I.A. Rogov, L.V. Antipova, N.I. Dunchenko. – Moscow: Kolos, 2009. – 472 p. (in English).
10. Jiménez-Colmenero F. Healthier meat and meat products: their role as functional foods / F. Jiménez-Colmenero, J. Carballo, S. Cofrades // Meat Science. – 2001. – Vol. 59, № 1. – P. 5-13. – https://doi.org/10.1016/S0309-1740(01)00053-5. (in English).

Г.Т. Жуманова[*], Г.Н. Нұрымхан[1], Р.У. Ашакаева[2], С.К. Касымов[1], Б.М. Кулуштаева[1]
[1]Шәкәрім университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинки к-сі 20 А
[2]Alikhan Bokeikhan University,
071400, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Мәңгілік ел көшесі, 11
[*]e-mail: g-7290@mail.ru

АЛЛЕРГИЯҒА ҚАРСЫ ӘСЕР ЕТЕТІН ТУРАЛҒАН ЕТ ЖАРТЫЛАЙ ФАБРИКАТТАРЫНЫҢ ТЕХНОЛОГИЯСЫН ӘЗІРЛЕУ

Мақалада аллергияға қарсы әсері бар емдік-профилактикалық мақсаттағы еттен жасалған туралған жартылай фабрикаттарды өндіру технологиясын әзірлеу мәселелері қарастырылған. Зерттеудің өзектілігі халықтың дұрыс тамақтануын қамтамасыз ететін, тағамдық және биологиялық құндылығы жоғары функционалдық өнімдердің жаңа түрлерін жасаудың қажеттілігімен байланысты. Зерттеудің мақсаты – жоғары сапалы, теңгерімді химиялық құрамға ие және емдік қасиеттері бар ет өнімдерінің рецептуралық құрамын ғылыми негіздеу және оңтайландыру.

Зерттеу барысында жануар және өсімдік текті шикізаттардың тағамдық құрамы, биологиялық құндылығы және технологиялық қасиеттері зерттелді. Негізгі шикізат ретінде сиыр

еті, құс еті, сүт өнімдері, көкөністер, дәнді дақылдар және дәрумендер мен минералдық заттарға бай өсімдік компоненттері пайдаланылды. Математикалық модельдеу әдістерінің көмегімен сүзбе, күріш және жеміс-көкөніс қоспалары қосылған ет зраздарының бірнеше рецептуралық нұсқалары әзірленді. Зерттеу нәтижелері табиғи биологиялық белсенді компоненттерді қолдану өнімнің тағамдық құндылығын арттыруға, аминқышқылдық құрамын жақсартуға және оның функционалдық қасиеттерін күшейтуге мүмкіндік беретінін көрсетті. Әзірленген өнімдер емдік-профилактикалық тамақтану жүйесінде қолдануға перспективалы болып табылады.

Түйін сөздер: *ет жартылай фабрикаттары, функционалдық тағам, аллергияға қарсы әсер, рецептура, биологиялық құндылық, табиғи қоспалар.*

G.T. Zhumanova*,G.N. Nurymkhan[1], R.U. Ashakayeva[2], C.K. Kasymov[1], B.M. Kulushtayeva[1]
[1]Shakarim University, 071412, Republic of Kazakhstan, Semey city, 20A Glinka St.
[2]Alikhan Bokeikhan University,
071400, Republic of Kazakhstan, Semey, Mangilik El STR., 11
*e-mail: g-7290@mail.ru

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR MINCED MEAT SEMI-FINISHED PRODUCTS WITH AN ANTIALLERGIC EFFECT

The article presents the development of a technology for minced meat semi-finished products intended for therapeutic and preventive nutrition with anti-allergic properties. The relevance of the research is determined by the growing demand for functional food products with enhanced nutritional and biological value aimed at improving human health and reducing the risk of food-related allergic reactions. The purpose of the study was to select and scientifically substantiate formulation components for producing meat products with improved nutritional, technological, and sensory characteristics.

The study involved the analysis of animal and plant-based raw materials, including beef, poultry meat, dairy ingredients, vegetables, cereals, and natural components rich in vitamins, minerals, dietary fiber, and biologically active substances. Mathematical modeling methods were used to develop and optimize formulations of meat zrazy containing cottage cheese, rice, and fruit-vegetable components. The obtained results demonstrated that the incorporation of natural functional ingredients improves the amino acid composition, mineral content, and overall biological value of the product while maintaining high organoleptic quality. The developed meat semi-finished products can be recommended for functional and preventive nutrition.

Key words: *minced meat semi-finished products, functional food, anti-allergic effect, formulation, biological value, natural ingredients, preventive nutrition.*

Авторлар туралы мәліметтер

Гульнара Токеновна Жуманова* – PhD, «Тамақ технологиясы» кафедрасының қауымдастырылған профессор м.а., Шәкәрім университеті, Қазақстан; e-mail: g-7290@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1785-2739.

Гульнур Несиптаевна Нұрымхан – т.ғ.к., «Тамақ технология» кафедрасының меңгерушісің, Шәкәрім университеті, Қазақстан; e-mail: gulnu-n@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0955-3520.

Рысгуль Улыбаевна Ашакаева – Alikhan Bokeikhan University, Қазақстан; e-mail: ryskulkamara@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8501-0600.

Самат Кайратович Касымов – т.ғ.к., «Тамақ технология» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Шәкәрім университеті, Қазақстан; e-mail: samat-kasymov@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7384-6996.

Ботакоз Манарбековна Кулуштаева – PhD, «Тамақ технологиясы» кафедрасының қауымдастырылған профессор м.а., Шәкәрім университеті, Қазақстан; e-mail: kulushtaeva_89@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0067-9872.

Сведения об авторах

Гульнара Токеновна Жуманова* – PhD, и.о ассоцированного профессора кафедры «Пищевая технология», Шәкәрім университет, Казакстан; e-mail: g-7290@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1785-2739.

Гульнур Несиптаевна Нурымхан – к.т.н., заведующая кафедрой «Пищевая технология», Шәкәрім университет; e-mail: gulnu-n@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0955-3520.

Рысгуль Улыбаевна Ашакаева – Alikhan Bokeikhan University, Казақстан; e-mail: ryskulkamara@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8501-0600.

Самат Кайратович Касымов – к.т.н., ассоциированный профессор кафедры «Пищевая технология», Шәкәрім университет, Казакстан; e-mail: samat-kasymov@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7384-6996.

Ботакоз Манарбековна Кулуштаева – PhD, и.о. ассоциированный профессор кафедры «Пищевая технология», Шәкәрім университет, Казакстан; e-mail: kulushtaeva_89@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0067-9872.

Information about the authors

Gulnara Zhumanova* – PhD, Acting Associate Professor of the Department of Food Technology, Shakarim University, Kazakhstan; e-mail: g-7290@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1785-2739.

Gulnur Nurymkhan – PhD in Technical Sciences, Head of the Department of Food Technology; e-mail: gulnu-n@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0955-3520.

Rysgul Ashakayeva – Educational organization Alikhan Bokeikhan University, Kazakhstan; e-mail: ryskulkamara@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8501-0600.

Samat Kasymov – PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Food Technology, Shakarim University, Kazakhstan; e-mail: samat-kasymov@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7384-6996.

Botakoz Kulushtaeva – PhD, Acting Associate Professor of the Department of «Food Technology», Shakarim University, Kazakhstan; e-mail: kulushtaeva_89@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0067-9872.

Поступила в редакцию 01.06.2026
Поступила после доработки 07.09.2026
Принята к публикации 10.09.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-59

IRSTI: 65.13.13

G.B. Bekeshova[1]*, N.K. Ibragimov[2], B.A. Lobasenko[3]
[1]L.N. Gumilyov Eurasian National University,
010008, Republic of Kazakhstan, Astana, st. Satpayev, 2
[2]Shakarim University, 071412, Republic of Kazakhstan, Semey, st. Glinka, 20 A
[3]Kemerovo State University, 650000, Russian Federation, Kemerovo, st. Krasnaya, 6
*e-mail: gulvirabauyrzhanovna@gmail.com

MATHEMATICAL MODELING OF THE FINE GRINDING PROCESS OF MEAT-AND-BONE RAW MATERIALS

Abstract: *Fine grinding sets the dispersion of the raw material and, through it, the structure and water-binding capacity of the minced mass, yet in conventional lines it is separated from preliminary grinding, which increases the number of machines and the specific energy demand. The article presents a mathematical model of the fine grinding of meat-and-bone raw materials in a combined unit where both stages run sequentially in one working space from a single drive. The model is built on the Bingham rheological body supplemented by an element describing the instantaneous irreversible deformation of bone inclusions, and is arranged as two series-connected contours. Summation of the contour shear rates gives a compact equation with equivalent (reduced) characteristics, coupled with the kinematics of the cutting mechanism, so that the power of the process is expressed through yield shear stress, cutting area, blade radius and rotational speed. Adequacy was verified against yield shear stress measured by penetration in eight runs with three replications: the calculated Fi = 0.29164 is lower than the tabulated Ftab = 1.02 at f1 = 3, f2 = 4, α = 0.1. At 16.7 s^{-1} the combined unit reached 151.3 kg/h against 96.3 kg/h, 68 % of particles fell within 100–150 μm against 36 %, and specific energy consumption decreased from 31.15 to 22.14 kW·h/t.*

Key words: *meat-and-bone raw materials; fine grinding; combined grinding unit; rheological model; Bingham body; yield shear stress; cutting working bodies; Fisher's criterion.*

Introduction

Grinding is the operation that sets the degree of dispersion of raw material and, through it, the structure of minced meat, its water-binding capacity, rheological behaviour and the energy demand of every subsequent stage of sausage production [1]. In the production schemes currently

©G.B. Bekeshova, N.K. Ibragimov, B.A. Lobasenko, 2026

used, coarse and medium grinding are carried out in a mincer, whereas fine grinding is transferred to a separate machine – a cutter, an emulsifier or a colloid mill. This sequence is technologically well mastered, but it multiplies the number of machines in the line, lengthens the cycle and raises both the specific energy consumption and the thermal load on the product.

A review of the relation between the grinding process and the quality of ground meat shows that particle size distribution, the geometry of the knife–plate pair and the rotational speed of the cutting bodies act on product quality jointly rather than independently, so that a change in any single design parameter cannot be assessed in isolation [2]. Studies of modified cutting elements confirm this conclusion: a change in the geometry of the plate holes or in the rotor–stator knife profile simultaneously alters throughput, particle size distribution and the water-binding capacity of the ground mass [3, 4]. For meat-and-bone raw materials the effect is even more pronounced, since the clearance between the rotating knives and their rotational speed together determine the yield shear stress and the water-binding capacity of the finely ground product [5].

A promising direction in food engineering is therefore the development of combined machines in which several operations are performed within one working space. For meat processing this makes it possible to convert lump raw material into a finely dispersed mass by the sequential action of the feeding and cutting working bodies, and the design of the cutting mechanism becomes the decisive factor of process efficiency [6]. Interest in such solutions is reinforced by the need for a deeper use of meat co-products, including meat-and-bone raw materials – a valuable but technologically difficult source of protein and minerals [7, 8].

The design of such a unit, however, cannot be reduced to a constructive solution alone: it requires a mathematical description of the behaviour of the raw material under mechanical loading in the zone of cutting, deformation and shear. Meat-and-bone raw materials are heterogeneous systems containing muscle and connective tissue, fat, water, mineral components and bone inclusions, and under mechanical treatment they exhibit elastic, viscous and plastic properties at the same time [9]. Simple empirical dependencies are insufficient here; a rheological model is required that describes deformation both at the preliminary and at the fine grinding stage [10, 11].

Existing approaches to the modelling of the cutting of biological materials are focused mainly on a single cutting act and on the mechanics of blade–material contact [12]; models that describe the sequential passage of the product through two cutting zones of one unit, with a change of the rheological state of the material between them, are practically absent. This determined the direction of the present study.

The purpose of the study is to develop and verify a mathematical model of the fine grinding of meat-and-bone raw materials in a combined grinding unit that predicts yield shear stress and provides a calculation basis for the selection of rational operating parameters of the cutting working bodies.

The tasks were: to justify the choice of a rheological model for meat-and-bone raw material; to describe preliminary and fine grinding by a two-contour mechanical scheme; to derive calculation dependencies for shear rate and for the power of the process; and to assess the adequacy of the model by Fisher’s criterion.

Conditions and methods of the study

The object of the study was the combined grinding process of meat and meat-and-bone raw materials in a unit that joins the stages of preliminary and fine grinding. The subject of the study was the structural and mechanical properties of the material formed during its interaction with the cutting working bodies. Yield shear stress was chosen as the main evaluation parameter, since it characterises the resistance of the minced mass to deformation before flow begins and is directly related to the force on the blade.

The experimental unit includes a screw feeder and a cutting mechanism formed by two successive knife pairs mounted on a common shaft, each pair containing a two-blade knife. In one pass the raw material is therefore treated twice by a knife pair, and the cutting multiplicity is $i = 2 \cdot 2 = 4$. This double cycle, implemented in one machine and from one drive, is what makes the combination of preliminary and fine grinding possible. Beef of the first category at +2…+3 °C was used as raw material; the control scheme was a mincer followed by a separate fine grinding machine.

The modelling procedure assumes that the first stage corresponds to the preliminary destruction of lump material and the second to the fine dispersion of the already disintegrated mass: at the first stage the material retains pronounced viscoelastic properties, at the second it becomes

more plastic and flowable. The Bingham rheological body was therefore used as the basis and supplemented with an element describing the loss of strength of bone inclusions under cutting and shear.

Yield shear stress was determined by the penetration method on a conical plastometer [13]. The cone was immersed into the sample, the immersion depth was read after 180 s, and the yield shear stress of each sample was calculated as

$$\theta_0 = K\, m\, g\, /\, h^2, \quad (1)$$

where K is the constant of the cone (K = 2.1); m is the mass of the cone with all movable parts, kg; g is the acceleration of gravity, m/s^2; h is the depth of cone immersion, m.

Eight experimental runs were performed with three replications in each run; the rotational speed of the knives, the clearance between the knives and the configuration of the cutting elements were varied as factors. The arithmetic mean of the three measurements was taken as the experimental value of the run. Calculated values obtained from the model were compared with the experimental ones, and the adequacy of the model was assessed through the residual variance and the reproducibility variance using Fisher's criterion.

Notation: θ is shear stress, Pa; θ_T is the yield limit under shear, Pa; θ_H is the limit of instantaneous irreversible deformation of bone inclusions, Pa; G is the shear modulus, Pa; η is plastic (shear) viscosity, Pa·s; γ is shear deformation; dγ/dτ is shear rate, s^{-1}; τ is time, s. Subscripts 1 and 2 refer to the preliminary and fine grinding stage.

Results of the study

Rheological scheme of the combined process. The combined grinding process is represented as a sequential deformation of meat-and-bone raw material in two connected zones – the preliminary grinding zone and the fine grinding zone – each characterised by its own elasticity, viscosity and yield limit. The corresponding mechanical scheme is shown in Figure 1.

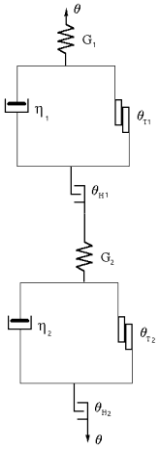


Figure 1 – Mechanical rheological scheme of the combined grinding process of meat-and-bone raw materials

The first contour describes preliminary grinding and includes the parameters G_1, η_1, θ_{T1} and θ_{H1}; the second contour describes fine grinding and includes G_2, η_2, θ_{T2} and θ_{H2}. Such a structure allows the resistance of the material at the stage of initial destruction and its behaviour during subsequent fine dispersion to be considered separately.

The total deformation of meat-and-bone material is treated as the sum of the deformation of the Bingham body and the deformation of the element that represents the behaviour of bone inclusions during grinding:

$$\gamma = \gamma_B + \gamma_H. \quad (2)$$

After differentiation with respect to time the total shear rate is written as the sum of two components:

$$d\gamma/d\tau = d\gamma_B/d\tau + d\gamma_H/d\tau. \quad (3)$$

For the Bingham element the deformation rate is determined by the elastic and the viscoplastic components. When the yield limit is reached the material begins to deform irreversibly, and the shear rate depends on the difference between the applied stress and the threshold stresses.

If $\theta \le \theta_H$, the body follows the Bingham model; if $\theta \ge \theta_H$, the component of instantaneous irreversible deformation of bone inclusions is included in the calculation. For the first contour the shear rate is expressed as

$$d\gamma_1/d\tau = (\theta - \theta_{T1} - \theta_{H1})/\eta_1 + (d\theta/d\tau)/G_1, \quad (4)$$

and for the second contour, analogously,

$$d\gamma_2/d\tau = (\theta - \theta_{T2} - \theta_{H2})/\eta_2 + (d\theta/d\tau)/G_2. \quad (5)$$

Since preliminary and fine grinding are performed consecutively within one unit, the total shear rate is determined by the sum of the contributions of both contours:

$$d\gamma/d\tau = d\gamma_1/d\tau + d\gamma_2/d\tau, \quad (6)$$

which, with account of expressions (4) and (5), gives

$$d\gamma/d\tau = (\theta - \theta_{T1} - \theta_{H1})/\eta_1 + (\theta - \theta_{T2} - \theta_{H2})/\eta_2 + (d\theta/d\tau)(1/G_1 + 1/G_2). \quad (7)$$

Introducing the equivalent (reduced) characteristics of the two-contour model

$$1/\eta_e = 1/\eta_1 + 1/\eta_2; \quad 1/G_e = 1/G_1 + 1/G_2, \quad (8)$$

and the equivalent limit of deformation

$$\theta_e = \eta_e [(\theta_{T1} + \theta_{H1})/\eta_1 + (\theta_{T2} + \theta_{H2})/\eta_2], \quad (9)$$

the rheological equation of the combined grinding process takes the compact form

$$d\gamma/d\tau = (\theta - \theta_e)/\eta_e + (d\theta/d\tau)/G_e. \quad (10)$$

Equation (10) is formally identical with the equation of a single Bingham body, but its coefficients are determined by the parameters of both stages: unlike a single-stage description, the change of the rheological state of the material between the two cutting zones is retained in the equivalent characteristics and is not averaged out.

Coupling with the kinematics of the cutting mechanism. To pass from the rheological description to design parameters, the model was linked to the kinematics of the cutting mechanism. The cutting speed is determined by the angular velocity and the radius of the cutting body,

$$v = \omega R = 2\pi n R, \quad (11)$$

where n is the rotational frequency of the knives, s^{-1}, and R is the radius of the cutting body, m. The force required to destroy the raw material in the cutting zone is $F = \theta_0 S$, the work of cutting is $A = Fl$, and the power of the process, $N = A/t$, after substitution takes the form

$$N = \theta_0 S v = 2\pi \theta_0 S n R, \quad (12)$$

where S is the area of the cut surface, m^2. Expression (12) directly connects the rheological characteristic of the product, obtained from equation (10), with the design and operating parameters of the cutting mechanism, which makes the model usable for engineering calculation.

Verification of the model. Model verification was based on experimental values of yield shear stress. Eight experimental runs were performed with three measurements in each; the results are presented in Table 1.

Table 1 – Experimental values of yield shear stress, Pa

Run	θ_1	θ_2	θ_3	θavg
1	706.12	705.04	703.10	704.75
2	741.40	740.54	745.32	742.42
3	669.50	664.90	665.76	666.72
4	638.90	636.54	632.18	635.87
5	743.70	742.42	745.34	743.82
6	782.21	783.38	778.10	781.23
7	709.68	710.60	713.50	711.26
8	679.15	677.30	674.30	676.92

The experimental values ranged from 635.87 Pa (run 4) to 781.23 Pa (run 6), which confirms that the structural and mechanical properties of the minced mass are sensitive to the conditions of mechanical treatment. The spread between repeated measurements within one run did not exceed 1.1 % of the mean, which indicates satisfactory reproducibility.

The calculated values of yield shear stress obtained from the model are given in Table 2.

Table 2 – Calculated values of yield shear stress, Pa

Run	1	2	3	4	5	6	7	8
θcalc	704.755	742.439	666.739	635.905	743.824	781.247	711.290	676.982

Comparison of calculated and experimental values shows close agreement for all runs: the deviation does not exceed 0.01 % and does not change the general trend of yield shear stress variation. The residual variance was determined as

$$S_0^2 = m \, \Sigma \, (\theta_{calc,i} - \theta_{avg,i})^2 / (Z_k - 1), \quad (13)$$

and the reproducibility variance as

$$S_{rep}^2 = \Sigma \, S_i^2 / (Z_k - 1). \quad (14)$$

where m is the number of parallel measurements; Z_k is the number of runs entering the corresponding estimate; S_i^2 is the sample variance of the i-th run. The degrees of freedom of the residual and the reproducibility variance were $f_1 = 3$ and $f_2 = 4$.

The obtained values were $S_0^2 = 275.058$ and $S_{rep}^2 = 943.141$. Fisher's criterion was calculated as the ratio

$$Fi = S_0^2 / S_{rep}^2. \quad (15)$$

The calculated value $Fi = 0.29164$ is lower than the tabulated value $F_{tab} = 1.02$ at $f_1 = 3$, $f_2 = 4$ and $\alpha = 0.1$, hence the proposed model is adequate to the experimental data.

Discussion of scientific results

The practical relevance of the model is confirmed by the technological indicators of the combined unit obtained at the rational rotational speed of the cutting bodies n = 16.7 s^{-1} (1000 min^{-1}). The comparison with the control scheme, in which the same volume of raw material was processed first in a mincer and then in a separate fine grinding machine, is given in Table 3.

Table 3 – Comparison of the combined unit with the control grinding scheme

Indicator	Control scheme	Combined unit	Change
Productivity, kg/h	96.3	151.3	+57.1 %
Power consumed, kW	3.00	3.35	+11.7 %
Specific energy consumption, kW·h/t	31.15	22.14	−28.9 %
Specific productivity, kg/(h·kW)	32.10	45.16	+40.7 %
Share of 100-150 μm particles, %	36	68	+32 p.p.
Raw material temperature before grinding, °C	+2…+3	+2…+3	-

The data of Table 3 show that the combination of the two grinding stages in one working process improves the dispersion quality and increases the productivity of the equipment without a proportional growth of the installed power: the power consumed rises by 11.7%, whereas the productivity rises by 57.1%, so that the specific energy consumption decreases by 28.9%.

The calculation of particle size from the cutting multiplicity of the mechanism ($i = 4$) gives 141 μm, which lies inside the experimentally established range of 100-150 μm where 68% of the particles of the finely ground mass are concentrated. Together with the agreement of the calculated and experimental yield shear stress, this indicates that expressions (10) and (12) may be used for the selection of design parameters of the cutting mechanism and not only for the interpretation of the experiment.

The results are consistent with the data of other authors. It has been shown earlier that for finely ground chicken bone the yield shear stress and the water-binding capacity depend jointly on the speed of the knives and the clearance between them [5]; the two-contour model explains this, since both factors enter the equivalent characteristics (8) and (9). The improvement of the granulometric composition obtained here is of the same order as that reported for modified plates with variable hole diameters and for modified rotor–stator knives of a colloid mill [3, 4, 14], which indicates that the effect is produced by the geometry and the multiplicity of cutting rather than by an increase of the rotational speed alone. This is important in practice, because an increase of the rotational speed is the simplest but the least favourable way of intensification: it raises the energy consumption and the temperature of the product, and above a certain speed the heating of the mass leads to protein denaturation [4].

From the engineering point of view it is essential that the model accounts not only for the viscoplastic behaviour of the meat raw material but also for bone inclusions, which lose strength under cutting and shear. The threshold θ_H introduced into each contour is what distinguishes meat-and-bone raw material from a homogeneous minced system, and its omission underestimates the resistance of the material in the first cutting zone.

The model does not replace the experimental adjustment of equipment, but it reduces the volume of preliminary trials and supports the transition from an empirical selection of processing modes to a calculation-based justification. Its main limitation is that the raw material temperature was kept at +2…+3 °C and the temperature dependence of the rheological parameters is not included in equations (8)-(10), although the thermal state of minced meat is known to change its behaviour considerably [15]. Further development may therefore introduce temperature, knife configuration and inter-knife clearance as explicit arguments of the equivalent characteristics.

Conclusion

A mathematical model of the fine grinding of meat-and-bone raw materials has been developed on the basis of the Bingham rheological body adapted to combined preliminary and fine grinding; it accounts for the elastic, viscous and plastic properties of the material and for the limit of instantaneous irreversible deformation of bone inclusions.

The process is represented as two series-connected contours describing, respectively, the preliminary grinding of lump raw material and the fine grinding of the pre-disintegrated mass. Summation of the contour shear rates and the introduction of equivalent (reduced) characteristics give the compact rheological equation (10), which retains the change of state of the material between the two cutting zones; its coupling with the kinematics of the cutting mechanism yields the calculation dependence (12) for the power of the process.

The adequacy of the model was confirmed by comparing calculated and experimental values of yield shear stress: the calculated Fisher criterion Fi = 0.29164 is lower than the tabulated value Ftab = 1.02 at f1 = 3, f2 = 4 and α = 0.1, and the deviation of the calculated values from the experimental ones does not exceed 0.01 %.

At the rational rotational speed of 16.7 s^{-1} the combined unit provided 151.3 kg/h against 96.3 kg/h for the control scheme, 68 % of particles within the 100–150 μm range against 36 %, and a decrease of the specific energy consumption from 31.15 to 22.14 kW·h/t. The model may therefore be used in the design and optimisation of the cutting working bodies of combined grinding units.

References

1. Rogov I.A. Obshchaya tekhnologiya myasa i myasoproduktov [General technology of meat and meat products]: textbook / I.A. Rogov, A.G. Zabashta, G.P. Kazyulin. – Moscow: Kolos, 2000. – 367 p. (in Russian).
2. A review on the relation between grinding process and quality of ground meat / L.M. Berger et al // Meat Science. – 2023. – Vol. 205. – Art. 109320. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2023.109320.
3. Development of the design of plate with variable diameters of holes and its impact on meat-grinding quality and efficiency / A. Bakiyeva et al // Processes. – 2024. – Vol. 12, № 9. – Art. 1808. https://doi.org/10.3390/pr12091808.
4. Development and evaluation of modified rotor–stator knives for enhanced fine grinding of chicken meat–bone raw material in colloid mill / Z. Yessimbekov et al // Applied Sciences. – 2025. – Vol. 15, № 13. – Art. 7106. https://doi.org/10.3390/app15137106.
5. Effect of rotational speed and gap between rotating knives of the grinder on the yield stress and water-binding capacity of fine ground chicken bone / G. Bekeshova et al // Applied Sciences. – 2022. – Vol. 12, № 7. – Art. 3533. https://doi.org/10.3390/app12073533.
6. Grudanov V.Ya. Primenenie teorii chisel v konstruirovanii rezhushchikh mekhanizmov mashin dlya izmelcheniya myasnogo syrya [Application of number theory in the design of cutting mechanisms of machines for grinding meat raw materials] / V.Ya. Grudanov, A.A. Brench, L.T. Tkacheva // Aktualnye voprosy pererabotki myasnogo i molochnogo syrya. – 2021. – № 11. – P. 144-154. (in Russian).
7. Opportunities and perspectives for utilisation of co-products in the meat industry / S.A. Lynch et al // Meat Science. – 2018. – Vol. 144. – P. 62-73. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.06.019.

8. Optimising the use of proteins from rich meat co-products and non-meat alternatives: nutritional, technological and allergenicity challenges / C. Anzani et al // Food Research International. – 2020. – Vol. 137. – Art. 109575. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109575.
9. Gorbatov A.V. Reologiya myasnykh i molochnykh produktov [Rheology of meat and dairy products] / A.V. Gorbatov. – Moscow: Pishchevaya promyshlennost, 1979. – 384 p. (in Russian).
10. Martínez-Padilla L.P. Rheology of liquid foods under shear flow conditions: recently used models / L.P. Martínez-Padilla // Journal of Texture Studies. – 2024. – Vol. 55, № 1. – Art. e12802. https://doi.org/10.1111/jtxs.12802.
11. Reologiya: textbook / E.V. Zakipnaya et al. – Blagoveshchensk: Far Eastern State Agrarian University Publishing House, 2015. – 108 p. (in Russian).
12. Takabi B. A review of cutting mechanics and modeling techniques for biological materials / B. Takabi, B.L. Tai // Medical Engineering & Physics. – 2017. – Vol. 45. – P. 1-14. https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2017.04.004.
13. Antipova L.V. Metody issledovaniya myasa i myasnykh produktov [Methods for studying meat and meat products]: textbook / L.V. Antipova, I.A. Glotova, I.A. Rogov. – Moscow: Kolos, 2001. – 376 p. (in Russian).
14. Developing new type of disk plate for meat chopper and its effect to water-binding capacity and yield stress of minced meat / A. Bakieva et al // International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development. – 2019. – Vol. 9, № 6. – P. 377-390.
15. Thermal image processing technique for determination of temperature distributions of minced beef thawed by ohmic and conventional methods / D. Döner et al // Food and Bioprocess Technology. – 2020. – Vol. 13, № 11. – P. 1878-1892. https://doi.org/10.1007/s11947-020-02530-w.

Г.Б. Бекешова[1]*, Н.К. Ибрагимов[2], Б.А. Лобасенко[3]
[1]Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева,
010008, Республика Казахстан, г. Астана, ул. К. Сатпаева, 2
[2]Шәкәрім университет, 071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А
[3]Кемеровский государственный университет,
650000, Российская Федерация, г. Кемерово, ул. Красная, 6
*e-mail: gulvirabauyrzhanovna@gmail.com

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТОНКОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ МЯСОКОСТНОГО СЫРЬЯ

В статье представлена математическая модель процесса тонкого измельчения мясокостного сырья в комбинированной установке, в которой стадии мелкого и тонкого измельчения выполняются последовательно в одном рабочем пространстве и от одного привода. Модель построена на основе реологического тела Бингама, дополненного элементом, описывающим мгновенно-необратимую деформацию костных включений, и представлена в виде двух последовательно соединённых контуров, каждый из которых характеризуется собственными модулем упругости при сдвиге, пластической вязкостью, пределом текучести и пределом мгновенно-необратимой деформации. Суммирование скоростей сдвига по контурам приводит к компактному уравнению с эквивалентными (приведёнными) характеристиками, которое связывается с кинематикой режущего механизма, что позволяет выразить мощность процесса через предельное напряжение сдвига, площадь резания, радиус и частоту вращения ножей. Адекватность проверена по значениям предельного напряжения сдвига, определённым методом пенетрации в восьми опытах с трёхкратной повторностью: расчётный критерий Фишера Fi = 0,29164 меньше табличного Fтаб = 1,02 при f1 = 3, f2 = 4, α = 0,1. При рациональной частоте вращения ножей 16,7 с⁻¹ производительность установки составила 151,3 кг/ч против 96,3 кг/ч, доля частиц 100-150 мкм – 68% против 36%, удельные энергозатраты снизились с 31,15 до 22,14 кВт·ч/т.

Ключевые слова: *мясокостное сырьё; тонкое измельчение; комбинированная установка; реологическая модель; тело Бингама; предельное напряжение сдвига; режущие рабочие органы; критерий Фишера.*

Г.Б. Бекешова[1]*, Н.К. Ибрагимов[2], Б.А. Лобасенко[3]
[1]Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
010008, Қазақстан Республикасы, Астана қ., Қ. Сәтбаев көшесі, 2
[2]Шәкәрім университеті, 071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинка көшесі, 20 А
[3]Кемерово мемлекеттік университеті, 650000, Ресей Федерациясы, Кемерово қ., Красная көшесі, 6
*e-mail: gulvirabauyrzhanovna@gmail.com

ЕТ-СҮЙЕКТІ ШИКІЗАТТЫ ЖҰҚА МАЙДАЛАУ ПРОЦЕСІН МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛЬДЕУ

Мақалада ұсақ және жұқа майдалау сатылары бір жұмыс кеңістігінде әрі бір жетектен дәйекті түрде орындалатын құрама қондырғыда ет-сүйекті шикізатты жұқа майдалау процесінің математикалық моделі ұсынылған. Модель Бингамның реологиялық денесі негізінде құрылған, сүйек қосындыларының лездік қайтымсыз деформациясын сипаттайтын элементпен толықтырылған және дәйекті жалғанған екі контур түрінде берілген; әрбір контур ығысу кезіндегі серпімділік модулімен, пластикалық тұтқырлығымен, аққыштық шегімен және лездік қайтымсыз деформация шегімен сипатталады. Контурлар бойынша ығысу жылдамдықтарын қосу эквивалентті (келтірілген) сипаттамалары бар ықшам теңдеуге әкеледі; бұл теңдеу кескіш механизмнің кинематикасымен байланыстырылып, процесс қуатын шекті ығысу кернеуі, кесу ауданы, пышақтардың радиусы мен айналу жиілігі арқылы өрнектеуге мүмкіндік береді. Модельдің сәйкестігі пенетрация әдісімен үш мәрте қайталанған сегіз тәжірибеде тексерілді: есептік Фишер критерийі Fi = 0,29164 кестелік Fкест = 1,02 мәнінен төмен (f1 = 3, f2 = 4, α = 0,1). Пышақтардың 16,7 $с^{-1}$ ұтымды айналу жиілігінде қондырғының өнімділігі 151,3 кг/сағ болды (бақылауда – 96,3 кг/сағ), 100-150 мкм бөлшектердің үлесі 36 %-ға қарсы 68 % құрады, меншікті энергия шығыны 31,15-тен 22,14 кВт·сағ/т-ға дейін төмендеді.

Түйін сөздер: *ет-сүйекті шикізат; жұқа майдалау; құрама қондырғы; реологиялық модель; Бингам денесі; шекті ығысу кернеуі; кескіш жұмыс органдары; Фишер критерийі.*

Information about the authors

Gulvira Bauyrzhanovna Bekeshova* – Master of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Information Security, Faculty of Information Technologies, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; e-mail: gulvirabauyrzhanovna@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1635-4693.

Nadir Kadyrovich Ibragimov – Candidate of Technical Sciences, Shakarim University, Semey, Kazakhstan; e-mail: ibragimnk@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9607-823X.

Boris Anatolyevich Lobasenko – Doctor of Technical Sciences, Professor, Kemerovo State University, Kemerovo, Russian Federation; e-mail: tppp@kemsu.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0245-7904.

Сведения об авторах

Гульвира Бауыржановна Бекешова* – магистр технических наук, старший преподаватель кафедры информационной безопасности факультета информационных технологий Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан; e-mail: gulvirabauyrzhanovna@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1635-4693.

Надир Кадырович Ибрагимов – кандидат технических наук, Шәкәрім университет, Семей, Казахстан; e-mail: ibragimnk@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9607-823X.

Борис Анатольевич Лобасенко – доктор технических наук, профессор, Кемеровский государственный университет, Кемерово, Российская Федерация; e-mail: tppp@kemsu.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0245-7904.

Авторлар туралы мәліметтер

Гульвира Бауыржановна Бекешова* – техника ғылымдарының магистрі, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті Ақпараттық технологиялар факультеті Ақпараттық қауіпсіздік кафедрасының аға оқытушысы, Астана қ., Қазақстан; e-mail: gulvirabauyrzhanovna@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1635-4693.

Надир Кадырович Ибрагимов – техника ғылымдарының кандидаты, Шәкәрім университеті, Семей қ., Қазақстан; e-mail: ibragimnk@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9607-823X.

Борис Анатольевич Лобасенко – техника ғылымдарының докторы, профессор, Кемерово мемлекеттік университеті, Кемерово қ., Ресей Федерациясы; e-mail: tppp@kemsu.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0245-7904.

Received 20.06.2026
Revised 04.09.2026
Accepted 09.09.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-60

IRSTI: 65.59.29

K.A. Urazbayeva, E.A. Gabrilyants*, R.S. Alibekov, M.K. Kassymova, G.A. Kassymbekova
M. Auezov South Kazakhstan University,
160012, Republic of Kazakhstan, Shymkent, Tauke Khan Avenue, 5
*e-mail: gabrilyants@mail.ru

EVALUATION OF MEAT SEMI-FINISHED PRODUCTS ENRICHED WITH LENTIL FLOUR

Abstract: *Nowadays, global urbanization and limitations in the nourishment have influence for unbalanced diet and chronic diseases. Deep processing of the secondary meat raw materials by fortification of essential compounds and inorganic elements allows for the development of new technologies of functional food products with a reduced cost value. The work purpose was a study of new chopped semi-finished products (cutlets) fortified by lentil flour in amount from 10% until 50% of total weight. For the reaching of it, following tasks were discussed: creation of technology, sensory assessment, analysis of organoleptic and physicochemical characteristics, and identifying of the macro- and microelements contents by using the scanning electron microscope and inductively coupled plasma mass spectrometer. Next meat byproducts: tongue, kidneys, heart, tripe of beef carcasses were used as secondary raw materials. Also, a domestic plant crop Lentil (Lens culinaris) was added. According to the organoleptic and sensory indicators, as the best sample containing 70% of meat secondary raw materials and 30% of lentil flour was selected. Also, it was discovered that addition of lentil flour to the recipe improves the nutritional value of cutlets by increasing content of proteins, carbohydrates, and minerals. The presence of macro- and microelements content was identified by the Mass-spectrometry method and using the Scanning Electron Microscope. It was found that protein content ranged from 17.95±1.15 to 20.93±1.25 g/100 g compared to control sample of 17.07±0.72 g/100 g. The carbohydrate content was 3.64±0.33 to 7.91±0.72 g/100 g compared to control sample of 3.09±0.30g/100 g. The studied samples have mineral components such as sodium (16.68-23.45 %), magnesium (0.89-2.15%), phosphorus (5.09-9.48%), potassium (8.14-13.50%), and calcium (0.75-2.25%). The developed semi-finished meat product fortified by lentil flour can be offered as a functional food product enriched by proteins, minerals, and vitamins.*

Key words: *Cutlets, Fortification, Functional food, Lentil, Meat, Byproduct.*

Introduction. Meat and meat by-products remain a key source of complete, easily digestible protein, iron, essential amino acids and micronutrients in the human diet [1]. However, the growing global demand for affordable meat products, together with the need to improve their nutritional value, has intensified interest in fortifying meat formulations with functional plant-based ingredients [2, 3, 4]. Beef by-products (tongue, kidneys, heart, tripe) represent an underutilized but valuable raw material. They are rich in proteins, lipids, biologically active peptides and micronutrients. Their rational use has both nutritional and economic-ecological significance for the meat processing sector, since increased utilization reduces raw material loss and processing waste [5, 6, 7].

Chopped semi-finished products (cutlets) based on beef by-products are a promising format for introducing plant-based functional additives, as their minced structure allows for even distribution of a fortifying component and modification of the finished product's texture and stability [8, 9]. Among domestic legume crops suitable for this purpose, lentil (Lens culinaris) is of particular interest. Lentil flour is characterized by a high protein content (up 36%, including a full essential amino acid complex) and a substantial proportion of starch and dietary fiber, combined with a low fat content [10,11]. In minced meat systems, these components are technologically significant. Lentil protein and starch contribute to water- and fat-binding capacity, improving cutlet juiciness and structural stability during heat treatment, while dietary fiber affects moisture retention and yield. This combination makes lentil flour a suitable functional additive for partial substitution of meat raw material in chopped semi-finished products, potentially compensating for the lower protein and higher connective-tissue content typical of by-product-based mince.

Lentil flour was chosen because of its technological suitability for processing offal-based minced meat, which is characterised by a high moisture content and reduced ability to form a structure

©K.A. Urazbayeva, E.A. Gabrilyants, R.S. Alibekov, M.K. Kassymova, G.A. Kassymbekova, 2026

compared with muscle meat. Lentil flour possesses solubility, gelling, emulsifying, and foaming properties, which have made it a promising ingredient for enriching meat, dairy, and bakery products [12]. Compared with proteins from other pulses, lentil protein exhibits gelling and emulsifying properties comparable to those of pea and soya proteins, as well as superior foaming ability, which contributes to its use in formulations for emulsion-type meat products [13].

The study aimed to develop formulations of chopped semi-finished products from beef by-products with the addition of lentil flour and to evaluate their organoleptic, physicochemical, and mineral characteristics.

2. Materials and methods

Chopped semi-finished products preparation. The technology for producing chopped semi-finished products was developed based on Patent № 37642, 'Method for the production of minced semi-finished products'[14].

The main ingredients used in the production of minced semi-finished products were beef offal (tongue, kidneys, heart, and tripe), lentils, fresh onions, breadcrumbs and spices, sourced from local suppliers in Shymkent, Kazakhstan. Table salt was sourced, and liquid egg melange was used in accordance with the requirements of GOST 30363-2013.

The lentils were purchased at a local market in Shymkent, Kazakhstan. Lentil flour was produced in the laboratory by grinding the seeds to a powdery consistency with a particle size of no more than 250 μm. Before being added to the recipe, the lentil flour was pre-hydrated in a flour:water ratio of 1:3.

Beef offal was thoroughly washed, soaked in salted water for 12 hours, and then partially frozen at a temperature of −16 to −18 °C for 1.5-2 hours before mincing. The frozen raw materials were initially minced using a mincer with a grid aperture diameter of 2-3 mm, followed by further fine mincing to a particle size of 300-500 μm. Onions were peeled, washed and minced using a mincer with a screen aperture diameter of 2-3 mm. The minced offal, hydrated lentil flour, chopped onion, egg mixture (1.6-1.8%), salt (1.0-1.2%), spices, and breadcrumbs (7.0-7.5%) were mixed in a mincer for 3-5 minutes until a homogeneous mass was obtained. Flat oval patties weighing 50 ± 5 g and 1.5-2 cm thick were formed by hand from the resulting mixture. Before packaging, the semi-finished products were coated in breadcrumbs and frozen at a temperature of −16 to −18°C.

Six recipes were prepared to assess the optimal level of substitution of meat offal with lentil flour. The ratio of beef offal to hydrated lentil flour varied, whilst the quantities of onion, egg mixture, salt, spices, and breadcrumbs remained constant across all recipes. The experimental design was as follows:

Sample 1 (Control) – cutlets without additives, containing 100% beef by-products.
Sample 2 – 90:10, cutlets containing 90% beef by-products and 10% lentil flour.
Sample 3 – 80:20, cutlets containing 80% beef by-products and 20% lentil flour.
Sample 4 – 70:30, cutlets containing 70% beef by-products and 30% lentil flour.
Sample 5 – 60:40, cutlets containing 60% beef by-products and 40% lentil flour.
Sample 6 – 50:50, cutlets containing 50% beef by-products and 50% lentil flour.

Sensory assessment. Sensory assessment of chopped semi-finished products with additive of Lentil was a process used to evaluate and measure the sensory characteristics. It involves engaging the human senses, such as taste, smell, sight, touch, and sometimes hearing, to gather subjective data about the perceived attributes of a particular item. One of the methods of determining sensory assessment is a point test. Participants rate the products on a scale ranging from like extremely to dislike extremely, indicating their preference or acceptance of the sensory attributes. Appearance, color, smell, and taste were evaluated using a five-point scale (Alibekov et al., 2021). This universal system of assessment uses these four categories to determine the overall quality of the product. Each rating corresponds to a whole number from 1 to 5, where 5 represents the highest quality (80-100%) and 1 represents very low quality or unacceptability (0-20%).The color of the diced semi-finished products was assessed to ensure the absence of undesired shades and to match the color of a reference sample. When evaluating taste and smell, significant emphasis was placed on the cleanliness of the scent, the absence of any foreign tastes or odors, and the distinctness of the flavor. The consistency was determined by filling the samples into a test glass.

Organoleptic characteristics. Organoleptic quality assessment was carried out on a five-point scale. The tasting was conducted by a tasting commission that included teaching staff and students of the training and research laboratory. The organoleptic evaluation was carried out by taster

specialists, a total of 11 people with experience in assessing the quality of meat products, as part of the tasting commission. Organoleptic characteristics consist of the following parameters: appearance, color, taste, and smell, which, in accordance with GOST 32951-2014 were analyzed. The appearance, color, and condition of the surface of chopped semi – finished (cutlets) with the addition of Lentil flour are determined visually by external inspection; smell – on the surface of the product. If it is necessary to determine the odor in the depth of the product, take a special wooden or metal needle, insert it into the thickness, then quickly extract and determine the odor remaining on the surface of the needle; consistency - by pressing with a spatula or fingers.

Physicochemical characteristics. Physicochemical parameters of chopped semi – finished (cutlets) – proteins, fats, carbohydrates, moisture, ash, were identified in accordance with the GOST 32951-2014 – Semi-prepared meat and meat-containing product.(General technical conditions).

The mass fraction of protein was determined using the Kjeldahl method in accordance with GOST 25011-81 ‘Meat and meat products'. Methods for the determination of protein.

The mass fraction of fat was determined using the Soxhlet method in accordance with GOST 23042-2015 ‘Meat and meat products'. Methods for the determination of fat.

The moisture content was determined by drying in an oven at a temperature of (103±2)°C in accordance with GOST 9793-2016 ‘Meat and meat products'. Methods for the determination of moisture.

The mass fraction of total ash was determined in accordance with GOST 31727-2012 ‘Meat and meat products'. Method for determining the mass fraction of total ash.

The carbohydrate content was calculated ‘by difference’ as the remainder of 100 per cent after subtracting the mass fractions of protein, fat, moisture and ash, determined by the methods specified above:

Carbohydrates (%) = 100 − (protein % + fat % + moisture % + ash %).

Statistical data were treated using Microsoft Excel. All experiments were repeated three times. Data are presented as an average value ± a standard deviation of the value.

Mineral contents of minced semi-finished products (cutlets) enriched with lentil flour were determined using inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS), whilst scanning electron microscopy (SEM) was used to assess the microstructure of the samples and visualise the distribution of mineral-containing particles.

Sample preparation for mineral analysis was carried out in accordance with GOST 26929-94. The samples were pre-dried, mineralised (oxidised), and prepared for instrumental analysis. The quantitative determination of macro- and trace elements was carried out using ICP-MS, which allows for the sensitive and accurate determination of trace elements in foodstuffs (Thompson and Walsh, 1988).

Results and discussion. The study revealed that the quantitative content of the additive has a significant impact on the organoleptic characteristics of the food product and on the sensory assessment of its quality.

Based on Figure 1, cutlets from offal containing 30% addition of lentil flour have the best results in points. The sample containing 40 and 50% lentil flour stood out with a pronounced smell and an unpresentable appearance that can negatively affect the consumer properties of the finished product.

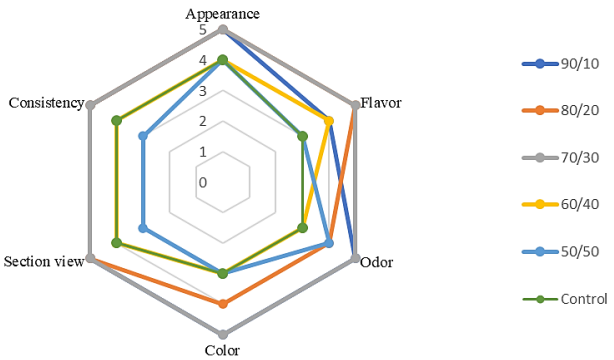


Figure 1 – Sensory assessment of meat chopped semi – finished product – cutlet fortified by Lentil

Table 1 showed the organoleptic parameters of the samples obtained, which were compared with GOST 32951-2014 Meat and meat-containing semi-finished products. General technical conditions. Appearance, odor, color, section view, and consistency of the chopped semi-finished product (cutlets) with lentil addition completely satisfy the required standards.

Table 1 – Organoleptic characteristics of chopped semi - finished (cutlets) products

The name of the indicator	Control Sample without additives	Sample with Lentil	GOST 32951-2014
Appearance (shape, surface condition):	Crushed homogeneous mass without bones, cartilage, evenly mixed, rounded shape		The crushed homogeneous mass was thoroughly blended, ensuring the absence of bones, cartilage, tendons, coarse connective tissue, blood clots, and films, achieving a uniform mixture.
Odor	The smell is pleasant, characterized of this type of product, odorless		characterized of this name of the semi-finished product, considering the prescription components used, including spices, sauces, marinades, and breading provided by the recipe
Color	Characterized of this semi-finished product		characterized by the color of the raw materials used: lump meat, poultry offal, and other prescription components
Section view	Mix the minced meat well, the mass is homogeneous	Minced meat is well mixed, mass is homogeneous, with the addition of lentil flour	Crushed, homogeneous mass
Consistency	Dense, gentle	Dense, gentle	Dense, gentle

Physicochemical characteristics According to the developed model recipes, the content of the main nutrients was investigated. The study results are shown in Table 2.

Table 2 – Physicochemical characteristics of chopped semi - finished (cutlets)

Name of indicators g/100g	Control, without any additives	Sample %, 90:10	Sample %, 80:20	Sample %, 70:30	Sample %, 60:40	Sample %, 50:50
Proteins	17.07±0.72	17.95±1.15	18.16±0.85	18.93±1.13	19.78±1.23	20.93±1.25
Fats	15.9±0.78	15.4±0.86	14.86±0.87	14.7±0.83	13.8±0.870	13.8±0.70
Carbohydrates	3.09±0.30	3.64±0.33	5.40±0.31	5.81±0.45	7.77±0.39	7.91±0.72
Moisture	61.04±3.05	60.11±2.35	59.78±2.99	58.46±2.92	56.55±2.85	55.36±2.44
Ash	2.9±0.14	2.9±0.14	1.,8±0.09	2.1±0.10	2.1±0.12	2.0±0.11

According to the results presented in Table 2, the physicochemical composition of the cutlets changed with increasing proportions of the additive. The protein content gradually increased from 17.07±0.72 g/100 g in the control sample to 20.93±1.25 g/100 g in the 50:50 sample. At the same time, the fat content decreased slightly from 15.9±0.78 to 13.8±0.70 g/100 g.

The carbohydrate content ranged from 3.09±0.30 g/100 g in the control sample to 7.91±0.72 g/100 g in the 50:50 sample. The moisture content gradually decreased from 61.04 ± 3.05 to 55.36 ± 2.44 g/100 g as the proportion of additives increased. The ash content varied within relatively narrow limits – 1.8-2.9 g/100 g.

Intermediate values were observed for the 60:40 and 70:30 samples, with protein contents of 19.78±1.23 and 18.93±1.13 g/100 g, fat contents of 13.8±0.87 and 14.7±0.83 g/100 g, and carbohydrates of 7.77±0.39 and 5.81±0.45 g/100 g, respectively. The moisture content was 56.55±2.85 and 58.46±2.92 g/100 g, and the ash content was 2.1±0.12 and 2.1±0.10 g/100 g, respectively.

The compositions of macro- and microelements of the investigated chopped semi-finished (cutlets) with the addition of lentil samples are presented in the following data.

Table 3 – Mineral composition of investigated chopped semi – finished products (cutlets)

Name of element	Samples, mass fraction, %						
	Traditional beef origin	Control, without any additives	№ 1 50:50	№ 2 80:20	№ 3 70:30	№ 4 60:40	№ 5 90:10
O	20,92	27,41	32,68	30,50	31,00	31,70	28,99
Na	23,45	20,89	18,92	18,97	18,06	16,68	20,11
Mg	0,89	1,49	2,12	2,15	1,79	1,88	1,75
Si	-	-	0,32	0,31	-	0,32	-
P	5,09	8,13	9,48	9,41	8,78	8,03	8,13
S	0,33	-	0,39	0,36	0,36	0,57	-
Cl	37,79	27,01	21,02	22,46	20,77	20,43	28,46
K	10,80	8,14	12,90	10,56	11,28	13,50	10,79
Ca	0,75	1,80	2,17	2,25	2,10	1,90	1,77
C	-	4,70	-	3,04	5,86	4,66	-
Fe	-	0,43	-	-	-	0,33	-

According to the results presented in Table 3, the addition of lentil flour affected the mineral composition of the minced semi-finished products. Compared with the control sample, the formulations containing lentil flour generally exhibited higher levels of potassium (K), calcium (Ca), magnesium (Mg) and phosphorus (P). These changes may be linked to the mineral composition of lentils, which are recognised as an important source of essential minerals [10,11].

The magnesium content increased from 1.49% in the control sample to a range of 1.75-2.15% across the lentil-fortified samples, with the highest values observed in the 50:50 and 80:20 samples (2.12% and 2.15%, respectively). Magnesium is involved in many physiological processes, including enzyme activity, energy metabolism, and the maintenance of neuromuscular functions [15].

The phosphorus content reached 9.48% and 9.41% in the 50:50 and 80:20 samples, respectively, whilst lower values (8.13%) were observed in the control sample. The calcium content in the experimental samples also increased compared with traditional beef cutlets and the control sample. Calcium plays an important role in bone metabolism, muscle contraction and physiological regulatory processes [16].

Potassium levels in the lentil-enriched samples were generally higher than in the control sample. Potassium is one of the main intracellular minerals involved in maintaining electrolyte balance and cardiovascular function [16].

The comparative analysis of the macro- and microelements contents of the samples indicated that the addition of lentil flour to the minced meat from offal modifies a structure of the finished cutlets. More uniform structure is observed for the cutlets with the addition of lentil flour in a ratio of 70:30 which was confirmed by organoleptic assessments of ready-made cutlets made from beef tongue, kidneys, heart, and meat tripe with the addition of lentil flour.

In terms of taste, these cutlets are not inferior to traditional ones; they have available low-cost value for the nutrition of various categories of the population. Frozen semi-finished products can be stored in the freezer at the temperature minus T= -18°C within 3 months by saving of the organoleptic properties and technological properties, in addition, semi-finished products are easily defrosted and convenient for preparation.

Conclusions. Based on the presented data, chopped semi-finished products (cutlets) from secondary raw materials by using lentil flour in an amount from 10% to 50% of the total weight allows to increase in the nutritional value of the food products by increasing the content of protein, carbohydrates, and minerals. All samples were evaluated considering their physico-chemical, organoleptic, and sensory characteristics. The sample of a semi-finished product from secondary raw materials and lentils in a ratio of 70/30 fully complied with the requirements of GOST 32951-2014 "Semi-prepared meat and meat-contained product. General technical conditions" and can be successfully produced in the field of public catering, it was found that the protein content in the developed products ranged from 17.95±1.15 to 20.93±1.25 g/100 g compared with the control sample of 17.07±0.72 g/100 g. The carbohydrate content ranged from 3.64±0.33 to 7.91±0.72 g/100 g, compared to the control sample of 3.09±0.30 g/100 g. According to the study, chopped semi-finished products using lentils contained mineral components such as sodium (16.68-23.45%), magnesium (0.89-2.15%), phosphorus (5.09-9.48%), potassium (8.14-13.50%), and calcium (0.75-

2.25%). Thus, the use of secondary raw materials and lentils allows for the obtaining of food products for healthy nutrition of various population groups that are not inferior in quality to traditional meat products, save the primary muscle meat raw material, and increase the nutritional value of the finished product. Allowing the expansion of the range of semi-finished products in the production of food products with a specific pleasant taste.

References

1. Pereira P.M.D.C.C. Meat nutritional composition and nutritive role in the human diet / P.M.D.C.C. Pereira, A.F.D.R.B. Vicente // Meat science. – 2013. – № 93(3). – P. 586-592. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2012.09.018.
2. Development of halal cooked smoked beef and turkey sausage using a combined plant extract / Z.S. Zheleuova et al // Journal of Food Processing and Preservation. – 2021. – № 45(1). – P. e15028. https://doi.org/10.1111/jfpp.15028.
3. Issledovanie novykh rublenykh polufabrikatov iz subproduktov / R.S. Alibekov et al // Vestnik universiteta Shakarima. Tekhnicheskie nauki. – 2024. – № 2(14). – P. 105. https://doi.org/10.53360/2788-7995-2024-2(14)-14.
4. Olmedilla-Alonso B. Development and assessment of healthy properties of meat and meat products designed as functional foods / B. Olmedilla-Alonso, F. Jiménez-Colmenero, F.J. Sánchez-Muniz // Meat Science. – 2013. – № 95(4). – P. 919-930. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2013.03.030.
5. Comunian T.A. The use of food by-products as a novel for functional foods: Their use as ingredients and for the encapsulation process / T.A. Comunian, M.P. Silva, C.J. Souza // Trends in Food Science and Technology. – 2021. – № 108. – P. 269-280. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.01.003.
6. Ruiz-Capillas C. Development of Meat Products with Healthier Lipid Content: Vibrational Spectroscopy / C. Ruiz-Capillas, A.M. Herrero // Foods. – 2021. – № 10(2). – P. 341. https://doi.org/10.3390/foods10020341.
7. Helkar P.B. Review: Food industry by-products used as a functional food ingredients / P.B. Helkar, A.K. Sahoo, N.J. Patil // International Journal of Waste Resources. – 2016. – № 6(3). – P. 1-6. https://doi.org/10.4172/2252-5211.1000248.
8. Lisitsyn A.B. Fatty Acid Composition of Meat from Various Animal Species and the Role of Technological Factors in Trans-isomerization of Fatty Acids / A.B. Lisitsyn, I.M. Chernukha, O.I. Lunina // Foods and Raw Materials. – 2017. – № 5(2). – P. 54-61. http://doi.org/10.21603/2308-4057-2017-2-54-61.
9. Development of recipe and technology of combined semi-finished products (Razrabotka receptury i tehnologii mjasnyh kombinirovannyh polufabrikatov) / L.A. Kaimbayeva et al // The Journal of Almaty Technological University. – 2019. – № 1. – P. 30-35. https://www.vestnik-atu.kz/jour/article/view/148?locale=en_US.
10. Current Knowledge on Genetic Biofortification in Lentil / J. Kumar et al // Journal of Agricultural and Food Chemistry. – 2016. – № 64(33). – P. 6383-6396. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.6b02171.
11. Seed Protein of Lentils: Current Status / H. Khazaei et al // Progress, and Food Applications. Foods. – 2019. – № 8(9). – P. 391. https://doi.org/10.3390/foods8090391.
12. Lentil flour: nutritional and technological properties, in vitro digestibility and perspectives for use in the food industry / A. Romano et al // Current Opinion in Food Science. – 2021. – № 40. – P. 157-167. https://doi.org/10.1016/j.cofs.2021.04.003.
13. Lentil and Mungbean protein isolates: Processing, functional properties, and potential food applications / S. Shrestha et al // Food Hydrocolloids. – 2023. – № 135. – P. 108142. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.108142.
14. Alibekov R.S., Urazbayeva K.A., Gabriliyants E.A., Utebayeva A.A., Satayev B.M. The method of production of chopped semi-finished products: Patent № 37642, Republic of Kazakhstan; filed 02.06.2024; published 28.11.2025.
15. Magnesium Matters: A Comprehensive Review of Its Vital Role in Health and Diseases / G. Fatima et al // Cureus. – 2024. – № 16(10). – P. e71392. https://doi.org/10.7759/cureus.71392.
16. Toft U. Potassium – a scoping review for Nordic Nutrition Recommendations 2023./ U. Toft, N.L. Riis, A. Jula // Food & Nutrition Research. – 2024. – № 68. https://doi.org/10.29219/fnr.v68.10365.

Р.С. Алибеков, Э.А. Габрильянц*, К.А. Уразбаева, А.А.
Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова,
160012, Республика Казахстан, г. Шымкент, проспект Тауке-хана, 5
*e-mail: gabrilyants@mail.ru

ОЦЕНКА МЯСНЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ, ОБОГАЩЕННЫХ ЧЕЧЕВИЧНОЙ МУКОЙ

В настоящее время глобальная урбанизация и ограничения в рационе питания способствуют развитию несбалансированного питания и хронических заболеваний. Глубокая переработка вторичного мясного сырья путем обогащения необходимыми соединениями и неорганическими элементами позволяет разрабатывать новые технологии функциональных пищевых продуктов со сниженной себестоимостью. Целью работы являлось исследование новых рубленых полуфабрикатов (котлет), обогащённых чечевичной мукой в количестве от 10 до 50% от общей массы. Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи: разработка технологии производства, проведение сенсорной оценки, анализ органолептических и физико-химических характеристик, а также определение содержания макро- и микроэлементов с использованием сканирующего электронного микроскопа и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой.

В качестве вторичного сырья использовали говяжьи субпродукты: язык, почки, сердце и рубец. Также применяли растительное сырьё – чечевицу (Lens culinaris). По органолептическим и сенсорным показателям оптимальным был признан образец, содержащий 70% мясного сырья и 30% чечевичной муки. Установлено, что внесение чечевичной муки в рецептуру повышает пищевую ценность котлет за счёт увеличения содержания белков, углеводов и минеральных веществ. Наличие макро- и микроэлементов определяли методом масс-спектрометрии и с использованием сканирующего электронного микроскопа.

Установлено, что содержание белка варьировало от 17,95±1,15 до 20,93±1,25 г/100 г по сравнению с контрольным образцом (17,07±0,72 г/100 г). Содержание углеводов составило от 3.64±0.33 до 7.91±0.72 г/100 г по сравнению с контрольным образцом (3.09±0.30 г/100 г). Исследуемые образцы содержали такие минеральные компоненты, как натрий (16,68-23,45%), магний (0,89-2,15%), фосфор (5,09-9,48%), калий (8,14-13,50%) и кальций (0,75-2,25%).

Разработанный мясной полуфабрикат, обогащённый чечевичной мукой, может быть рекомендован в качестве функционального пищевого продукта, обогащённого белками, минеральными веществами и витаминами.

Ключевые слова: *котлеты, Витаминизация, функциональное питание, чечевица, мясо, субпродукт.*

Р.С. Алибеков, Э.А. Габрильянц*, К.А. Уразбаева, Касымова М.К.
М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті,
160012, Қазақстан Республикасы, Шымкент қаласы, Тәуке хан даңғылы, 5
*e-mail: gabrilyants@mail.ru

ЖАСЫМЫҚ ҰНЫМЕН БАЙЫТЫЛҒАН ЕТ ЖАРТЫЛАЙ ФАБРИКАТТАРЫН БАҒАЛАУ

Қазіргі таңда жаһандық урбандалу және дұрыс тамақтанудың шектелуі теңгерімсіз тамақтану мен созылмалы аурулардың таралуына әсер етуде. Құндық көрсеткіші төмендетілген функционалдық тағам өнімдерінің жаңа технологияларын әзірлеу үшін екінші реттік ет шикізатын маңызды қосылыстармен және бейорганикалық элементтермен байыта отырып терең өңдеу өзекті болып табылады. Зерттеу жұмысының мақсаты жалпы масса құрамына 10%-дан 50%-ға дейінгі мөлшерде жасымық ұнын қосу арқылы байытылған жаңа туралған жартылай дайын өнімдерді (котлеттерді) зерттеу болды. Осы мақсатқа жету үшін келесі міндеттер қарастырылды: өнім өндіру технологиясын әзірлеу, сенсорлық бағалау жүргізу, органолептикалық және физика-химиялық қасиеттерін анықтау, сондай-ақ макро- және микроэлементтердің құрамын сканерлеуші электрондық микроскоп және индуктивті байланысқан плазмалы масс-спектрометрия әдісі арқылы зерттеу.

Екінші реттік шикізат ретінде ірі қара малдың субөнімдері – тіл, бүйрек, жүрек және месқарын пайдаланылды. Сонымен қатар отандық өсімдік шикізаты – жасымық (Lens culinaris) қолданылды. Органолептикалық және сенсорлық көрсеткіштер бойынша құрамында 70% ет субөнімдері және 30% жасымық ұны бар үлгі ең тиімді нұсқа ретінде таңдалды.

Зерттеу нәтижелері жасымық ұнын рецептураға енгізу ақуыздардың, көмірсулардың және минералдық заттардың мөлшерін арттыру арқылы котлеттердің тағамдық құндылығын жоғарылататынын көрсетті. Макро- және микроэлементтердің болуы масс-спектрометриялық

әдіс және сканерлеуші электрондық микроскоп көмегімен анықталды. Ақуыз мөлшері бақылау үлгісіндегі 17,07±0,72 г/100 г көрсеткішпен салыстырғанда 17,95±1,15-тен 20,93±1,25 г/100 г аралығында өзгерді. Көмірсулар мөлшері бақылау үлгісіндегі 3,09±0,30 г/100 г көрсеткішпен салыстырғанда 3,64±0,33-тен 7,91±0,72 г/100 г аралығында болды.

Зерттелген үлгілерде натрий (16,68-23,45%), магний (0,89-2,15%), фосфор (5,09-9,48%), калий (8,14-13,50%) және кальций (0,75-2,25%) сияқты минералдық компоненттер анықталды. Жасымық ұнымен байытылған әзірленген ет жартылай дайын өнімі ақуыздарға, минералдық заттарға және дәрумендерге бай функционалдық тағам өнімі ретінде ұсынылуы мүмкін.

Түйін сөздер: *котлеттер, дәрумендер, Функционалды тамақтану, жасымық, ет, ет.*

Сведения об авторах

Клара Абдразаковна Уразбаева – кандидат технических наук, профессор, Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова, Высшая школа текстильной и пищевой инженерии, Шымкент, Казахстан; e-mail: klara_abdrazak@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6922-5940.

Элеонора Арутюновна Габрильянц* – докторант, Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова, Высшая школа текстильной и пищевой инженерии, Шымкент, Казахстан; e-mail: gabrilyants@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5568-5674.

Равшанбек Султанбекович Алибеков – кандидат химических наук, профессор, Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова, Высшая школа текстильной и пищевой инженерии, Шымкент, Казахстан; e-mail: ralibekov@hotmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0723-3101.

Маххабат Куандыковна Касымова – кандидат химических наук, профессор, Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова, Высшая школа Текстильной и пищевой инженерии, Шымкент, Казахстан. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4789-7148.

Авторлар туралы мәліметтер

Клара Абдразаковна Уразбаева – техника ғылымдарының кандидаты, профессор, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Тоқыма және тамақ инженериясы жоғары мектебі, Шымкент, Қазақстан; e-mail: klara_abdrazak@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6922-5940.

Элеонора Арутюновна Габрильянц – докторант, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Тоқыма және тамақ инженериясы жоғары мектебі, Шымкент, Қазақстан; e-mail: gabrilyants@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5568-5674.

Равшанбек Султанбекович Алибеков – химия ғылымдарының кандидаты, профессор, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Тоқыма және тамақ инженериясы жоғары мектебі, Шымкент, Қазақстан; e-mail: ralibekov@hotmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0723-3101.

Махаббат Куандыковна Касымова – химия ғылымдарының кандидаты, профессор, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Тоқыма және тамақ инженериясы жоғары мектебі, Шымкент, Қазақстан. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4789-7148.

Information about the authors

Klara Abdrazakova Urazbaeva – candidate of technical science, professor, M. Auezov South Kazakhstan university, Textile and Food Engineering higher school, Shymkent, Kazakhstan; e-mail: klara_abdrazak@mail.ru. ORCID: https://orcid.org 0000-0002-6922-5940.

Eleonora Arutyunovna Gabrilyants* – doctoral student, M. Auezov South Kazakhstan university, Textile and Food Engineering higher school, Shymkent, Kazakhstan; e-mail: gabrilyants@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5568-5674.

Ravshanbek Sultanbekovish Alibekov – candidate of chemical science, professor, M. Auezov South Kazakhstan university, Textile and Food Engineering higher school. Shymkent, Kazakhstan; e-mail: ralibekov@hotmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0723-3101.

Mahabbat Kuandycovna Kassymova – candidate of chemical science, professor, M. Auezov South Kazakhstan university, Textile and Food Engineering higher school, Shymkent, Kazakhstan.: ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4789-7148.

Received 01.06.2026
Revised 08.09.2026
Accepted 09.09.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-61

IRSTI: 65.63.33

A. Mustafayeva*, B. Leonidova[1], G. Sharikbaeva[1], V. Akhmetova[1], A. Utegenova[2]
[1]S. Seifullin Kazakh Agro Technical Research University,
010011, Republic of Kazakhstan Astana, Zhenis avenue, 62.
[2]Shakarim University, 071412, Republic of Kazakhstan, Semey, 20 A, Glinki str.
e-mail: ayaulym.mustafa@mail.ru

IMPROVEMENT OF THE TECHNOLOGY FOR PRODUCING A FERMENTED MILK BEVERAGE BASED ON GOAT'S MILK

Abstract: *The present study was aimed at improving the formulation and production technology of goat milk yogurt through the replacement of refined sugar with natural sweeteners. Four formulations were prepared: a control sample containing sucrose and experimental samples containing Jerusalem artichoke extract, erythritol, or stevia extract. Yogurt was produced by a controlled fermentation process, and its organoleptic and physicochemical characteristics were evaluated. The experimental samples showed physicochemical properties comparable with those of the control. Total solids ranged from 15.4 to 15.7%, titratable acidity from 93 to 106 °T, pH from 4.5 to 4.7, fat from 4.0 to 4.3%, lactose from 4.5 to 4.8%, and protein from 3.3 to 3.5%. The addition of natural sweeteners affected sensory characteristics without adversely affecting fermentation or the main quality indicators. The Jerusalem artichoke sample had a caramel-like flavour and brownish colour, the erythritol sample had a refreshing sweet taste, and the stevia sample had a sweet taste with slight sourness. The results demonstrate that refined sugar can be replaced with selected natural sweeteners in goat milk yogurt while maintaining the required physicochemical and organoleptic characteristics. The developed formulations may be used as a basis for producing fermented dairy products with reduced added sucrose and improved sensory diversity.*

Key words: *goat milk, yogurt, natural sweeteners, stevia, erythritol, Jerusalem artichoke.*

Introduction

The safety and quality of food products represent a cornerstone of public health, making the study of food safety a topic of ongoing relevance. In recent years, several critical dietary challenges have emerged in our country, including excessive salt consumption, high levels of trans fats in processed foods, and the rapid increase in the intake of sugar and sugar-containing products. Addressing these issues effectively requires a thorough understanding of their underlying mechanisms, causes, and potential health implications.

One of the most pressing concerns is overconsumption of sugar, which is especially prevalent among school-aged children. Current statistics indicate that nearly half of this population regularly consumes sugar-containing foods and beverages [1]. Excessive sugar intake is associated with numerous health risks, including weight gain, diabetes, elevated cardiovascular risk, and a range of metabolic complications. Beyond these chronic conditions, high sugar consumption also contributes to overstimulation of the nervous system, resulting in increased restlessness and behavioral disturbances among children.

Given these risks, it is essential to explore strategies aimed at reducing sugar consumption. The World Health Organization recommends that adults limit their daily intake of pure sucrose to no more than 25 grams, with children advised to consume even less [2]. One promising approach involves replacing refined sugar with fruits or naturally derived sweeteners, which can provide sweetness while reducing negative metabolic impacts.

Not all natural sweeteners are equivalent in terms of caloric content; however, stevia was selected for this study due to its low glycemic index and its ability to provide sweetness without causing significant blood glucose spikes. This investigation therefore focuses on the production of fermented milk beverages using stevia as a natural sweetener. Such beverages not only deliver essential nutrients but also contain phytochemicals that support cardiovascular health, modulate blood sugar and insulin levels, and promote overall well-being. Plant-based components contribute dietary fiber, minerals, and antioxidants, while dairy ingredients supply high-quality proteins and calcium, creating a product that is both nutritionally rich and functionally beneficial [3].

©A. Mustafayeva, B. Leonidova, G. Sharikbaeva, V. Akhmetova, A. Utegenova, 2026

Among functional dairy products, yogurt prepared from goat milk with natural sweeteners presents notable advantages. Goat milk is known for its digestibility and high nutrient bioavailability, making it particularly suitable for populations with sensitive digestive systems [4]. The consumption of goat milk yogurt offers several health benefits:

- Probiotic cultures enhance gastrointestinal function, supporting healthy digestion.
- It is an appropriate alternative for individuals with cow's milk intolerance.
- Rich in calcium and phosphorus, it strengthens bones and supports hair, nail, and dental health.
- It is beneficial for pregnant women and children prone to diathesis.
- The probiotic content makes it suitable for children with atopic dermatitis.
- Its low caloric content allows inclusion in weight management diets.

Despite its relatively high fat content, goat milk does not significantly contribute to fat accumulation. Its combination of macro- and micronutrients, vitamins, and minerals helps prevent deficiencies and mitigates complications associated with excessive body weight [5].

Natural sweeteners are typically derived from sugar-containing plants through various processing methods, providing energy while being metabolized slowly, thus preventing rapid fluctuations in blood glucose. In contrast, excessive consumption of refined sugar can lead to abrupt changes in blood glucose levels, disrupting neuronal activity, triggering false hunger, and promoting overeating. Lipid metabolism may also be impaired, cholesterol levels can increase, vascular permeability may change, and the risk of atherosclerosis and cardiovascular disorders rises [6].

Refined sugar is a primary contributor to digestive disturbances, hypoglycemia, and metabolic dysfunction, while artificial sweeteners such as aspartame, saccharin, and sucralose, despite their low caloric value, can still contribute to weight gain and fail to provide essential micronutrients. Against this backdrop, the present study emphasizes the development of goat milk yogurt formulations using natural sweeteners, offering a promising approach to producing nutritionally and biologically valuable dairy products with reduced sugar content.

Materials and methods. Yogurt is produced using the thermostatic method according to GOST 31812-2013 "Yogurts. General technical specifications." The quality indicators of the finished yogurt product made from goat milk with added natural sweeteners were studied in the laboratory of the pilot production workshop for dairy processing. Protein content was determined according to GOST 25176, carbohydrate content according to GOST 3628, and acidity according to GOST 3624-92 «Milk and dairy products. Titrimetric methods for determining acidity» [7, 8].

The material used in the study was goat milk, a type of milk commonly consumed by humans. Goat milk is highly nutritious and contains more beneficial substances compared to cow's milk.

Literature review. Goat milk is known for its higher content of proteins, fats, calcium, and vitamins A and D when compared to cow's milk. Despite its relatively higher fat content, consumption of goat milk does not lead to increased body fat accumulation. Additionally, goat milk provides a diverse range of microelements, macroelements, minerals, and vitamins, which can help prevent deficiencies and support nutritional balance, particularly during weight management programs.

Stevia, a natural zero-calorie sweetener, has long been utilized both as a sugar substitute and as a flavor enhancer. Historically, it has served as a bio-sweetener and traditional remedy for diabetes, with scientific studies confirming its ability to regulate blood glucose levels. Beyond its sweetening properties, stevia demonstrates anti-inflammatory, antioxidant, anticancer, and antibacterial effects. The recommended daily intake for stevia is approximately 40 g [9], and research highlights its potential benefits for individuals seeking weight reduction, diabetic patients, and children.

The stevia plant is native to South America, where local populations first employed its leaves to sweeten beverages or chewed them for their natural sweetness roughly 200 years ago. Commonly referred to as the "sweet herb," stevia leaves were traditionally dried and used to enhance the flavor of teas, medicinal preparations, or consumed as a natural sweet snack. Commercial stevia extracts were first introduced in Japan during the 1970s and have remained popular there. Today, stevia is also cultivated in countries such as China, the United States, Paraguay, Kenya, Vietnam, Brazil, India, and Colombia.

The sweet taste of stevia is attributed to naturally occurring steviol glycosides present in the leaves. Over 11 types of glycosides are found in stevia, with rebaudioside A and stevioside being the most abundant. Purified stevia extracts may contain one or several glycosides and can be

approximately 200-250 times sweeter than sucrose [10]. More than 100 phytochemicals have been identified in stevia, including apigenin, austroulin, beta-sitosterol, cosmosin, humic acids, luteolin, stigmasterol, and xanthophylls. The slightly acidic taste present in fresh or dried leaves is eliminated in processed dry or liquid extracts. Importantly, stevia and its metabolites do not accumulate in the human body, and its caloric contribution is negligible, allowing purified extracts to be considered effectively zero-calorie.

Erythritol is another natural, non-caloric sugar substitute that does not affect blood glucose levels. It naturally occurs in grains, corn, mushrooms, berries, and fruits. Numerous studies, numbering around 2,000, have demonstrated that erythritol has favorable dietary properties compared to sugar and fructose. It does not disrupt the intestinal microbiota because approximately 90% is absorbed before reaching the colon, with the remainder being excreted through the kidneys. Erythritol has a zero glycemic index and, unlike conventional sugar, does not promote oral bacterial growth, thereby reducing the risk of dental caries [11].

Jerusalem artichoke, or topinambur, is a highly nutritious vegetable crop. Its primary constituents are inulin and fructose, which account for roughly 80% of the plant's dry matter. Inulin is unique as a natural polysaccharide composed solely of fructose units. Jerusalem artichoke also provides higher levels of vitamins B1, B2, B3, and C compared to potatoes, and three times more than carrots or beets. Notably, the tubers of Jerusalem artichoke contain about 3.2% protein, comprising eight essential and non-essential amino acids, including arginine, valine, histidine, isoleucine, leucine, lysine, methionine, threonine, tryptophan, and phenylalanine [12].

A comparative analysis of the natural sweeteners examined in this study is presented in Table 1.

Table 1 – Comparative analysis of natural sweeteners

Component	Erythritol	Stevioside	Jerusalem Artichoke
Additive code	E968	E960	HS Code 1702608000
Raw material	Sugar alcohol	Stevia leaves	Tubers or seeds
Form	Crystalline powder	Powder, tablets, liquid extract	Powder, pulp, juice
Taste	Sweet, cool sensation	Slightly bittersweet	Pleasant, sweet, nutty
Composition	High starch content, traces of fat and alcohol	Minerals, vitamins, flavonoids	Proteins, minerals, inulin, fructose, vitamins
Caloric value (per 100 g)	20 kcal	18 kcal	267 kcal
Glycemic index	0	0	13-15
Sweetness coefficient	70% of sugar	200-250 times sweeter than sugar	2 times sweeter than sugar
Absorbability	Good	Good	Good
Drawbacks	Requires high consumption for effect	Can taste bitter if added in excess	High in fructose, thus relatively caloric

Natural sweeteners provide the desired sweetness in foods without contributing additional calories or causing significant increases in blood glucose levels.

In the present study, a standard yogurt formulation containing 6% sugar was prepared. Yogurt produced from goat milk combines the nutritional benefits of the milk itself with the functional properties of lactic acid bacteria, resulting in a product that is both healthy and nutrient-rich. Its composition includes water, proteins, fats, carbohydrates, and essential minerals (Table 2).

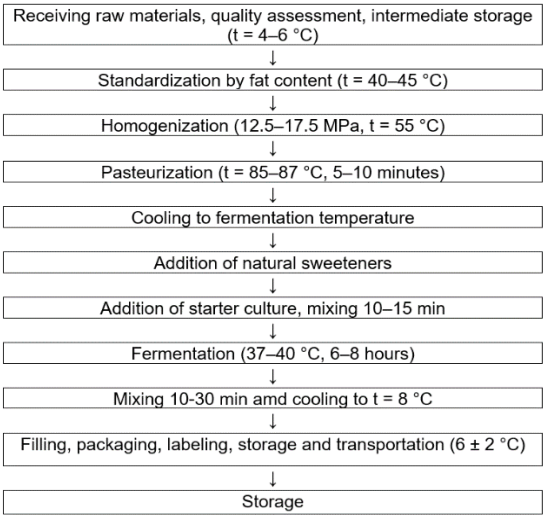
Table 2 – Formulation of traditional yogurt and yogurt with natural sweeteners

Yogurt	№ 1 (Control)	№ 2	№ 3	№ 4
Goat milk	1000 L	1000 L	1000 L	1000 L
Yogurt starter	3 kg	3 kg	3 kg	3 kg
Stevia extract	-	-	-	0.24 L
Erythirtol powder	-	-	85 kg	-
Jerusalem artichoke extract	-	30 L	-	-
Sugar	60 kg	-	-	-
Total	1063 kg	1033 kg	1088 kg	1003.24 kg

Following a comprehensive evaluation of available sugar substitutes, three natural sweeteners were selected to replace conventional sugar in the yogurt formulation: erythritol powder, Jerusalem artichoke (topinambur) extract, and stevia extract. These ingredients were chosen for their ability to maintain the sensory quality of the yogurt while providing additional nutritional or functional benefits.

Based on the use of natural sweeteners, a specific formulation and production technology for goat milk yogurt were established. The experimental work was carried out at the pilot dairy processing workshop of the Department of “Food and Processing Industry Technology” at S. Seifullin Kazakh Agro-Technical Research University.

The technological process for producing goat milk yogurt incorporating natural sweeteners is illustrated in Figure 1, providing a clear overview of the steps involved in fermentation, ingredient integration, and product maturation.



Figire 1 – Technological scheme for Yogurt preparation

Overall, the inclusion of natural sweeteners enhances the organoleptic qualities of yogurt, particularly its taste and aroma. However, achieving a flavor and texture profile that closely resembles the natural product requires careful selection of an appropriate and balanced quantity of additives.

Results and Discussion

Stevia and erythritol exhibit excellent solubility in water, remain stable during heat treatment, and do not interfere with the fermentation process. These characteristics make them highly suitable for use in food production. Additionally, stevia possesses biologically active properties that contribute to the regulation of multiple physiological functions, support immune system performance, and assist in lowering blood pressure [13].

The primary constituents of goat milk yogurt include water, proteins, fats, carbohydrates, and minerals. Water represents the largest proportion of the product, while proteins play a key role in tissue growth and repair. Fats facilitate the absorption of fat-soluble vitamins and serve as a source of energy. Carbohydrates, mainly lactose, provide additional energy, and minerals are essential for the maintenance of healthy bones and teeth. Furthermore, yogurt positively impacts digestive health and supports a balanced gut microbiota. The presence of live cultures and probiotics strengthens the immune system and contributes to overall health. A detailed chemical composition of the yogurt is provided in Table 3.

Table 3 – Chemical composition of yogurt

Component	№ 1 (Control)	№ 2	№ 3	№ 4
Energy value, kcal/ kJ	68,2 / 286,4	68,2 / 286,4	68,6/288,1	66/277,2
Protein, g	3,3	3,3	3,4	3,5
Fat, g	4,2	4,3	4,2	4,0
Carbohydrate, g	4,3	4,3	4,3	4,0
Water, g	87,58	87,58	87,55	87,5
Ash, g	0,82	0,83	0,85	0,80

The organoleptic properties of yogurt are assessed based on its type, composition, aroma, consistency, taste and color, i.e., evaluated using the sense of smell and taste. The orgabolpetic properties of goat milk yogurt are presented in Table 4.

Table 4 – Organoleptic properties of goat milk yogurt

№	Sample	Consistency	Aroma and Taste	Color
1	MEST standard sample	Homogeneous, moderately viscous. With stabilizer, resembles jelly or cream.	Sour milk, no other taste or aroma.	Milk-white, evenly distributed components
2	Control sample	Homogeneous, moderately viscous	Clean sour milk, slightly sweet	Milk-white
3	Sample with Jerusalem artichoke	Homogeneous, creamy, slightly viscous	Sweet caramel taste	Brownish, depending on additive
4	Sample with erythritol	Homogeneous, thick liquid	Sweet, refreshing taste	Milk-white
5	Sample with stevia	Homogeneous, moderately viscous	Sweet with slight sourness	Light milk-white

The table shows the organoleptic properties of yoguert made from goat milk with different natural sweeteners. The yogurt had typicsl properties: sweet, without foreign tastes or odors, characteristic of fermented milk products.

Table 5 presents the physicochemical properties of yogurt made from goat milk with natural sweeteners (stevia, erythritol, Jerusalem artichoke) and with sugar.

Table 5 – Physicochemical properties of goat milk yogurt with natural sweeteners

Product	Total Solids (TS)	Acidity (°T)	pH	Fat (%)	Lactose (%)	Protein (%)
Control sample	15.7	94°T	4.5-4.7	4.0-4.3	4.8	3.3-3.5
Sample with Jerusalem Artichoke	15.6	93°T	4.5-4.7	4.0-4.3	4.8	3.3-3.5
Sample with Erythritol	15.5	93°T	4.5-4.7	4.0-4.3	4.5	3.3-3.5
Sample with stevia	15.4	95°T	4.5-4.7	4.0-4.3	4.5	3.3-3.5

The density, acidity, pH, fat content, lactose, and non-fat milk solids (NFMS) of yogurt made from goat milk with added natural sweeteners (stevia, erythritol, Jerusalem artichoke) and sugar are shown. From the table, the composition of yogurt with natural sweeteners does not differ significantly from the control sample. Figure 2 shows samples of yogurt made from hoat milk with natural sweeteners.



Figure 2 – Samples of yogurt

The findings of this study indicate that goat milk yogurt enriched with erythritol, stevia, and Jerusalem artichoke exctract meets standard requirements for both physicochemical and organoleptic properties. This formulation is particularly beneficial for individuals managing excess weight or diabetes, and it supports gastrointenstinal health due to the presence of beneficial microorganisms and non-digestable carbohydrates that exhibit synergistic effects.

Conclusion

Yogurt produced from goat milk with the addition of natural sweeteners – stevia, erythritol, and Jerusalem artichoke – exhibited characteristics comparable to conventional yogurt containing sugar. Utilizing goat milk instead of cow's milk offers multiple advantages, including lower lactose content and higher concentrations of essential nutrients. For the production process, the thermostatic

(tank) fermentation method was selected, as it is economically efficient and allows for uniform incorporation of sweeteners with the starter culture, reducing overall production costs.

From an organoleptic perspective, the yogurt demonstrated a smooth, dense, and uniform texture. The addition of natural sweeteners increased the mixture's viscosity, while the color reflected the light brown tint imparted by Jerusalem artichoke. The flavor profile was moderately sweet, with a noticeable caramel-like note.

Over a 10-day observation period, the yogurt maintained stable organoleptic properties, showing no significant deviations in taste, color, aroma, or consistency compared to the control sample. The product preserved a uniform texture, free from sedimentation or discoloration, and retained a clean taste and pleasant aroma without off-flavors, indicating high-quality standards. Acidity was monitored during storage, remaining within 94-106 °T, confirming the product's suitability for consumption.

Overall, yogurt with natural sweeteners exhibited high quality, long shel life, a delicate consistency, and a favorable taste. Measured parameters included a pH of 4.5-4.7, non-fat milk solids (NFMS) of 15.6%, and a density of 1.040 g/cm³.

These results provide valuable guidance for the industrial-scale production of goat milk yogurt with natural sweeteners. The study highlights the potential for developing new products and enhancing existing formulations.

In summary, incorporating Jerusalem artichoke, erythritol, and stevia as natural sweeteners enables the production of goat milk yogurt that maintains its physicochemical properties, delivers health benefits, offers preventive and restorative effects, remains economically viable, and results in a fermented milk product with a pleasant taste that effectively masks the distinctive flavor of goat milk.

Список литературы

1. Құрамында қант бар сусындар мен дұрыс емес тамақтанудың бес жағымсыз салдары. 25 Ақпан, 2021. https://gkb7.kz/kz/klinika-turaly/zhanalyktar/2399

2. Рекомендация ВОЗ по потреблению сахара. https://news.un.org/ru/audio/2014/03/1021951

3. Ешкі және сиыр сүтінен жасалған йогурттың органолептикалық және физика-химиялық көрсеткіштерін салыстырмалы бағалау / Г.М. Даниярова және т.б. // Жас ғалым. – 2015. – № 6.3(86.3). – Б. 29-33. https://moluch.ru/archive/86/16476/ 13.03.2022.

4. Темірхан Д.Б. Использование натуральных подсластителей в производстве йогурта из козьего молока / Д.Б. Темірхан // Материалы международной научно-практической конференции «Сейфуллинские чтения – 18: « Молодежь и наука – взгляд в будущее». – 2022. – С. 234-238.

5. Заикина М.А. Технология йогурта на основе козьего молока, обогащенного смесью порошков аронии и боярышника / М.А. Заикина // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2021. – № 83(4). – С. 204-208.

6. Писарева Н.В. Сравнительное исследование влияния стевии и сахарозы на качество йогурта / Н.В. Писарева, О.В. Ковальчук, Е.И. Киричек // Продовольственная наука. – 2019. – № 1. – С. 51-55.

7. ГОСТ 31981-2013. Йогурты. Общие технические условия. – Введ. 2014-05-01. – Москва: Стандартинформ, 2014. – 12 с.

8. ГОСТ 3624-92. Молоко и молочные продукты. Титриметрические методы определения кислотности. – Введ. 1994-01-01. – Москва : Стандартинформ, 2009. – 8 с.

9. Дягилева П.Д. Стевия – науральный сахарозаменитель / Дягилева П.Д., Степанов А.В. // Актуальные проблемы развития естественных наук: сборник статей участников XXIII Областного конкурса научно-исследовательских работ «Научный Олимп» по направлению «Естественные науки». – Екатеринбург: Уральский федеральный университет, 2020. – С. 43-48.

10. Ребезов Я.М. Разработка продуктов питания с учетом современных требований / Я.М. Ребезов, О.В. Горелик, Э.К. Окусхондова // Министерство сельского хозяйства Российской Федерации //ФГБОУ ВО «Курганская государственная сельскохозяйственная академия имени Т.С. Мальцева». – 2017. – С. 156-158.

11. Соколова Е.И. Көкөністер мен саңырауқұлақтардан тағамдар әзірлеу: оқулық орта кәсіптік білім беру мекемелерінің студенттеріне арналған / Е.И. Соколова. – М.: «Академия» баспа орталығы, 2016 – 288 б.

12. Chemical composition and sensory analysis of probiotic yogurts made with goat milk and soy milk added with Zizyphus jujuba fruit extract / T.C. Pimentel et al // Food research international. – 2012. – № 48(1). – P. 559-564.
13. Родионова Н.С. Стевия в технологии функциональных молочных продуктов / Н.С. Родионова // Известия вузов. Пищевая технология. – 2000. – № 4. – С. 38-40.

References

1. Kuramynda kant bar susyndar men durys emes tamaktanudyn bes zhagymsyz saldary. 25 Akpan, 2021. https://gkb7.kz/kz/klinika-turaly/zhanalyktar/2399. (in Kazakh).
2. Rekomendatsiya VOZ po potrebleniyu sakhara. https://news.un.org/ru/audio/2014/03/1021951. (in Russian).
3. Eshki zhane siyr sytinen zhasalgan iogurttyn organoleptikalyk zhane fizika-khimiyalyk korsetkishterin salystyrmaly bagalau / G.M. Daniyarova zhane t.b. // Zhas galym. – 2015. – № 6.3(86.3). – B. 29-33. https://moluch.ru/archive/86/16476/ 13.03.2022. (in Kazakh).
4. Temirkhan D.B. Ispol'zovanie natural'nykh podslastitelei v proizvodstve iogurta iz koz'ego moloka / D.B. Temirkhan // Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Seifullinskie chteniya – 18: « Molodezh' i nauka – vzglyad v budushchee». – 2022. – S. 234-238. (in Russian).
5. Zaikina M.A. Tekhnologiya iogurta na osnove koz'ego moloka, obogashchennogo smes'yu poroshkov aronii i boyaryshnika / M.A. Zaikina // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologii. – 2021. – № 83(4). – S. 204-208. (in Russian).
6. Pisareva N.V. Sravnitel'noe issledovanie vliyaniya stevii i sakharozy na kachestvo iogurta / N.V. Pisareva, O.V. Koval'chuk, E.I. Kirichek // Prodovol'stvennaya nauka. – 2019. – № 1. – S. 51-55. (in Russian).
7. GOST 31981-2013. Iogurty. Obshchie tekhnicheskie usloviya. – Vved. 2014-05-01. – Moskva: Standartinform, 2014. – 12 s. (in Russian).
8. GOST 3624-92. Moloko i molochnye produkty. Titrimetricheskie metody opredeleniya kislotnosti. – Vved. 1994-01-01. – Moskva : Standartinform, 2009. – 8 s. (in Russian).
9. Dyagileva P.D. Steviya – naural'nyi sakharozamenitel' / Dyagileva P.D., Stepanov A.V. // Aktual'nye problemy razvitiya estestvennykh nauk: sbornik statei uchastnikov XXIII Oblastnogo konkursa nauchno-issledovatel'skikh rabot «Nauchnyi Olimp» po napravleniyu «Estestvennye nauki». – Ekaterinburg: Ural'skii federal'nyi universitet, 2020. – S. 43-48. (in Russian).
10. Rebezov Ya.M. Razrabotka produktov pitaniya s uchetom sovremennykh trebovanii / Ya.M. Rebezov, O.V. Gorelik, Eh.K. Okuskhondova // Ministerstvo sel'skogo khozyaistva Rossiiskoi Federatsii //FGBOU VO «Kurganskaya gosudarstvennaya sel'skokhozyaistvennaya akademiya imeni T.S. Mal'tseva». – 2017. – S. 156-158. (in Russian).
11. Sokolova E.I. Kokonister men sanyraukulaktardan tagamdar azirleu: okulyk orta kasiptik bilim beru mekemelerinin studentterine arnalgan / E.I. Sokolova. – M.: «Akademiya» baspa ortalygy, 2016 – 288 b. (in Kazakh).
12. Chemical composition and sensory analysis of probiotic yogurts made with goat milk and soy milk added with Zizyphus jujuba fruit extract / T.C. Pimentel et al // Food research international. – 2012. – № 48(1). – R. 559-564. (in English).
13. Rodionova N.S. Steviya v tekhnologii funktsional'nykh molochnykh produktov / N.S. Rodionova // Izvestiya vuzov. Pishchevaya tekhnologiya. – 2000. – № 4. – C. 38-40. (in Russian).

А.К. Мустафаева[*], Б.Л. Леонидова[1], Г.Ж. Шарикбаева[1], В.Ш. Ахметова[1], А.О. Утегенова[2]
[1]Казахский агротехнический исследовательский университет имени Сакена Сейфуллина, Казахстан, 010011, Астана, пр. Женис 62
[2]Шәкәрім университет, 071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А
e-mail: ayaulym.mustafa@mail.ru

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА КИСЛОМОЛОЧНОГО НАПИТКА НА ОСНОВЕ КОЗЬЕГО МОЛОКА

Целью данного исследования было совершенствование рецептуры и технологии производства йогурта из козьего молока путем замены рафинированного сахара натуральными подсластителями. Были подготовлены четыре варианта продукта: контрольный образец, содержащий сахарозу, и опытные образцы с добавлением экстракта топинамбура, эритрита или

экстракта стевии. Йогурт изготавливали методом контролируемой ферментации, после чего оценивали его органолептические и физико-химические показатели. Физико-химические свойства опытных образцов оказались сопоставимы с показателями контрольного образца. Содержание сухих веществ варьировалось от 15,4 до 15,7%, титруемая кислотность – от 93 до 106°Т, pH – от 4,5 до 4,7, массовая доля жира – от 4,0 до 4,3%, лактозы – от 4,5 до 4,8%, белка – от 3,3 до 3,5%. Использование натуральных подсластителей повлияло на органолептические свойства, не оказывая при этом негативного воздействия на процесс ферментации или основные показатели качества. Образец с топинамбуром отличался карамельным привкусом и коричневатым оттенком, образец с эритритом имел освежающий сладкий вкус, а образец со стевией – сладкий вкус с легкой кислинкой. Результаты исследования подтверждают возможность замены рафинированного сахара на выбранные натуральные подсластители при производстве йогурта из козьего молока с сохранением требуемых физико-химических и органолептических характеристик. Разработанные рецептуры могут служить основой для производства кисломолочных продуктов с пониженным содержанием добавленной сахарозы и более разнообразными органолептическими свойствами.

Ключевые слова: *козье молоко, йогурт, натуральные подсластители, стевия, эритрит, топинамбур.*

А.К. Мустафаева[*], Б.Л. Леонидова[1], Г.Ж. Шарикбаева[1], В.Ш. Ахметова[1], А.О. Утегенова[2]
[1]Сәкен Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті,
Қазақстан Республикасы, 010011, Астана қаласы, Жеңіс даңғылы 62
[2]Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы, 071412, Семей қ., Глинка к-сі, 20 А
*e-mail: ayaulym.mustafa@mail.ru

ЕШКІ СҮТ НЕГІЗІНДЕГІ СҮТҚЫШҚЫЛДЫ СУСЫН ӨНДІРУ ТЕХНОЛОГИЯСЫН ЖЕТІЛДІРУ

Ұсынылып отырған зерттеу жұмысы йогуртқа қосылатын табиғи қантты табиғи тәттілендіргіштермен алмастыру арқылы ешкі сүтінен әзірленген йогурттың рецептурасын және өндіру технологиясын жетілдіруге арналған. Зерттеу барысында өнімнің төрт үлгісі дайындалып алынды: қант қосылған йогурттың бақылау үлгісі, топинамбур сығындысы, эритрит ұнтағы және стевия сығындысы қосылған үлгілер дайындалды. Йогуртты ұйытындыны бақылау әдісімен өндірілді, содан кейін дайын өнімнің органолептикалық және физика-химиялық көрсеткіштері бағаланды. Табиғи тәттілендіргіш қосылған йогурттардың көрсеткіштері бақылау үлгісіне сәйкес болды. Құрғақ заттардың мөлшері 15,4-тен 15,7% -ға дейін, титрленетін қышқылдығы 93-тен 106 °Т-ге дейін, pH 4,5-тен 4,7-ге дейін, майдың массалық үлесі 4,0-ден 4,3% -ға дейін, лактоза 4,5-тен 4,8% -ға дейін, ақуыз 3,3-тен 3,5% -ға дейін өзгерді. Табиғи тәттілендіргіштерді қолдану йогуртты ұйыту процесіне немесе негізгі сапа параметрлеріне кері әсер етпестен органолептикалық қасиеттерін жақсартты. Топинамбур қосылған үлгі карамельді дәм мен қоңыр реңкті, эритрит қосылған үлгі сергітетін тәтті дәмді, ал стевия қосылған үлгі тәтті жеңіл қышқыл дәмі тәтті өнім болып табылды. Зерттеу нәтижелері ешкі сүтінен жасалған йогурт өндірісінде қажетті физика-химиялық және органолептикалық сипаттамаларды сақтай отырып, ақ қантты табиғи тәттілендіргіштермен алмастыру мүмкіндігін растайды. Зерттеу нәтижесінде ешкі сүті негізінде табиғи тәттілендіргіштер стевия, эритритол және топинамбур қосылған сүтқылды сусынның құрамындағы қанттың мөлшері аз және органолептикалық көрсеткіштері әртүрлә болатын сүтқышқылды өнімдер өндіруге негіз бола алады.

Түйін сөздер: *ешкі сүті, йогурт, табиғи тәттілендіргіш, стевия, эритритол, эритрит, топинамбур.*

Авторлар туралы мәлімет

Аяулым Какеновна Мустафаева* – техника ғылымдарының кандидаты, «Тамақ және қайта өңдеу өндірістерінің технологиясы» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Сәкен Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қаласы, Қазақстан Республикасы; e-mail: ayaulym.mustafa@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9627-7543.

Балқаш Леонидқызы Леонидова – техника ғылымдарының кандидаты, «Тамақ және қайта өңдеу өндірістерінің технологиясы» кафедрасының аға оқытушысы; Сәкен Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қаласы, Қазақстан Республикасы; e-mail: b.leonidova@kazatu.edu.kz. ORCID https://orcid.org/ 0009-0009-2752-8300.

Гульмира Жексеновна Шарикбаева – «Тамақ және қайта өңдеу өндірістерінің технологиясы» кафедрасының оқытушысы, Сәкен Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қаласы, Қазақстан Республикасы; e-mail: gsharikbaeva@mail.ru. ORCID ID https://orcid.org/0009-0006-1786-3250.

Венера Шаймуратовна Ахметова – техника ғылымдарының магистры, «Инжиниринг және азық-түлік технологиялар» институтытың аға оқытушысы, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: v.akhmetova@kazatu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-5456-2872.

Асия Оразбековна Утегенова – PhD, «Тамақ технологиясы» кафедрасының қауымдастырылған профессор м.а., Шәкәрім атындағы университеті, Қазақстан; e-mail: asia_aksu@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3378-6815.

Сведения об авторах

Аяулым Какеновна Мустафаева* – кандидат технических наук, ассоциированный профессор кафедры «Технология пищевых и перерабатывающих производств», Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, город Астана, Республика Казахстан; e-mail: ayaulym.mustafa@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9627-7543.

Балкаш Леонидовна Леонидова – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Технология пищевых и перерабатывающих производств», Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, город Астана, Республика Казахстан; e-mail: b.leonidova@kazatu.edu.kz. ORCID https://orcid.org/ 0009-0009-2752-8300.

Гульмира Жексеновна Шарикбаева – преподаватель кафедры «Технология пищевых и перерабатывающих производств», Казахский агротехнический исследовательский университет им. Сакена Сейфуллина, Астана, Казахстан; e-mail: gsharikbaeva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-1786-3250.

Венера Шаймуратовна Ахметова – магистр технических наук, старший преподаватель института «Инжиниринга и пищевых технологий», Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Республика Казахстан; e-mail: v.akhmetova@kazatu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-5456-2872.

Асия Оразбековна Утегенова – PhD, и.о. ассоциированного профессора кафедры «Технология пищевых продуктов», Шәкәрім университет, Казахстан; e-mail: asia_aksu@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3378-6815.

Information about the authors

Ayaulym Kakenovna Mustafayeva* – Candidate of Technical Sciences, Senior lecturer of the Department «Technology of Food and Processing Industries», Kazakh Agrotechnical Research University named after S.Seifullin, Astana city, Republic of Kazakhstan; e-mail: ayaulym.mustafa@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9627-7543.

Balkash Leonidovna Leonidova – Candidate of Technical Sciences, Senior lecturer of the Department «Technology of Food and Processing Industries», Kazakh Agrotechnical Research University named after S.Seifullin, Astana city, Republic of Kazakhstan; e-mail: b.leonidova@kazatu.edu.kz. ORCID https://orcid.org/ 0009-0009-2752-8300.

Gulmira Zheksenovna Sharikbaeva – Lecturer of the Department of Food Technology and Processing Products; Saken Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Kazakhstan; e-mail: gsharikbaeva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-1786-3250.

Venera Shaimuratovna Akhmetova – Master of Technical Sciences, Senior Lecturer at the Institute of Engineering and Food Technologies; Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin; Republic of Kazakhstan; e-mail:v.akhmetova@kazatu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-5456-2872.

Assiya Orazbekovna Utegenova – PhD, Acting Associate Professor of the Department of «Food Technology», Shakarim University of Semey, Kazakhstan; e-mail: asia_aksu@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3378-6815.

Received 01.06.2026
Revised 07.09.2026
Accepted 11.09.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-62

МРНТИ: 44.31.31

CC BY 4.0
Check for updates

А.А. Генбач, Д.Ю. Бондарцев*, М.Д. Ерболатов
Алматинский университет энергетики и связи им. Г. Даукеева,
050013, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Байтурсынова 126/1
*e-mail: d.bondartsev@aues.kz

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ДЕТОНАЦИОННОМ НАПЫЛЕНИИ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ ПОКРЫТИЙ

Аннотация: *Исследованы тепловые нагрузки для пористых покрытий из природных материалов в зависимости от их свойств. Применены из исследованных 26 камер сгорания и сопел устройство и разработана схема питания порошком и термитом для напыления на металлическую поверхность. Нанесение напылением пористых покрытий производилось при коэффициенте избытка окислителя α<1, а горючее дожигалось на поверхности пористого покрытия сверхзвуковыми пульсирующими детонационными высокотемпературными факелами, истекающими из камер сгорания и сопел. Удельные тепловые потоки на покрытии в 2 и более раза выше, чем при обычных струях. Явление детонации является одновременно упрочняющей технологией для создания покрытий. Имеет место структурная спиновая детонация, состоящая из семи участков, а угол наклона поперечной скорости близок к 45 градусам, а сама скорость близка к скорости детонации. Частота колебания давления на покрытии – около 200 Гц. Пористые поверхности имеют более высокие критические нагрузки, хорошо управляемы в области предельных режимов. Теплотехническая оценка покрытий показала их преимущества над традиционными системами. Разработана модель взаимодействия детонационной волны с покрытием, определена температура покрытия.*

Ключевые слова: *тепловые нагрузки, природные материалы, покрытия, детонационный факел, модель, термоинструмент.*

Введение

Поиск новых материалов для изготовления теплозащитных покрытий становится всё более актуальной задачей [1-2] в энергетическом секторе.

Разработан новый никелевый суперсплав, перспективный для применения при 700^{0}С и более. Основным режимом отказа являлись трещины на поверхности сплава. Режимы разрушения оценивались до 760^{0}С, от напряжений растяжения, ползучести, усталости, что явно недостаточно для современных температур цикла [3]. В никелевом суперсплаве четвертого поколения [4] исследовалась зависимость силы ползучести от межфазных дислокаций при температуре 1100^{0}С. Однако данные авторы в более поздней работе [5] переходят на изучение и рекомендацию монокристаллических сплавов. Для упрощения конструкций охлаждающих схем [6] применяют керамические покрытия [7-8], через которые пропускают холодоноситель. Покрытие [7] разработано с помощью процесса плазменного напыления. Смесь стабилизированных иттрием порошков циркония и полиэфиры использовались в качестве покрытия, которое наносилось на подложку из суперсплава на основе никеля. Однако прочность на сцепления пористого покрытия была ниже на 20% по сравнению с термобарьерным покрытием [2, 9].

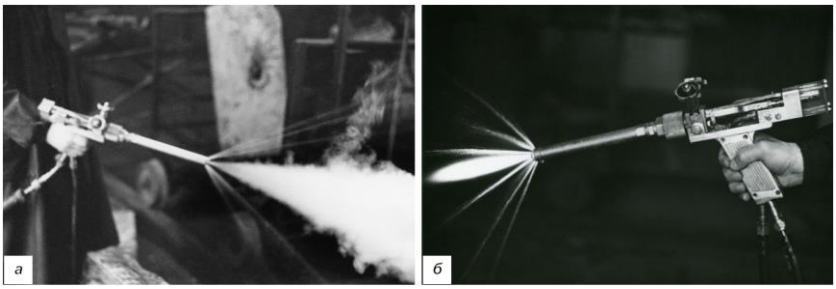
Актуальным является поиск покрытий в виде нанесения на необработанную поверхность меди наночастиц, микрочастиц и микро/наночастиц [10]. Это может привести к интенсификации теплообмена и увеличению (или снижению) отвода критических тепловых потоков. Поэтому представляет интерес исследовать в сочетании минеральные среды (наношкала) [11] и металлургические сетки (микрошкала) [12].

©А.А. Генбач, Д.Ю. Бондарцев, М.Д. Ерболатов, 2026

Задачей настоящего исследования является изучение процессов формирования и теплового воздействия на пористые покрытия из природных материалов при использовании сверхзвуковых пульсирующих высокотемпературных детонационных факелов. Дополнительно решались задачи разработки схемы подачи порошка и термита, анализа особенностей взаимодействия детонационной волны с покрытием и построения модели, позволяющей определить температурное состояние покрытия в условиях высокотемпературного воздействия.

Материалы и методы

Перспективным тепловым прибором для нанесения порошков природного материала является разработанная горелка ракетного типа (рис. 1), выполненная в виде автоматического пускового устройства с плексигласовой приставкой. Калибратор имеет детонационный наконечник. Вода в виде струй обеспечивает технологические функции.



а – пусковой режим, продувка камеры и сопла; б – режим эксплуатации

Рисунок 1 – Установка для термического напыления покрытий – термоинструмент

На рисунке 2 представлена схема питания термитом или другим порошком природного материала (кварцит, гранит, тешенит, мрамор, туф) термоинструмента: 1 – бункер из термита или другого порошка; 2 – воздушное сопло; 3 – порошок; 4 – транспортирующая трубка; 5 – хомут; 6 – термоинструмент.

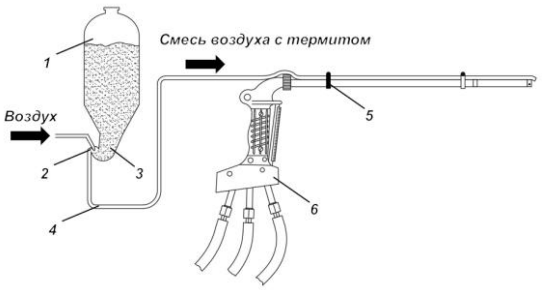


Рисунок 2 – Схема питания порошком природного материала термоинструмента.

Термит применялся в приспособлении для процесса оплавления покрытий из вязких и высокопористых минеральных сред (туф и мрамор). Подача порошка производится из бункера (рис. 2) путем эжектирования его истекающими струями (рис. 1, (*б*)).

Скорость истечения газа определялась при адиабатном расширении (газодинамика потока). Для получения сверхзвуковой скорости потока сопло является комбинированным, т.е. состоит из двух частей: сужающейся и расширяющейся (сопло Лаваля). Максимальный расход газа определяется поперечным сечением горловины – самой узкой части сопла в месте перехода этих частей.

При рассмотрении тепловых потоков допущением являлось принятие поверхности воздействия (покрытия) факелом в виде свободной со всех сторон пластины толщиной $2h$. К поверхности $z = +h$, начиная с момента времени $\tau = 0$, подводится постоянный тепловой поток q. Нижняя поверхность $z = -h$ и боковые края пластины считаются теплоизолированными. Записывалось уравнение теплопроводности [12] с граничными и начальными условиями и определялись тепловые потоки q. Другие допущения приводятся в разделе Результаты: скорость потока известна из газодинамического расчета; статическая температура потока

газа T; коэффициент адиабаты k; молярная масса газа μ; лучистым теплообменом и теплоемкостью пластины пренебрегаем; режим течения в пограничном слое – турбулентный.

Для измерения q использовались теплоприемники, состоящие из медного цилиндра, который с одного торца воспринимал действие газовой струи, а с другого – охлаждался водой. В качестве изолятора использовалась керамика на основе диоксида циркония. В цилиндре размещались две хромель-копелевые термопары. Погрешность измерения q составляла ± 35%.

Результаты

Вид структурной детонации имеет место в смеси продуктов сгорания керосин – кислород термоинструмента в свободной струе (см. рисунок 3). Струя предназначена для нанесения напылением покрытий на металлическую подложку из природных материалов.

В наших исследованиях детонация проявляется не в трубке, а в стационарном потоке газа (в свободной струе, рис. 3, (*а*), (*б*), (*в*), (*г*)). Это пример стационарного гидродинамического процесса с горением за ударной волной. Такой процесс устойчив и непрерывен.

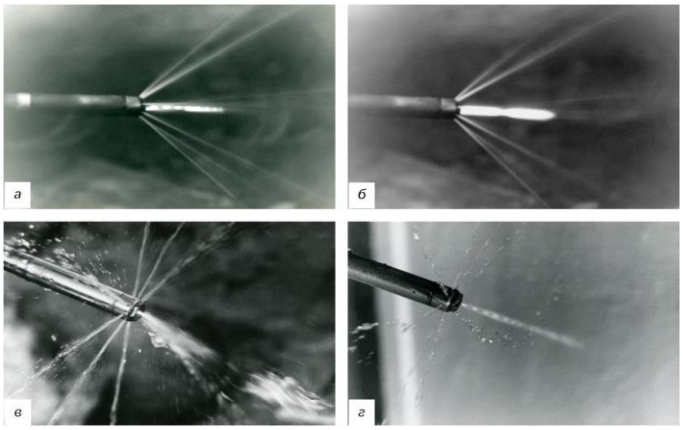


Рисунок 3 – Проявление детонации в стационарном потоке газа (в свободной струе)

На рисунке 3, (*а*), (*г*) – это поперечная волна за детонационным фронтом, периодически появляющаяся в виде световых вертикальных полос. Наблюдаемая периодичность воспламенения связана с отрывом области горения газа от факела ударной волны (см. рисунок 3, (*в*)) при его резком расширении, вызванном воспламенением [11]. На рисунке 3, (*б*) представлен вид структуры затопленной струи термоинструмента.

Удельные тепловые потоки в (2÷6) раз выше, чем для обычной сверхзвуковой высокотемпературной струи. Горючее (керосин) дожигается на покрытии.

Анализ влияния изменения коэффициента избытка окислителя $\alpha_{\text{к.}}$ и параметров газового потока на конечный результат приведены в таблице 1. Каждому давлению в камере сгорания $P_{\text{к.}}$ соответствует оптимальное значение $\alpha_{\text{к.}}$, при котором температура T_a и скорость струи W_a на выходе из сопла имеют максимальное значение. Максимальной температуре газа на срезе сопла соответствует $\alpha_{\text{к.}}$ = 0,87÷0,93, а максимальной скорости истечения $\alpha_{\text{к.}}$ = 0,7÷0,75.

Таблица 1 – Газодинамические параметры сверхзвуковой струи на выходе из сопла керосино-кислородного термоинструмента.

$\alpha_{\text{к.}}$	$P_{\text{к.}}$ = 1 МПа		$P_{\text{к.}}$ = 1,5 МПа	
	T_a, К	W_a, м/с	T_a, К	W_a, м/с
0,7	2750	2250	2665	2420
0,8	2850	2240	2780	2410
0,9	2685	2220	2830	2400
1	2870	2140	2810	2320

Изменение $\alpha_{\text{к.}}$ от 0,7 до 0,9 практически не влияет на скорость. При $\alpha_{\text{к.}}$ = 0,8÷0,9 с ростом давления $P_{\text{к.}}$ приводит к росту скорости и небольшому снижению температуры на срезе.

Следовательно, оптимальным значением является $\alpha_{\text{к.}}$ = 0,8÷0,9. Принято в области сверхзвуковых течений, что газодинамические параметры берутся из расчета, при этом

эксперимент обобщается с точностью ± (25÷30) %. Одним из вариантов нанесения покрытий может служить применение микровзрывов гранул твердых взрывчатых веществ в детонационной волне (рис. 4).

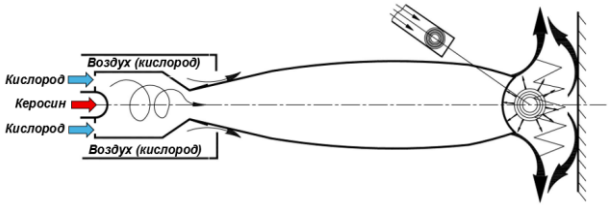


Рисунок 4 – Модель создания капиллярно-пористого покрытия в стационарной детонационной волне

Однако процесс создания капиллярно-пористого покрытия может существенно упроститься при использование детонационных термоинструментов (рис. 1), когда тот же энергетический эффект достигается без взрывчатых веществ. Положение факела показано на рисунке 5.

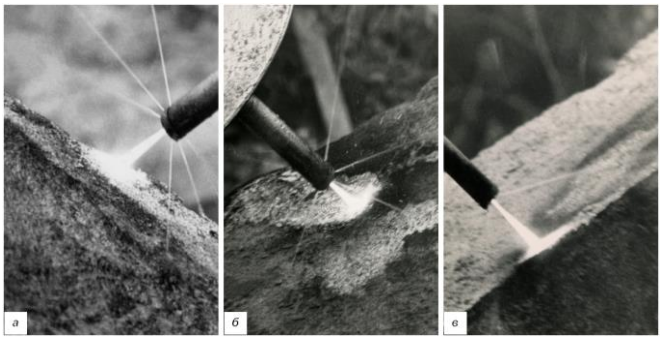


Рисунок 5 – Положение сверхзвукового высокотемпературного детонационного факела к поверхности воздействия покрытия

На фотографии зарегистрирована оптимальная структура факела (а), растекание струи с радиусом пятна торможения (б), длина струи от среза сопла до покрытия (в). Отвод воды от поверхности покрытия осуществлялся согласно технологии изготовления

Режим горения может проходить с оплавлением поверхности, особенно для мягких и высокопористых пород (мраморы, туфы). Детонационная струя (рис. 3, 5) является одновременно и упрочняющей технологией при создании покрытий. На графике (рис. 6), представлено распределение удельных тепловых потоков q в пятне торможения газовой струи радиусом r, см. рисунок 5, б.

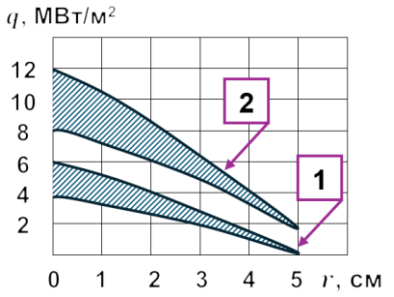


Рисунок 6 – Анализ удельных тепловых потоков

На рисунке 6 заштрихованная область 1 соответствует тепловым процессам для сверхзвуковых факелов в пятне торможения на покрытии при различных методах напыления, а область 2 – сверхзвуковым факелам при исследованном детонационном напылении покрытия. Расхождение q для каждой из областей 1 и 2 отвечает различному расстоянию сопла термоинструмента до капиллярно-пористого покрытия.

В качестве примера определим температуру покрытия $T^*_{\text{ст.}}$. Напыление производится термоинструментом на металлическую подложку в виде тонкой теплоизолированной пластины, продольно обтекаемой сверхзвуковым потоком газа. Скорость газовой струи W известна из эксперимента или из газодинамического расчета. Статическая температура потока газа T. Коэффициент адиабаты k = 1,22; молярная масса газа (продуктов сгорания) μ = 23 кг/кмоль. Лучистым теплообменом и теплоемкостью пластины пренебрегаем. Режим течения в пограничном слое – турбулентный.

Газовая постоянная:

$$R = \frac{8314}{\mu} = \frac{8314}{23} = 362, \text{ Дж/(кг·К)}. \quad (1)$$

Скорость звука струи:

$$\alpha = \sqrt{kRT} = \sqrt{1{,}22 \cdot 362 \cdot T}, \text{ м/с}. \quad (2)$$

Число Маха $M = W/\alpha$, $M = M_\infty$ (для невозмущенного потока).

Число Прандтля

$$Pr = \frac{4k}{9k-5} = \frac{4 \cdot 1{,}22}{9 \cdot 1{,}22-5} = 0{,}815. \quad (3)$$

Коэффициент восстановления:

$$r = \sqrt[3]{Pr} = \sqrt[3]{0{,}815} = 0{,}93. \quad (4)$$

Температура покрытия (пластины):

$$T^*_{\text{ст.}} = T\left(1 + \frac{K-1}{2} r M^2\right), \quad (5)$$

где $T^*_{\text{ст.}}$ также называется температурой восстановления $T_{r\infty}$ ($T^*_{\text{ст.}} = T_{r\infty}$).

Величину $T_{r\infty}$ также можно записать:

$$T_{r\infty} = T_\infty + r\frac{W_\infty^2}{2Cp_\infty}, \quad (6)$$

где T_∞ или T (статическая температура потока газа) – термодинамическая температура невозмущенного потока, это такая температура, которую показал бы термометр, перемещающийся вместе с потоком с одинаковой с ним скоростью. W_∞ или W – скорость невозмущенного потока (скорость газовой струи), с индексом «∞». Cp_∞ – изобарная теплоемкость невозмущенного потока («∞»), Дж/(кг·К).

Для керосино-кислородного термоинструмента имеем: $\alpha_{\text{к.}}$ = 0,8, $T_a = T_\infty$ = 2780 К; $W_a = W_\infty$ = 2410 м/с; $P_{\text{к.}}$ = 1,5 МПа, где $\alpha_{\text{к.}}$ – коэффициент избытка окислителя; T_a – адиабатная температура на выходе из сопла, К; W_a – скорость истечения газа, м/с; $P_{\text{к.}}$ – давление в камере сгорания, МПа.

Тогда:

$$\alpha = \sqrt{kRT} = \sqrt{1{,}22 \cdot 362 \cdot 2780} = 1{,}12 \cdot 10^3, \text{ м/с}; \quad (7)$$

$$M = \frac{2410}{1120} = 2{,}28. \quad (8)$$

$$T^*_{\text{ст.}} = 2780\left(1 + \frac{1{,}22-1}{2} \cdot 0{,}93 \cdot 2{,}28^2\right) = 4250, \text{ К}. \quad (9)$$

Удельный тепловой поток к стенке (обложке), омываемой высокоскоростным потоком газа, для $Pr \neq 1$, равен:

$$q_w = \alpha(T_{r\infty} - T_w) = \alpha(T_{aw} - T_w), \quad (10)$$

где $T_{r\infty} = T_{aw}$, К; T_{aw} – адиабатная температура стенки (обложки), К; α – коэффициент теплоотдачи от покрытия (пятна торможения) к стенки (обложке), Вт/(м²·К).

Для определения α величины q_w принимаются из эксперимента, либо величины α рассчитывается для условия продольного обтекания сверхзвуковым потоком с поправками на число M и фактор сжимаемости в области турбулентного пограничного слоя. Температура стенки T_w определяется для системы охлаждения (внешняя задача).

Для применяемых ракетных керосино-кислородных горелок q_w = (5÷12) МВт/м² для r = 0 и l = (4÷12)×10^{-2} м, где r – радиус пятна торможения, м; l – расстояние от среза сопла до покрытия, м (см. рисунок 5).

Капиллярно-пористая система охлаждения обеспечивает T_w = 800 + 273 = 1073 К.

Тогда:

$$\alpha = \frac{q_w}{T_{aw}-T_w} = \frac{(5 \div 12) \cdot 10^6}{4250-1073} = (1580 \div 3500), \text{ Вт/(м}^2\text{·К)}, \quad (11)$$

где $T_{aw} = T^*_{\text{ст.}} = T_{r\infty}$.

Расчет произведён для сверхзвукового потока с учетом коэффициента восстановления r и числа Маха M.

Обсуждение

Теплозащитные покрытия на основе оксида циркония, стабилизированного иттрием, в настоящее время рассматриваются как наиболее освоенное решение для газотурбинных установок. Однако повышение рабочих температур перспективных газотурбинных установок до 1200÷1600 ^{0}C требует поиска новых материалов и принципов организации теплозащиты. В предлагаемом подходе защитная система формируется за счёт сочетания металлических сетчатых структур [12] и природных минеральных материалов [11], наносимых детонационным методом на поверхность деталей. Дополнительная эффективность достигается использованием двухфазного охлаждения в капиллярно-пористой среде. Такое сочетание материалов и способов охлаждения ориентировано прежде всего на улучшение теплотехнических характеристик покрытия при сохранении необходимой механической прочности.

Поиск новых покрытий осложняется большим количеством возможных комбинаций компонентов и соединений. В связи с этим в исследовании рассматриваются природные поликристаллические материалы – граниты, кварциты, тешениты, мраморы и туфы. Эти материалы наносятся на металлическую подложку в виде слоёв толщиной от сотен микрон до нескольких миллиметров с применением детонационного напыления. Для отвода тепла используется система охлаждения на основе двухфазного потока и сетчатых структур [12], а также струйное охлаждение. Подобные покрытия обладают низкой теплопроводностью, устойчивостью к эрозии, коррозионному воздействию и агрессивным средам. Кроме того, пористая структура слоёв обеспечивает компенсацию термических деформаций при циклических режимах работы установки.

Разрабатываемая система представляет собой многофункциональную конструкцию, где внешний слой выполняет роль термобарьерной защиты, а внутренние сетчатые элементы обеспечивают интенсивный теплоотвод. Основное внимание при создании покрытия уделяется именно теплотехническим свойствам, поскольку они определяют работоспособность высоконагруженных деталей газотурбинных установок. Вместе с тем проведённые эксперименты показали, что природные минеральные материалы сохраняют достаточную прочность при воздействии детонационного факела. Концепция покрытия основана на объединении подходов теплотехники, минералогии, кристаллографии и материаловедения, что позволяет рассматривать природные минеральные среды как перспективную альтернативу традиционным тугоплавким оксидам.

Современные методы моделирования позволяют сравнивать свойства различных материалов, включая оксиды циркония, пирохлоры, кварцевые стёкла и другие соединения, однако расчётные подходы имеют ограничения. На результаты существенно влияют химическая неоднородность, наличие примесей и пористость, которые трудно учесть при моделировании. Поэтому в данном исследовании основное значение придаётся натурному эксперименту, в котором оценивается работа многослойных покрытий в сочетании с капиллярно-пористой системой охлаждения. Практические испытания позволяют определить, сохраняются ли требуемые теплотехнические свойства при температурах выше 500÷1000 ^{0}C. Полученные результаты показывают, что при высокотемпературной эксплуатации эффективные термозащитные свойства могут обеспечиваться не только материалами с минимальной теплопроводностью, но и покрытиями, характеристики которых изменяются в условиях реальной работы установки.

Заключение

В качестве природных материалов выбирались кварциты, граниты, тешениты, мраморы и туфы, которые превращались в порошки и наносились на металлическую поверхность на разработанном стенде питания и измерения. Термоинструмент позволял создавать мощные пульсирующие спиновые детонационные высокотемпературные струи, которые в (2÷6) раз интенсифицировали процесс образования покрытий от вида напыляемого материала. Горючее дожигалось на поверхности при α = 0,3÷0,8. Детонационная струя являлась упрочняющей, имела семь участков с поперечной скоростью близкой к детонационной. Для напыления порошка частицы отбирались по крупности (0,1÷0,5)×10^{-3} м. Управление

процессом нанесения напыления заключалось в способе сжигания топлива на поверхности покрытия, регулировании длиной струи, углом наклона струи, отводом охладителя от покрытия. Предельные области удельных тепловых нагрузок для покрытий составили $(2,2÷15)×10^6$ Вт/м^2 при поддерживаемом перегреве покрытий в диапазоне (20÷75) К. Нано- и микроструктуры в виде природных покрытий и сеток дают суммарный эффект, имеют синэргические преимущества их объединения, расширяют предельные нагрузки и управляют технологией получения.

Список литературы

1. Firoozi A.A. Advancing durability in the energy sector: Novel high-temperature resistant coatings and their challenges / A.A. Firoozi, A.A. Firoozi, T. Saidani, // Ain Shams Engineering Journal. – 2025. – Vol. 16. – P. 103431. https://doi.org/10.1016/j.asej.2025.103431.
2. Vaßen R. A Perspective on Thermally Sprayed Thermal Barrier Coatings: Current Status and Trends / R. Vaßen, E. Bakan, Mack, D.E. // Journal of Thermal Spray Technology. – 2022. – Vol. 31. – P. 685-698. https://doi.org/10.1007/s11666-022-01330-2.
3. Zhong Z. Mechanical properties and fracture modes of an advanced Ni–Co-base disk superalloy at elevated temperatures / Z. Zhong, Y. Gu, Y. Yuan // Materials Characterization. – 2012. – Vol. 67. – P. 101-111. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2012.02.021.
4. Zhang J.X. Dependence of creep strength on the interfacial dislocations in a fourth generation SC superalloy TMS-138 / J.X. Zhang, T. Murakumo, H. Harada // Scripta Materialia. – 2003. – Vol. 48. – P. 287-293. https://doi.org/10.1016/S1359-6462(02)00379-2.
5. Zhang J.X. Thermomechanical fatigue mechanism in a modern single crystal nickel base superalloy TMS-82 / J.X. Zhang, H. Harada, Y. Ro // Acta Materialia. – 2008. – Vol. 56. – P. 2975-2987. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2008.02.035.
6. Yang X. Turbine platform phantom cooling from airfoil film coolant, with purge flow / X. Yang, Z. Liu, T. Simon // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2019. – Vol. 140. – P. 25-40. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.05.109.
7. Arai M. Porous Ceramic Coating for Transpiration Cooling of Gas Turbine Blade / M. Arai, T. Suidzu // Journal of Thermal Spray Technology. – 2013. – Vol. 22. – P. 690-698. https://doi.org/10.1007/s11666-013-9883-1.
8. Dhairiyasamy R. Enhancing biodiesel engine efficiency through tungsten carbide ceramic coatings: a performance and emission optimization study / R. Dhairiyasamy, D. Varshney, S. Singh // Discover Mechanical Engineering. – 2025. – Vol. 4. – P. 29. https://doi.org/10.1007/s44245-025-00114-6.
9. Bagathi M.R. O. Coating Characteristics of Plasma-Sprayed Ceramic Thermal Barrier Coatings on Internal Diameter (ID) Surfaces / M.R. Bagathi, R. Vaßen, O. Guillon // Journal of Thermal Spray Technology. – 2025. – Vol. 34. – P. 2918-2938. https://doi.org/10.1007/s11666-025-02042-z.
10. Khan S.A. Design, fabrication and nucleate pool-boiling heat transfer performance of hybrid micro-nano scale 2-D modulated porous surfaces / S.A. Khan, N. Sezer, M. Koç, // Applied Thermal Engineering. – 2019. – Vol. 153. – P. 168-180. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.02.133.
11. Experimental studies of natural material-based coatings for thermal protection of metallic surfaces / A.A. Genbach et al // Journal of Materials Science: Materials in Engineering. – 2025. – Vol. 20. – P. 46. https://doi.org/10.1186/s40712-025-00252-5.
12. Boiling crisis in porous structures / A.A. Genbach et al // Energy. – 2022. – Vol. 259. – P. 125076. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125076.

А.А. Генбач, Д.Ю. Бондарцев*, М.Д. Ерболатов
Ғ. Даукеев атындағы Алматы Энергетика және Байланыс Университеті,
050013, Қазақстан Республикасы, Алматы қаласы, Байтурсынұлы көшесі 126/1
*e-mail: d.bondartsev@aues.kz

КАПИЛЛЯРЛЫ-КЕУЕКТІ ЖАБЫНДАРДЫ ДЕТОНАЦИЯЛЫҚ ШАШЫРАТУ КЕЗІНДЕГІ ЖЫЛУЛЫҚ ҮДЕРІСТЕРДІ ЗЕРТТЕУ

Табиғи материалдардан жасалған кеуекті жабындардың жылулық жүктемелері олардың қасиеттеріне байланысты зерттелді. Зерттелген 26 жану камерасы мен саптамадан құрылғы таңдалды және металл бетіне шашырату үшін ұнтақ пен термитпен қоректендіру схемасы

әзірленді. Жабындар тотықтырғыш артығының коэффициенті α<1 кезінде шашыратылды, ал жану камерасы мен саптамалардан шығатын дыбыстан жылдам пульсациялы жоғары температуралы детонациялық факелдер арқылы кеуекті жабын бетінде жанармайдың кейінгі жануы орын алды. Жабын бетіндегі меншікті жылулық ағындар кәдімгі ағындармен салыстырғанда 2 және одан да көп есе жоғары болды. Детонация құбылысы бір мезгілде жабын жасаудың нығайту технологиясы болып табылады. Жеті учаскеден тұратын құрылымдық спинді детонация байқалды; көлденең жылдамдықтың еңіс бұрышы 45 градусқа жақын, жылдамдықтың өзі детонация жылдамдығына жақын. Жабын бетіндегі қысымның тербеліс жиілігі шамамен 200 Гц. Кеуекті беттер жоғары критикалық жүктемелерге ие және шекті режимдер аймағында жақсы басқарылады. Жабындардың жылотехникалық бағалауы дәстүрлі жүйелер алдындағы артықшылықтарын растады. Детонациялық толқынның жабынмен өзара әрекеттесу моделі әзірленді және жабынның температурасы анықталды.

Түйін сөздер: *жылулық жүктемелер, табиғи материалдар, жабындар, детонациялық факел, модель, жылу құралы.*

A.A. Genbach, D.Yu. Bondartsev*, M.D. Yerbolatov
Almaty University of Power Engineering and Telecommunications n.a. G. Daukeev,
050013, Republic of Kazakhstan, Almaty, Baitursynov str., 126/1
*e-mail: d.bondartsev@aues.kz

INVESTIGATION OF THERMAL PROCESSES DURING DETONATION SPRAYING OF CAPILLARY-POROUS COATINGS

Heat loads for porous coatings of natural materials were studied as a function of their properties. From 26 investigated combustion chambers and nozzles, a device was selected and a powder-and-thermite feed scheme was developed for spraying onto metallic surfaces. Coatings were deposited at an oxidizer excess coefficient α < 1, with fuel afterburning occurring at the coating surface via supersonic pulsating high-temperature detonation jets issuing from the combustion chambers and nozzles. Specific heat fluxes at the coating surface were at least twice as high as those from conventional jets. The detonation phenomenon simultaneously acts as a hardening technology for coating formation. Structural spinning detonation consisting of seven zones was observed; the transverse velocity inclination angle approached 45°, and the velocity magnitude was close to the detonation velocity. Pressure oscillation frequency at the coating surface was approximately 200 Hz. Porous surfaces exhibited higher critical loads and were well controllable in limiting regimes. Thermotechnical evaluation confirmed their advantages over conventional systems. A model of detonation wave interaction with the coating was developed and coating temperature was determined.

Key words: *heat loads, natural materials, coatings, detonation jet, model, thermal tool.*

Сведения об авторах

Александр Алексеевич Генбач – д.т.н., проф. каф. «Теплоэнергетика и Физика», Алматинский университет энергетики и связи имени Г. Даукеева; e-mail: a.genbach@aues.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-3819-4387.

Давид Юрьевич Бондарцев* – PhD, проф. каф. «Теплоэнергетика и Физика», Алматинский университет энергетики и связи имени Г. Даукеева; e-mail: d.bondartsev@aues.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8778-7851.

Маулен Дүйсенбекұлы Ерболатов – докторант каф. «Теплоэнергетика и Физика», Алматинский университет энергетики и связи имени Г. Даукеева; e-mail: erbolatovmaulen@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-5202-6116.

Авторлар туралы мәліметтер

Александр Алексеевич Генбач – т.ғ.д., проф. каф. «Жылу энергетикасы және физика», Ғ. Даукеев атындағы Алматы Энергетика және Байланыс Университеті; e-mail: a.genbach@aues.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-3819-4387.

Давид Юрьевич Бондарцев* – PhD, проф. каф. «Жылу энергетикасы және физика», Ғ. Даукеев атындағы Алматы Энергетика және Байланыс Университеті; e-mail: d.bondartsev@aues.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8778-7851.

Маулен Дүйсенбекұлы Ерболатов – PhD докторанты каф. «Жылу энергетикасы және физика», Ғ. Даукеев атындағы Алматы Энергетика және Байланыс Университеті; e-mail: erbolatovmaulen@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-5202-6116.

Information about the authors

Alexander Genbach – d.t.s., prof. dep. «Thermal Power and Physics», Almaty University of Power Engineering and Telecommunications n.a. G. Daukeev; e-mail: a.genbach@aues.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-3819-4387.

David Bondartsev* – PhD, prof. dep. «Thermal Power and Physics», Almaty University of Power Engineering and Telecommunications n.a. G. Daukeev; e-mail: d.bondartsev@aues.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8778-7851.

Maulen Duissenbekuly Yerbolatov – PhD student dep. «Thermal Power and Physics», Almaty University of Power Engineering and Telecommunications n.a. G. Daukeev; e-mail: erbolatovmaulen@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-5202-6116.

Поступила в редакцию 11.04.2026
Поступила после доработки 14.06.2026
Принята к публикации 16.06.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-63

IRSTI: 44.09.03

CC BY 4.0
Check for updates

S.M. Akbarova
Azerbaijan University of Architecture and Construction,
Baku, A.Sultanova-11, Az1073, Azerbaijan
e-mail: samira.akbarova@azmiu.edu.az

EVOLUTION OF SCIENTIFIC DISCOURSE AND INVESTMENT PRIORITIES IN RENEWABLE ENERGY INTEGRATION RISKS: A BIBLIOMETRIC ANALYSIS

Abstract: *The article analyzes the structure of scientific understanding of the risks of integrating renewable energy sources. Based on a bibliometric analysis of 4823 publications of Web of Science database (2015-2025) identified three stable thematic clusters and demonstrated the dominance of the system optimization paradigm under uncertainty. The scientific novelty of the study lies in the development of a system relevance index-a metric for quantitatively ranking risk mitigation strategies based on the topology of a bibliometric network; a gap between scientific priorities and investment practice was identified: for a number of technologies, it reaches +0.6 on a normalized scale. A dynamic analysis of publications over three time periods (2015-2018; 2019-2021; 2022-2025) recorded a shift in the research agenda from regulatory approaches to engineering management of systemic risks. It is shown that grid-forming inverters and machine learning algorithms occupy a central position in the scientific field, ahead of market adoption by 5-10 years, which indicates promising areas for investment policy.*

Key words: *renewable energy integration, system risks, bibliometric analysis, energy storage, system optimization, uncertainty management.*

Introduction

Large-scale integration of renewable energy sources (RES) is a key process in the modern energy transition. According to forecasts by the International Energy Agency, by 2030, RES will account for more than 60% of the increase in global electricity generation, and in a number of countries their share will exceed 50% [1, 2]. At the same time, the growth in the share of RES is associated with systemic technical risks that are fundamentally different from the problems of traditional energy [3]. Three interrelated challenges define the technical agenda for RES integration. The first is generation intermittency: solar and wind installations produce energy intermittently, which requires mechanisms to compensate for imbalances in real time [4]. The second is reducing the inertia of the power system: replacing synchronous generators with inverter devices based on power electronics reduces the physical inertia of the network, accelerating frequency changes during disturbances [5]. The third is overload of the network infrastructure: power flows from decentralized sources create stress at nodes that are not designed for bidirectional transmission [6].

©S.M. Akbarova, 2026

Existing studies typically examine these risks in isolation and conceptualize the structure of the scientific field statically. However, two interrelated aspects remain understudied in the literature [6, 7]: 1) how the structure of scientific understanding of the risks of integrating renewable energy sources has transformed over the past decade and what factors have driven this transformation; 2) to what extent technologies occupying a central position in the scientific field receive adequate funding in the market. Answers to these questions are important both for theory – in terms of conceptualizing the systemic risks of the energy transition – and for the practice of formulating scientifically sound investment and regulatory policies in the renewable energy sector.

The purpose of this article is to identify and quantify the structure of scientific ideas about the risks of RES integration, trace its evolution over time, and compare research priorities with data on actual investment in technologies based on a bibliometric analysis of Web of Science publications (2015-2025) using the developed systemic relevance index.

Materials and methods

The study covers publications from the Web of Science Core Collection for the years 2015–2025. Search request was being built on Boolean combinations terms: (“renewable energy integration” OR “power system stability” OR “grid resilience”) AND (“energy storage” OR “frequency regulation” OR “uncertainty”) applied To Topic and Title fields. Additional filters: document type – Article and Review; language – English. Final sample: 4823 peer-reviewed publications. For dynamic analysis, the sample is divided into three subperiods: 2015–2018 (n = 987), 2019-2021 (n = 1,504), and 2022-2025 (n = 2,332).

The methodological contribution of the study lies in the use of bibliometric analysis as the main analytical basis for identifying the systemic nature of the risks of RES integration, rather than as an auxiliary tool (Fig. 1).

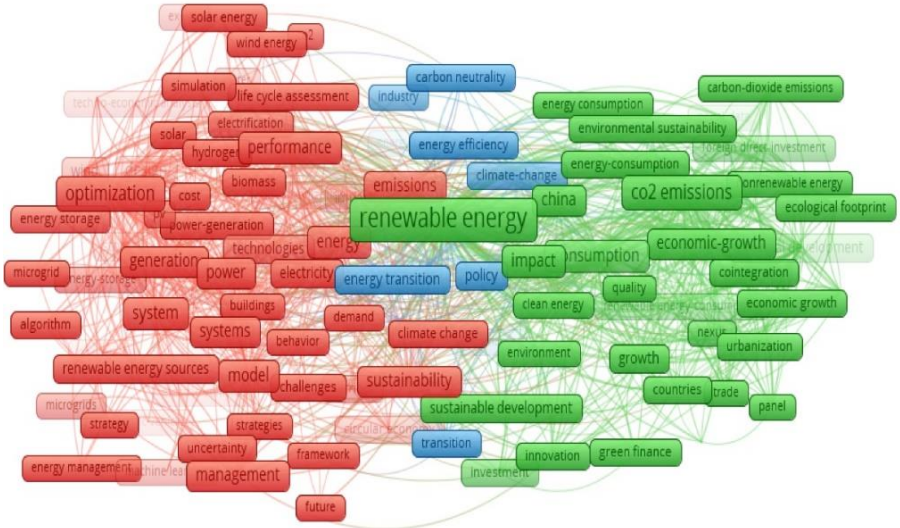


Figure 1 – Bibliometric map of 111 keywords

The analysis was conducted using the keyword co-mention method in VOSviewer 1.6.19. Parameters: minimum occurrence threshold – 5 publications; final network – 111 keywords out of 8,420 unique ones; clustering resolution – 1; minimum cluster size – 5 elements. Clustering was performed separately for each of the three sub-periods and for the overall sample. To rank the strategies, a composite system relevance index (SRI) was developed, constructed on the basis of three topological characteristics of the bibliometric network [8, 9] in accordance with the composite index methodology:

SRI = 0.4 C norm + 0.35 L inter + 0.25 R cov

C norm – normalized total strength of connections of the central node of the strategy (0-1);

L inter – proportion of intercluster connections of a node from the total number of its connections (0-1);

R cov – share of covered risks from the total number of identified systemic risks (0-1).

The component weights are determined based on their relative importance for characterizing the topological structure of the bibliometric network, following the analytical hierarchy process (AHP) logic widely adopted in composite indicator construction [18]. The weight assignment procedure proceeded in two stages. First, pairwise comparisons of the three components were conducted based on their theoretical relevance to the research objective: measuring the systemic centrality of risk-mitigation strategies in the scientific field. Node centrality (C norm) was assigned the highest weight (0.4) because degree centrality in keyword co-occurrence networks is the most direct and empirically validated proxy for collective research attention and conceptual importance within a discipline. Intercluster connectivity (L inter) received the second weight (0.35) because it captures the cross-domain integrative role of a strategy – a property that distinguishes systemically important interventions from narrowly specialized ones, which is central to the study's objective. Risk coverage (R cov) was assigned the lowest weight (0.25) because it reflects breadth of applicability, an important but secondary criterion that can partially overlap with intercluster connectivity. The resulting weights (0.4; 0.35; 0.25) satisfy the constraint that they sum to unity and are consistent with the priority ordering established by the pairwise comparison matrix (consistency ratio CR = 0.03, well below the accepted threshold of 0.10).

The validity of using topological characteristics of a bibliometric network as a basis for ranking strategies requires separate justification. The centrality of a node in a keyword co-occurrence network reflects not only the frequency of a term's occurrence but also its conceptual coherence with other research areas – that is, the degree to which the corresponding strategy is considered systemically important by the scientific community. A node's intercluster connections indicate that the strategy is recognized as relevant to several problem classes simultaneously, not just a narrowly specialized area. Thus, high values of topological metrics indicate not simply the popularity of a topic, but its integrative role in the structure of scientific knowledge.

This logic is based on a principle substantiated in bibliometric methodology: the structure of co-citations and joint mentions reflects the cognitive structure of a scientific discipline—the distribution of research attention, established conceptual connections, and community-recognized priorities [10]. Consequently, a technology or strategy that occupies a central position in this structure is highly likely to be perceived by the expert community as systemically significant—regardless of the absolute number of publications about it.

At the same time, it's necessary to distinguish between two types of validity. Bibliometric topology is valid as an indicator of research consensus – which strategies the scientific community considers priority. It is not a direct measure of the technical effectiveness of strategies in real energy systems. This is why this study compares the SRI with independent IRENA / IEA investment data: the agreement between the two independent indicators strengthens the credibility of the conclusions, while any discrepancy between them is meaningfully interpreted as a gap between scientific thinking and market practice.

To verify the robustness of the SRI with respect to the chosen weighting scheme, a sensitivity analysis was conducted by systematically varying each weight by ±10% and ±20% while keeping the remaining two weights proportionally adjusted to preserve the unit-sum constraint. Nine weight scenarios were tested in total. The maximum rank-order change observed across all scenarios was zero: the ordinal ranking (System optimization – Flexibility – Infrastructure) remained stable in all tested configurations. The maximum absolute deviation in any individual SRI score did not exceed 0.04 (System optimization: 0.91-0.95; Flexibility: 0.78-0.84; Infrastructure: 0.64-0.70). These results confirm that the conclusions of the study are robust with respect to reasonable perturbations of the weighting scheme.

Data on technology investment volumes were obtained from public reports by IRENA [12, 13] and IEA [7, 8] for 2023. For comparison with the SRI, investments were normalized to the maximum value in the technology sample. The gap between the SRI and the normalized investment volume is interpreted as an indicator of the scientific agenda being ahead of market practice.

Results

A bibliometric analysis of the overall sample revealed a hierarchical three-cluster structure. The term "renewable energy" has the highest total link strength (96 units) and serves as the conceptual "anchor" of the network. The density of links decreases from the technical and technological core to the ecological periphery, indicating the dominant engineering-systems paradigm.

The engineering and technology cluster (61% of publications) includes the following nodes: optimization, system, energy storage, microgrid, algorithm, uncertainty, model, and performance. The optimization and system nodes rank first and second in terms of total link strength (87 and 74 units, respectively). The environmental cluster (24%) is adjacent to the central node but has half the link density – emission reduction is considered in the literature as a result of engineering decisions rather than an independent goal. The political and management cluster (15%) occupies an intermediary position between the other two.

An analysis of the three subperiods revealed a consistent shift in the research agenda (Table 1). The centrality of the energy storage node increased from 0.31 in 2015-2018 to 0.87 in 2022-2025; the uncertainty node increased its centrality from 0.19 to 0.72. The topic of grid-forming inverters and virtual inertia was absent from the network in the first period and reached a centrality of 0.53 in the third. At the same time, the policy node consistently shifted toward the periphery: its centrality decreased from 0.44 to 0.29.

Table 1 – Dynamics of the centrality of key nodes by periods (normalized values, 0-1)

Key Node / Topic	2015-2018	2019-2021	2022-2025
energy storage (centrality)	0.31	0.58	0.87
uncertainty (centrality)	0.19	0.41	0.72
grid-forming (grid-forming inverters)/virtual inertia (centrality)	absent	0.12	0.53
policy (centrality)	0.44	0.38	0.29
Share of publications in cluster 1 (technological-technological), %	54	60	68

These data document a shift in the dominant paradigm: from 2015 to 2018, priority was given to political and regulatory instruments for scaling renewable energy; since 2019, the center of gravity has shifted to the engineering challenges of managing uncertainty and maintaining inertia. The share of publications in the engineering and technology cluster increased from 54% in the first period to 68% in the third.

Based on the calculated SRI values, the risk mitigation strategies are ranked in descending order of systemic importance (Table 2). The system optimization and uncertainty management group received the highest SRI (0.94): its nodes have the highest normalized centrality and intercluster connections with all three clusters. The flexibility and stability group with an SRI of 0.81 covers three risk classes simultaneously [11, 12]. Infrastructure measures with an SRI of 0.67 are at the bottom of the ranking, although they remain a necessary condition for the implementation of the other two groups.

Table 2 – Renewable energy integration risk minimization strategies ranked by systemic importance index

Strategy Group	Specific measures	Systemic Relevance Index	Risk coverage
Flexibility and stability	BESS, PHES; virtual power plants (VPP); islanding microgrids	0.81	Intermittency, balancing, peak loads
Infrastructure and technological measures	Grid-forming inverters; digitalization (SCADA, IoT); line modernization	0.67	Reducing inertia, overloading lines
System optimization and uncertainty management	Machine learning algorithms for forecasting; robust and stochastic optimization; adaptive load management	0.94	All three risk clusters

A comparison of the SRI with the standardized investment volumes in 2023 (Table 3) revealed three types of relationships. Energy storage (BESS) demonstrates close alignment (a gap of +0.06): the market and science assess their systemic role comparablely, which is explained by the maturity of the technology and the rapid decline in cost [13]. Grid-forming inverters and machine learning algorithms exhibit a significant gap (+0.57 and +0.68, respectively): their scientific significance significantly outpaces current investment. This indicates that these technologies are in the early stages of diffusion and may become priority areas for government R&D support.

Table 3 – Comparison of the SRI with the volume of investments in technology (2023)

Technology	SRI (present research)	Investments 2023, USA$ billion (IRENA/IEA)	Rupture (SRI – normal inv.)	Interpretation
Energy storage systems (BESS)	0.81	90 (normal 0.75)	+0.06	Correspondence
Grid-forming inverters	0.67	12 (normal 0.10)	+0.57	The Gap: Science Outpaces the Market
Machine learning algorithms/optimization	0.94	31 (norm. 0.26)	+0.68	Significant gap
Digitalization of networks (SCADA/IoT)	0.67	48 (normal 0.4)	+0.27	Moderate gap

The moderate gap in the direction of network digitalization of +0.27 is explained by the partial overlap of investments in SCADA/IoT with overall spending on digital infrastructure, which is not always highlighted as a separate line item in industry statistics.

Discussion

Dynamic analysis allows us to clarify the nature of the research paradigm shift. From 2015 to 2018, the literature focused on the conditions for scaling renewable energy sources—standards, subsidies, and performance targets. Since 2019, priority has shifted to managing physical risks: intermittency, inertia reduction, and real-time balancing. This shift coincides with the growth of the share of renewable energy sources in the power systems of a number of countries above the threshold of 30-35%, at which systemic risks become critical [14, 15]. Conceptual map of the discussion: research paradigm shift and its dimensions is given on Fig. 2.

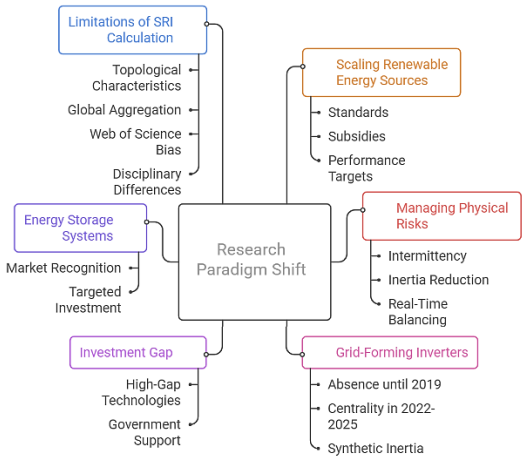


Figure 2 – Key themes of the research paradigm shift in renewable energy integration

The rapid growth in the centrality of the grid-forming inverter topic deserves special attention: the absence of grid presence until 2019 and a centrality of 0.53 in 2022-2025 reflect a qualitative leap-the scientific community's awareness that synthetic inertia is a necessary condition for the stability of systems with a share of renewable energy sources exceeding 50% [16, 17].

The identified gap between the SRI and investment has specific practical implications. High-gap technologies (grid-forming inverters, machine learning algorithms) are in a phase where market incentives are not yet sufficient for independent scaling, but the scientific base is already mature. It is here that government support for R&D and initial deployments can yield the greatest systemic impact [18, 19].

The close alignment for energy storage systems suggests otherwise: the market has already recognized the systemic importance of BESS, and additional regulatory incentives for this group are less relevant than for immature technologies. This allows for targeted investment policy rather than uniform subsidies across the entire spectrum of technologies [20-22].

The SRI calculation is based on the topological characteristics of the bibliometric network, not on direct engineering measurements-this must be taken into account when interpreting the numerical values. IRENA/IEA investment data are aggregated globally and may not reflect regional specifics. The exclusive reliance on the Web of Science Core Collection represents a further limitation. WoS over-indexes English-language publications from North American and European journals, and systematically under-indexes research from countries that are among the most active in renewable energy development, including China, Brazil, India, and several other Asian and Latin American nations. Chinese-language journals indexed in CNKI, for instance, contain a substantial body of work on grid-forming inverters and large-scale storage that is absent from the present sample. Future studies should replicate the analysis using Scopus or multi-database queries to assess the sensitivity of the cluster structure to database choice. Additionally, the study does not explicitly account for differences in publication activity across disciplines: engineering fields produce substantially higher publication volumes than policy or economics research, which may inflate the topological centrality of engineering nodes relative to regulatory or institutional approaches and contribute to the observed shift toward engineering paradigms [23-25]. Supplementary normalisation by disciplinary base rates would help disentangle genuine paradigm shifts from artefacts of differential publication culture.

Conclusion

The study identified structural patterns in the development of the scientific agenda on renewable energy integration risks and clarified the logic behind its transformation. It was shown that the modern scientific field is characterized by a shift from regulatory and policy issues to engineering challenges of ensuring the stability of energy systems under uncertainty, where solutions that ensure flexibility, controllability, and synthetic inertia play a key role. The proposed systemic relevance index expands the analytical capabilities of the bibliometric approach, enabling a transition from describing the structure of scientific knowledge to quantifying and comparing priorities. Its application demonstrates that interdisciplinary strategies integrating optimization, forecasting, and management methods are acquiring the greatest systemic significance. A comparison of scientific priorities with investment practices reveals heterogeneity in their alignment: alongside areas where scientific and market logic are converging, there remain areas where scientific knowledge outpaces the scale of implementation. This indicates the existence of a “window of opportunity” for targeted support of technologies that have high systemic potential but have not yet reached the stage of mature diffusion.

Overall, the obtained results allow us to consider the risk management of renewable energy integration as a systemic optimization task that requires the coordination of research priorities, technological development, and investment policy.

References

1. IEA. Renewables 2024: Analysis and Forecast to 2030. – Paris: IEA, 2024.
2. IEA. World Energy Outlook 2023. – Paris: IEA, 2023.
3. Lund H., Østergaard PA, Connolly D., Mathiesen BV Smart energy and smart energy systems // Energy. – 2017. – Vol. 137. – P. 556-565.
4. Ela E. Operating reserves and variable generation / E. Ela, M. Milligan, B. Kirby // NREL Technical Report TP-5500-51978. – 2011.
5. Impram S. Challenges of renewable energy penetration on power system flexibility: a literature review / S. Impram, SV. Nese, B. Oral // Energy Strategy Reviews. – 2020. – Vol. 31. – P. 100539.
6. Power electronics – the key technology for renewable energy system integration / F. Blaabjerg et al // Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC). – 2016. – P. 6-14.
7. Dreidy M. Inertia response and frequency control techniques for renewable energy sources: a review / M. Dreidy, H. Mokhlis, S. Mekhilef // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – Vol. 69. – P. 144-155.
8. Foundations and challenges of low-inertia systems / F. Milano et al // 20th Power Systems Computation Conference (PSCC). – Dublin, 2018.
9. Ulbig A. Impact of low rotational inertia on power system stability and operation / A. Ulbig, T.S. Borsche, G. Andersson // IFAC Proceedings. – 2014. – Vol. 47(3). – P. 7290-7297.

10. Du W. Weak dynamic problem of a grid-connected DFIG wind turbine caused by open-loop modal coupling / W. Du, Q. Fu, HF. Wang // IEEE Transactions on Sustainable Energy. – 2019. – Vol. 10(4). – P. 1769-1781.
11. ENTSO-E. Frequency Stability Evaluation Criteria for the Synchronous Zone of Continental Europe. – Brussels: ENTSO-E, 2022.
12. Achieving a 100% renewable grid / B. Kroposki et al // IEEE Power and Energy Magazine. – 2017. – Vol. 15(2). – P. 61-73.
13. Ghosh S. Distribution voltage regulation through active power curtailment with PV inverters / S. Ghosh, S. Rahman, M. Pipattanasomporn // IEEE Transactions on Smart Grid. – 2018. – Vol. 9(2). – P. 1269-1279.
14. On the path to SunShot: emerging issues and challenges in integrating solar with the distribution system / B. Palmintier et al // NREL Technical Report TP-5D00-65331. – 2016.
15. van Eck NJ. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping / van NJ. Eck, L. Waltman // Scientometrics. – 2010. – Vol. 84(2). – P. 523-538.
16. Zhu J. A bibliometric analysis of research trends in renewable energy integration: 2000-2020 / J. Zhu, Y. Li // Renewable Energy. – 2022. – Vol. 185. – P. 1-12.
17. Incorporating massive scenarios in transmission expansion planning with high renewable energy penetration / Z. Zhuo et al // Applied Energy. – 2018. – Vol. 220. – P. 745-757.
18. On the methodological framework of composite indicators / S. Greco et al // Social Indicators Research. – 2019. – Vol. 141(2). – P. 637-676.
19. IRENA. Innovation Landscape for a Renewable-Powered Future. – Abu Dhabi: IRENA, 2023.
20. IRENA. Renewable Power Generation Costs in 2023. – Abu Dhabi: IRENA, 2024.
21. IEC 62898-1:2017. Microgrids – Part 1: Guidelines for microgrid projects planning and specification. – Geneva: IEC, 2017.
22. IEEE 1547-2018. Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources. – New York: IEEE, 2018.
23. Mammadova G. Innovative construction technologies for smart villages: Case study Karabakh / G. Mammadova, S. Akbarova // Communications in Computer and Information Science. – 2025. – Vol. 2226. – P. 18-31.
24. Akbarova S. Trends of energy performance certification of buildings in Azerbaijan / S. Akbarova // International Journal of Engineering and Technology (UAE). – 2018. – Vol. 7(3.11). – P. 563-566.
25. Mammadova G. Building certification methods applied in Azerbaijan / G. Mammadova, S. Akbarova // Urbanism Architecture Constructions. – 2024. – Vol. 15(3). – P. 245-254.

С.М. Акбарова
Әзірбайжан сәулет және құрылыс университеті,
Баку, А.Султанова-11, AZ1073, Әзірбайжан
e-mail: samira.akbarova@azmiu.edu.az

ЖАҢАРТЫЛАТЫН ЭНЕРГИЯНЫ ИНТЕГРАЦИЯЛАУ ТӘУЕКЕЛДЕРІНДЕГІ ҒЫЛЫМИ ДИСКУРС ЖӘНЕ ИНВЕСТИЦИЯЛЫҚ БАСЫМДЫҚТАРДЫҢ ЭВОЛЮЦИЯСЫ: БИБЛИОМЕТРИЯЛЫҚ ТАЛДАУ

Мақалада жаңартылатын энергия көздерін интеграциялау тәуекелдерін ғылыми түсіну құрылымы талданады. Web of Science дерекқорының (2015–2025) 4823 басылымының библиометриялық талдауы негізінде үш тұрақты тақырыптық кластер анықталды және белгісіздік жағдайында жүйені оңтайландыру парадигмасының басымдығы көрсетілді. Зерттеудің ғылыми жаңалығы жүйенің өзектілік индексін – библиометриялық желінің топологиясына негізделген тәуекелдерді азайту стратегияларын сандық бағалауға арналған метриканы әзірлеуде жатыр; ғылыми басымдықтар мен инвестициялық тәжірибе арасындағы алшақтық анықталды: бірқатар технологиялар үшін ол нормаланған шкала бойынша +0,6-ға жетеді. Үш кезеңдегі (2015-2018; 2019-2021; 2022-2025) жарияланымдардың динамикалық талдауы зерттеу күн тәртібіндегі реттеуші тәсілдерден жүйелік тәуекелдерді инженерлік басқаруға ауысуды тіркеді. Тор түзетін инверторлар мен машиналық оқыту алгоритмдері ғылыми салада орталық орын алатыны, нарыққа енуден 5–10 жылға озып кететіні көрсетілген, бұл инвестициялық саясаттың перспективалы бағыттарын көрсетеді.

Түйін сөздер: *жаңартылатын энергия көздерін интеграциялау, жүйелік тәуекелдер, библиометриялық талдау, энергияны сақтау, жүйені оңтайландыру, белгісіздіктерді басқару.*

С.М. Акбарова
Азербайджанский университет архитектуры и строительства,
Азербайджан, г. Баку, А. Султанова-11, AZ1073
e-mail: samira.akbarova@azmiu.edu.az

ЭВОЛЮЦИЯ НАУЧНОГО ДИСКУРСА И ИНВЕСТИЦИОННЫХ ПРИОРИТЕТОВ В ОБЛАСТИ РИСКОВ ИНТЕГРАЦИИ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ: БИБЛИОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

В статье анализируется структура научного понимания рисков интеграции возобновляемых источников энергии. На основе библиометрического анализа 4823 публикаций базы данных Web of Science (2015-2025) были выявлены три устойчивых тематических кластера и продемонстрировано доминирование парадигмы системной оптимизации в условиях неопределенности. Научная новизна исследования заключается в разработке индекса релевантности системы – показателя для количественного ранжирования стратегий снижения рисков на основе топологии библиометрической сети; был выявлен разрыв между научными приоритетами и инвестиционной практикой: для ряда технологий он достигает +0,6 по нормализованной шкале. Динамический анализ публикаций за три периода времени (2015-2018; 2019-2021; 2022-2025) выявил сдвиг в программе исследований от нормативных подходов к инженерному менеджменту.

Автор туралы ақпарат

Самира Мисирхан Акбарова – техника ғылымдарының кандидаты, Инженерлік жүйелерді құру кафедрасы. Әзірбайжан сәулет және құрылыс университеті, Баку, Әзірбайжан; e-mail: samira.akbarova@azmiu.edu.az. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0916- 7734.

Information about the author

Samira Misirkxan Akbarova – Candidate of technical sciences, Department of Construction of Engineering systems. Azerbaijan University of Architecture and Construction, Baku, Azerbaijan; e- mail: samira.akbarova@azmiu.edu.az. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0916- 7734.

Сведения об авторах

Самира Мисирхан Акбарова – кандидат технических наук, кафедра создания инженерных систем, Азербайджанский университет архитектуры и строительства, Баку, Азербайджан; e-mail: samira.akbarova@azmiu.edu.az. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0916-7734.

Received 28.04.2026
Revised 12.05.2026
Accepted 12.06.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-64

CC BY 4.0
Check for updates

IRSTI: 55.20.19

L.G. Sulyubayeva[1], D.R. Baizhan[1,2], N.E. Berdimuratov[1], B.A. Alibekova[1]*
[1]Research Center Surface Engineering and Tribology, Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, 070002, Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk, Shakarima 148
[2]Shakarim University, 071412, Republic of Kazakhstan, Semey, 20 A Glinka Street
*e-mail: balymalibekova304@gmail.com

INFLUENCE OF MICRO-ARC OXIDATION PROCESSING PARAMETERS ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF ALUMINOSILICATE COATINGS FORMED ON AMG6 ALUMINUM ALLOY

Abstract: *The work presents a comprehensive study of the formation processes, structure, phase composition, and performance properties of oxide coatings produced on the AMG6 aluminum alloy by the micro-arc oxidation method. The treatment was carried out using a laboratory setup equipped with a pulsed power supply and a temperature control system, ensuring stable electrical and thermal regimes. The use of silicate-alkaline electrolytes of various compositions made it possible to purposefully control the morphology*

©L.G. Sulyubayeva, D.R. Baizhan, N.E. Berdimuratov, B.A. Alibekova, 2026

and properties of the coatings. Scanning electron microscopy and energy-dispersive analysis revealed the formation of multilayer oxide coatings with a dense inner barrier layer and a well-developed porous outer layer. The coating thickness ranged from 27-33 μm. X-ray diffraction analysis confirmed the formation of crystalline modifications of aluminum oxide and the aluminosilicate phase mullite under energy-intensive processing conditions. Tribological tests demonstrated that the different MAO regimes provide distinct functional advantages. The Al-3 coating exhibited the lowest coefficient of friction (0.45-0.50), whereas the Al-1 coating showed the smallest wear area. Electrochemical measurements further demonstrated that Al-1 exhibited the highest corrosion resistance, characterized by the lowest corrosion current density among the investigated coatings. These results indicate that the optimal MAO regime should be selected according to the specific tribological and corrosion requirements of the intended application.

Key words: *micro-arc oxidation, AMG6 aluminum alloy, oxide coatings, tribological properties, corrosion resistance.*

Introduction

Improving the performance characteristics of metallic materials is an important task of modern industry, especially for components operating under high mechanical, thermal, and chemical loads. To enhance wear resistance and corrosion resistance, various surface modification methods are widely used, among which micro-arc oxidation (MAO), also known as anodic spark oxidation, is particularly effective [1, 2].

MAO is an electrochemical process that occurs in an aqueous electrolyte under the action of high-voltage pulsed current and is accompanied by the generation of micro-discharges, local melting, and rapid crystallization of the material. As a result, strong ceramic oxide coatings with a complex phase composition are formed, the properties of which are determined by the electrical parameters, electrolyte composition, and process temperature [3-6].

The stability of the MAO process and the quality of the coatings largely depend on thermal control, since the process is accompanied by intense heat generation. The use of setups with controlled heating and cooling systems makes it possible to ensure the reproducibility of processing regimes, regulate the growth and morphology of the oxide layer, and reduce the number of defects [7-11].

Despite numerous studies on the micro-arc oxidation of aluminum alloys, the influence of MAO processing parameters on the structure and properties of aluminosilicate coatings formed on AMG6 aluminum alloy remains insufficiently investigated. In particular, limited information is available regarding the combined effect of electrolyte composition and electrical processing parameters on coating formation, phase composition, tribological behavior, and corrosion resistance. The aim of this study is to investigate the influence of micro-arc oxidation processing parameters on the structure, phase composition, tribological performance, and corrosion properties of aluminosilicate coatings formed on AMG6 aluminum alloy. The scientific novelty of this work lies in the comparative analysis of different MAO regimes and in establishing their influence on the microstructure, phase composition, tribological characteristics, and corrosion resistance of aluminosilicate coatings. It should be noted that the investigated MAO regimes differ in both electrolyte composition and electrical processing parameters; therefore, this study compares complete processing regimes rather than the isolated influence of individual variables.

Materials and methods of research

The substrate material used in this study was AMG6 aluminum alloy, which is widely employed in aerospace and mechanical engineering applications due to its high specific strength and excellent corrosion resistance. Specimens with dimensions of 30 × 15 × 2 mm were prepared for the experiments. The chemical composition of the alloy is presented in Table 1. Prior to micro-arc oxidation (MAO), the specimen surfaces were mechanically ground using SiC abrasive papers up to P2000 grit. The specimens were subsequently degreased in an alkaline solution at 40–60 °C, rinsed thoroughly with tap water followed by distilled water, and dried in air.

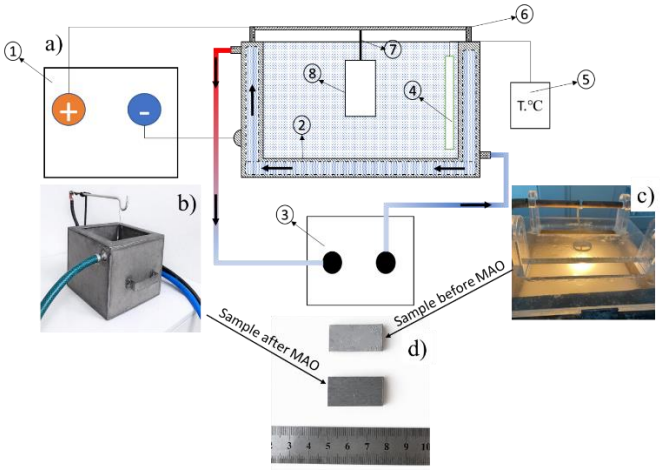
Table 1 – Chemical composition of aluminum AMG6, %

Fe	Si	Mn	Ti	Al	Cu	Be	Mg	Zn	impurities
up to 0.4	up to 0.4	0.5-0.8	0.02-0.1	91.1-93.68	up to 0.1	0.0002-0.005	5.8-6.8	up to 0.2	others, each 0.05; total 0.1

Micro-arc oxidation (MAO) was carried out using a laboratory-scale MAO system equipped with a pulsed power supply (JX-MAO, Lanzhou Jingxin Power Supply Co., Ltd., China), an electrolytic bath, an electrolyte circulation and cooling system, a heat exchanger, and a temperature controller (Figure 1). During the MAO process, the AMG6 aluminum alloy specimen served as the anode, while the stainless-steel electrolytic bath acted as the cathode. The cathode-to-anode surface area ratio was approximately 10:1, ensuring stable micro-arc discharge behavior. The specimens were mounted in a holder and fully immersed in the electrolyte to ensure uniform coating formation.

The electrolyte temperature was maintained at 25-30°C by the circulation and cooling system, while the electrolyte pH was in the range of 12-13 and the electrical conductivity was approximately 18-22 mS/cm. The power supply operated in unipolar pulse mode with a rectangular pulse shape. The pulse repetition rate was 200 Hz, with a duty cycle of 55%, corresponding to a pulse duration of 2.75 ms and a pause duration of 2.25 ms. Control was performed in current stabilization mode; the current density values for each mode are presented in Table 2. The pulsed power supply regulated the applied current throughout the oxidation process. Localized micro-arc discharges generated on the specimen surface promoted the growth of ceramic oxide coatings.

Figure 1 shows the schematic diagram of the MAO system (Figure 1a), the laboratory electrolytic bath (Figure 1b), the micro-arc oxidation process (Figure 1c), and the appearance of the AMG6 aluminum alloy specimens before and after treatment (Figure 1d). Following MAO, the specimen surface changed from metallic to light gray, indicating the formation of an oxide coating. Different MAO regimes were employed by varying both the electrolyte composition and the electrical processing parameters to investigate their effects on the microstructure and properties of the resulting coatings.



(a) basic diagram of the micro-arc oxidation installation; (b) general view of the laboratory electrolytic bath used for micro-arc oxidation of aluminum; (c) photograph of the MAO process during treatment; (d) appearance of aluminum specimens before and after MAO treatment

Figure 1 – Installation for MAO of aluminum samples:

During the treatment, a ceramic porous-sintered coating was formed. The morphology and phase composition of the coatings were studied using SEM/EDS and X-ray diffraction analysis, while the tribological and corrosion properties were evaluated using the «ball-disk» method and potentiodynamic measurements. Wear resistance was assessed using a ball-on-disk configuration on an Anton Paar TRB3 tribometer in accordance with ASTM G99 under a normal load of 6 N and a sliding speed of 3 cm/s, employing a Si_3N_4 ball with a diameter of 6 mm. The wear track radius was 6 mm. Tribological tests were conducted in a 3.5 wt.% NaCl solution at room temperature. Electrochemical corrosion tests were carried out using potentiodynamic polarization measurements in a 3.5 wt.% NaCl aqueous solution, which simulates a chloride-containing corrosive environment. The temperature of the electrolyte during the measurements was maintained at 25 ± 2°C. For comparison, the initial AMG6 alloy and three samples with MAO coatings (Al-1, Al-2 and Al-3) were investigated. All quantitative experiments were performed in triplicate (n = 3) under identical experimental conditions. The numerical results presented in the tables and graphs are reported as mean values ± standard deviation.

Results and discussion

The coatings Al-1, Al-2 and Al-3 correspond to different micro-arc oxidation regimes presented in Table 2, which allows evaluation of the influence of electrolyte composition and electrical parameters on the morphology and properties of the coatings.

Table 2 – Micro-arc oxidation regimes used for coating formation

Sample	Electrolyte composition	Voltage (V)	Frequency (Hz)	Current density (A/dm²)	Treatment time (min)	Coating thickness, μm
Al-1	20 g/L Na_2SiO_3 + 10 g/L KOH	350	200	4.75	20	33
Al-2	20 g/L Na_2SiO_3 + 10 g/L NaOH	250	200	3.25	20	27
Al-3	20 g/L Na_2SiO_3 + 10 g/L NaOH + $Na_2S_2O_3$	350	200	4.25	20	29

The investigated samples differ simultaneously in electrolyte composition and electrical parameters. Therefore, the present work compares integrated MAO processing regimes rather than evaluating the influence of a single processing parameter. Therefore, the present work compares complete MAO processing regimes rather than the isolated effect of individual variables. The selection of electrolyte compositions and micro-arc oxidation processing regimes was based on their expected influence on coating formation, discharge stability, phase composition, and functional properties. Sodium silicate (Na_2SiO_3) was used as the main electrolyte component because it provides silicon-containing species that participate in the formation of aluminosilicate phases and promote the growth of ceramic oxide coatings. KOH and NaOH were selected to create a strongly alkaline environment, increase the electrical conductivity of the electrolyte, and ensure stable micro-arc discharges during processing. The addition of $Na_2S_2O_3$ to the electrolyte for the Al-3 sample was intended to evaluate its effect on coating morphology, porosity, phase formation, and corrosion resistance.

The selected values of voltage, current density, frequency, and treatment time ensured stable micro-arc oxidation without excessive coating damage or burning. A treatment duration of 20 min was sufficient for the formation of continuous oxide coatings, while the chosen ranges of voltage and current density allowed comparison of coatings formed under different energy input conditions. Therefore, the selected electrolyte compositions and processing regimes made it possible to evaluate the relationship between processing parameters, coating structure, phase composition, tribological behavior, and corrosion resistance. As a result of micro-arc oxidation, oxide coatings with a porous-sintered morphology are formed on the surface of the AMG6 aluminum alloy. Na_2SiO_3 was selected as a silicon source for the formation of aluminosilicate phases. NaOH and KOH were used to create the required alkaline environment and to ensure stable micro-arc discharges during the oxidation process. $Na_2S_2O_3$ was added to evaluate its influence on the structure and functional properties of the coatings. This morphology is caused by the localized high-temperature effect of micro-arc discharges and the rapid crystallization of the oxide material. During the coating growth, a system of pores and discharge channels is formed.

The coating structure is heterogeneous and includes a dense inner barrier layer and a more porous outer layer, which provide protection for the aluminum substrate and determine the surface's tribological properties, respectively.

Figures 2a-c show SEM images of the cross-sections of micro-arc oxide coatings on aluminum, obtained under different processing conditions. In all specimens, the "coating-substrate" boundary is clearly defined, indicating good adhesion and the absence of interfacial defects.

The Al-1 specimen exhibits the thickest coating (33 μm) with a relatively dense structure. The Al-2 specimen has the thinnest coating (27 μm), whereas the Al-3 specimen has an intermediate thickness (29 μm) and a more developed porous outer layer.

Figure 3 presents EDS elemental maps and line-scan profiles obtained across the coating cross-sections. For all samples, oxygen is concentrated mainly within the coating layer, confirming the formation of oxide phases, whereas aluminum is predominantly detected in the substrate region. The Al-3 sample exhibits a noticeably higher silicon concentration in the coating compared to Al-1 and Al-2, indicating a more intensive incorporation of silicon-containing species from the electrolyte

into the growing oxide layer. The elemental profiles also reveal a gradual transition between the coating and substrate, suggesting good adhesion and the absence of significant interfacial discontinuities.

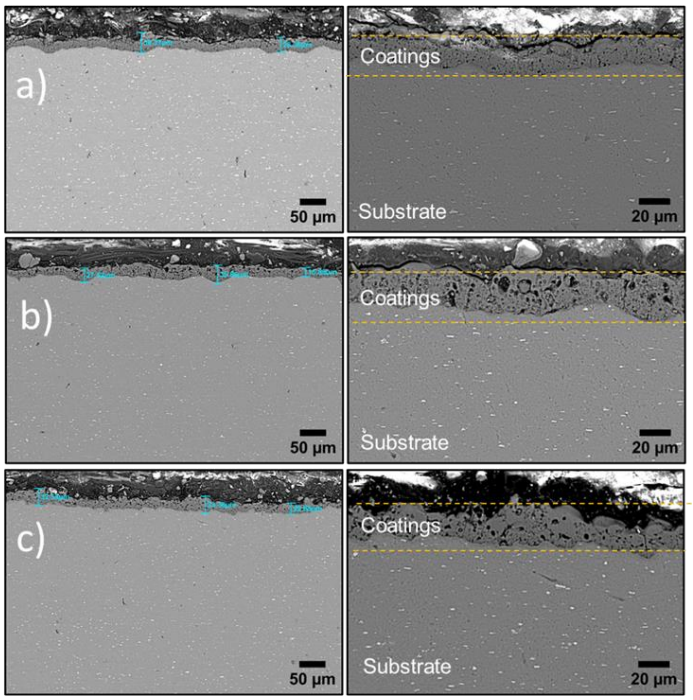


Figure 2 – Cross-sectional SEM micrographs of MAO coatings formed on AMG6 aluminum alloy: (a) Al-1, (b) Al-2, and (c) Al-3

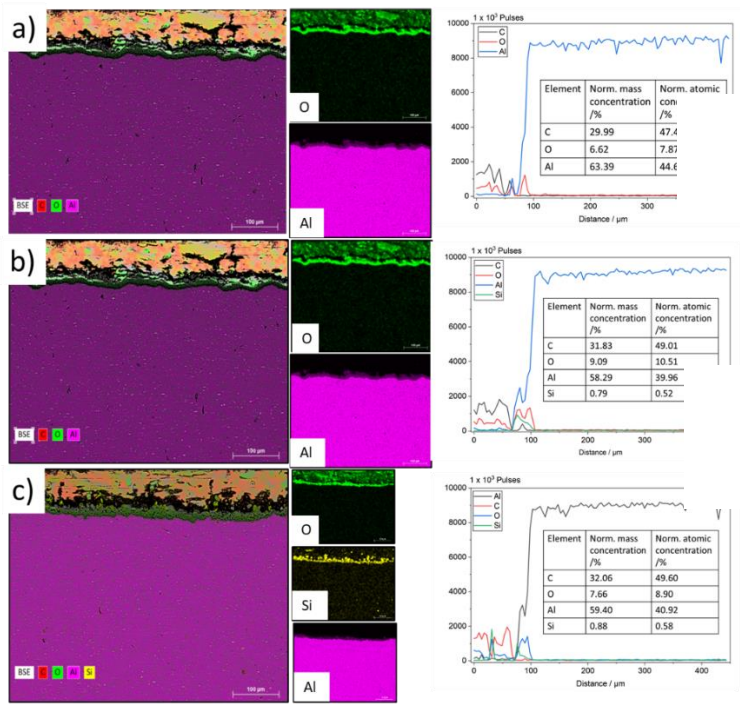


Figure 3 – Cross-sectional EDS elemental maps and line-scan profiles of MAO coatings formed on AMG6 aluminum alloy: (a) Al-1, (b) Al-2, and (c) Al-3

The quantitative EDS results for the Al-1, Al-2, and Al-3 coatings are summarized in Table 3. The elemental composition of all coatings is dominated by C, Al, and O. The Al-1 coating contains 47.47 at.% C, 7.87 at.% O, and 44.67 at.% Al. For the Al-2 and Al-3 coatings, a small amount of Si was additionally detected, reaching 0.52 and 0.58 at.%, respectively. The highest Si content was

observed in the Al-3 coating, indicating a greater incorporation of silicon-containing species from the electrolyte into the coating during the MAO process. These quantitative EDS results complement the elemental distribution presented in Figure 3 and confirm differences in the chemical composition of the coatings formed under different MAO regimes.

Table 3 – Elemental composition of MAO coatings determined by EDS analysis, at.%

Sample	C	O	Al	Si
Al-1	47.47%	7.87%	44.67%	
Al-2	49.01%	10.51%	39.96%	0.52%
Al-3	49.60%	8.90%	40.92%	0.58%

Figure 4 shows the X-ray diffractograms of micro-arc oxide coatings on the AMG6 aluminum alloy, obtained under different processing conditions. In all specimens, intense reflections of metallic aluminum are observed, resulting from the contribution of the substrate during the analysis of thin oxide layers.

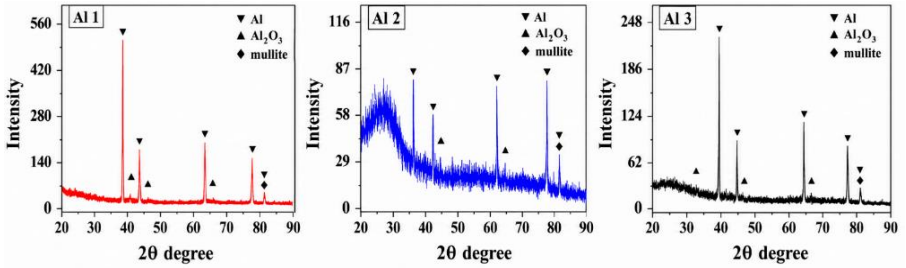


Figure 4 – X-ray diffraction patterns of MAO coatings formed on AMG6 aluminum alloy under different processing conditions

For all coatings, diffraction lines of Al_2O_3 were observed, confirming the formation of a ceramic oxide layer. The Al-1 specimen is characterized by a high degree of coating crystallinity, whereas Al-2 exhibits a partially amorphous structure, manifested by peak broadening and reduced intensity. In the diffractogram of the Al-3 specimen, additional peaks of the aluminosilicate mullite phase ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) are detected, indicating the active involvement of silicon-containing electrolyte components under energy-intensive processing conditions.

Overall, the results of the X-ray phase analysis demonstrate the possibility of purposeful control over the phase composition and degree of crystallinity of micro-arc oxide coatings on the AMG6 aluminum alloy.

Figure 5a shows the dependence of the coefficient of friction on the sliding distance for micro-arc oxide coatings obtained under different processing conditions. All specimens exhibit a run-in stage followed by the establishment of a quasi-stationary friction regime. The Al-1 specimen demonstrates the highest and most unstable coefficient of friction (0.8-0.85). Considering that Al-1 has the greatest coating thickness (33 μm) and a relatively dense structure, its friction behavior cannot be attributed to a thinner coating and may instead be associated with differences in surface morphology, phase composition, and coating–counterbody interaction during sliding.

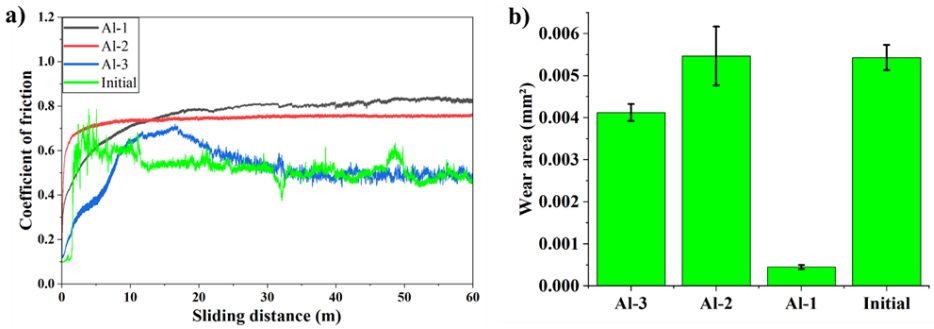


Figure 5 – Tribological characteristics of MAO coatings:
(a) coefficient of friction versus sliding distance; (b) wear area after ball-on-disk testing

For the Al-2 specimen, the coefficient of friction stabilizes rapidly and remains nearly constant, whereas the lowest values are observed for the Al-3 specimen, whose coefficient of friction stabilizes at 0.45-0.5 due to its well-developed porous structure and the presence of aluminosilicate phases.

The wear area (Figure 5b) does not strictly correlate with the friction coefficient. Although the Al-1 specimen exhibits the highest coefficient of friction, it demonstrates the smallest wear area, which can be attributed to the relatively dense structure of the coating and its higher resistance to material removal during sliding. The absence of a direct correlation between the friction coefficient and wear area indicates that wear resistance is mainly governed by the structural integrity and density of the oxide layer rather than by the friction coefficient alone.

In this work, wear resistance was evaluated based on the wear area measured after ball-on-disk testing. A decrease in the wear area corresponds to an increase in wear resistance; therefore, the reported improvement of more than two times refers to the reduction of the wear area compared with the initial alloy.

Overall, the results confirm that the micro-arc oxidation regimes significantly influence the tribological properties of the coatings. Different processing regimes provide different functional advantages depending on the intended application, owing to differences in coating morphology and phase composition.

The base AMG6 aluminum alloy has limited corrosion resistance, due to the presence of a thin and unstable natural oxide film, which is easily degraded in aggressive environments.

Potentiodynamic polarization curves (Figure 6) show that all micro-arc oxide coatings are in a passive state, confirming the formation of a protective oxide layer. The Al-1 specimen is characterized by the lowest corrosion current density and the most pronounced barrier effect, whereas Al-2 exhibits the poorest protective properties, which is associated with the increased porosity of the coating. The Al-3 specimen occupies an intermediate position and demonstrates enhanced corrosion resistance compared to Al-2 due to its denser inner layer and modified phase composition.

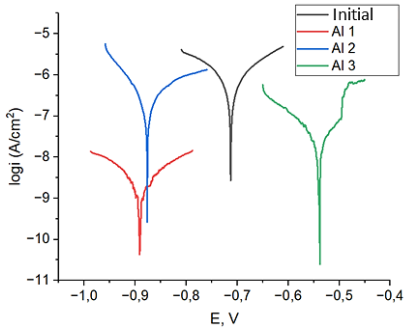


Figure 6 – Potentiodynamic polarization curves of microarc oxide coatings on aluminum alloy AMG6 for samples Al-1, Al-2 and Al-3

Overall, the results confirm that changing the micro-arc oxidation regimes allows for effective control of the coatings' corrosion-resistant properties. Among the investigated coatings, Al-1 exhibited the highest corrosion resistance, whereas Al-3 demonstrated improved corrosion performance compared with Al-2. Therefore, the selection of the optimal processing regime should be based on the required service conditions.

The corrosion current density (icorr) was calculated by normalizing the corrosion current (Icorr) to the exposed surface area of the sample. The corrosion rate (CR) was determined using the standard electrochemical relationship based on the measured current density, equivalent weight, and density of the material.

Table 4 presents the electrochemical parameters of the specimens, calculated from the results of potentiodynamic measurements, which allow for a quantitative assessment of the corrosion resistance of the micro-arc oxide coatings. The base AMG6 alloy is characterized by the highest values of corrosion current density and corrosion rate, indicating the low effectiveness of its natural passive film.

Table 4 – Electrochemical corrosion parameters of micro-arc oxide coatings on AMG6 aluminum alloy (EW – equivalent weight, g; ρ – density, g/cm³; A – exposed surface area, cm²; Icorr – corrosion current, A; icorr – corrosion current density, A/cm²; CR – corrosion rate, mm/year)

Samples	Initial	Al – 1	Al – 2	Al – 3
EW=	9	9	9	9
p=	2.7	2.7	2.7	2.7
A=	0.64	0.64	0.64	0.64
Icorr =	0.0011003	0.00010001	0.0007216	0.00027907
icorr =	0.001719219	0.000156266	0.0011275	0.000436047
CR=	1.87395E-05	1.7033E-06	1.22898E-05	4.75291E-06

The minimum values of these parameters are observed for the Al-1 specimen, indicating the most pronounced barrier properties of the coating and a slowdown of electrochemical processes. The Al-2 specimen exhibits increased corrosion activity, associated with the well-developed porosity of the coating and reduced protective capability. The Al-3 specimen occupies an intermediate position, showing higher corrosion resistance compared to Al-2 due to the optimal combination of a dense inner layer and a functional outer layer.

Overall, the data in the table confirm that the micro-arc oxidation regimes significantly affect the corrosion resistance of the AMG6 aluminum alloy and the effectiveness of the protective coatings.

Conclusions

The obtained results indicate that different micro-arc oxidation processing regimes provide different functional advantages. The Al-3 coating exhibited the lowest coefficient of friction, whereas the Al-1 coating demonstrated the smallest wear area and the highest corrosion resistance. Therefore, the selection of the optimal coating formation regime should be based on the specific service conditions and the required combination of tribological and corrosion properties.

X-ray phase analysis revealed the formation of Al_2O_3 phases in all coatings, whereas the Al-3 sample additionally exhibited the presence of the aluminosilicate mullite phase ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$).

Tribological tests demonstrated a reduction in the coefficient of friction after micro-arc oxidation treatment. The lowest values were observed for the Al-3 sample (0.45-0.50), whereas the coefficient of friction for Al-1 ranged from 0.80 to 0.85. In addition, the wear area decreased by more than two times compared with the untreated alloy.

Electrochemical measurements revealed a significant improvement in corrosion resistance after micro-arc oxidation treatment. The lowest corrosion current density was obtained for the Al-1 coating (1.56×10^{-4} A/cm²), compared with 1.72×10^{-3} A/cm² for the untreated alloy.

It was established that the electrolyte composition and processing parameters significantly influence the morphology, phase composition, tribological behavior, and corrosion resistance of the coatings. Different processing regimes provided different functional advantages, indicating that the optimal coating should be selected according to the specific service requirements.

References

1. Suminov I.V. Plasma-electrolytic modification of metal and alloy surfaces. Vol. 2 / I.V. Suminov et al. – Moscow: Technosphere, 2011.
2. Analysis on corrosion of aluminum-based micro-arc oxidation coating / Y. Yang et al // Anti-Corrosion Methods and Materials. – 2021. – Vol. 68, № 5. – P. 305-314.
3. Ovchinnikov B.B. Anodic micro-arc oxidation of aluminum pistons: features of thermal protective coating deposition technology / B.B. Ovchinnikov, V.Ya. Zelinskii // Liteinoe Proizvodstvo. – 2004. – Vol. 1, № 29. – P. 112-116.
4. Effect of high-temperature oxidation prefab film on formation of micro-arc oxidation coatings on 6061 aluminum alloy / D. Shen et al // Applied Surface Science. – 2013. – Vol. 265. – P. 431-437.
5. Dong Y. The research progress on micro-arc oxidation of aluminum alloy / Y. Dong, Z. Liu, G. Ma // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 729, № 1. – Art. 012055.
6. Study of optical characteristics of microdischarges in the micro-arc oxidation process / E.A. Pecherskaya et al // Vacuum. – 2024. – Vol. 229. – Art. 113558.

7. Research on micro-arc oxidation method based on passivation layer on non-valve metal low-carbon steel surface / S. Sun et al // Tribology International. – 2024. – Vol. 200. – Art. 110114.
8. Electrophysical model of the micro-arc oxidation process / P.E. Golubkov et al // Russian Physics Journal. – 2020. – Vol. 62, № 11. – P. 2137-2144.
9. Malyshev V.N. Modification of friction knots work surfaces on the basis of microarc oxidation method / V.N. Malyshev // International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology. – 2016. – Vol. 2, № 4. – P. 464-480.
10. Micro-arc oxidation of aluminum alloys: mechanism, defects, and corrosion resistance / X. Liu et al // Advanced Engineering Materials. – 2025. – Vol. 27, № 10. – Art. 2402748.
11. High-quality oxide layers on Al alloy by micro-arc oxidation using hybrid voltages / Q.-P. Tran et al // Surface and Coatings Technology. – 2016. – Vol. 303. – P. 61-67.
12. Influence of TiO_2 nanoparticle concentration on micro-arc oxidized calcium–phosphate coatings: corrosion resistance and biological response / A. Zhassulan et al // Coatings. – 2025. – Vol. 15, № 10. – Art. 1142.

Acknowledgment

This research has been funded by the Committee of Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. BR24992879).

Л.Г. Сулюбаева[1], Д.Р. Байжан[1,2], Н.Е. Бердімуратов[1], Б.Ә. Әлібекова[1]*
[1]Беттік инженерия және трибология ғылыми-зерттеу орталығы,
Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті,
070002, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ., Шәкәрім көшесі, 148
[2]Шәкәрім атындағы университет,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинка көшесі, 20А
*e-mail: balymalibekova304@gmail.com

АМГ6 АЛЮМИНИЙ ҚОРЫТПАСЫНДА ҚАЛЫПТАСҚАН АЛЮМОСИЛИКАТТЫ ЖАБЫНДАРДЫҢ ҚҰРЫЛЫМЫ МЕН ҚАСИЕТТЕРІНЕ МИКРОДОҒАЛЫҚ ОКСИДТЕУ ПАРАМЕТРЛЕРІНІҢ ӘСЕРІ

Бұл жұмыста микродоғалық оксидтеу әдісімен АМГ6 алюминий қорытпасы бетінде алынған оксидті жабындардың қалыптасу процестері, құрылымы, фазалық құрамы және пайдалану қасиеттері кешенді түрде зерттелді. Өңдеу электрлік және жылулық режимдердің тұрақтылығын қамтамасыз ететін импульстік қорек көзі мен температураны бақылау жүйесі бар зертханалық қондырғыда жүргізілді. Құрамы әртүрлі силикатты-сілтілі электролиттерді қолдану жабындардың морфологиясы мен қасиеттерін мақсатты түрде басқаруға мүмкіндік берді. Растрлық электрондық микроскопия және энергодисперсиялық талдау әдістері тығыз ішкі тосқауылдық қабаты және дамыған кеуекті сыртқы қабаты бар көпқабатты оксидті жабындардың қалыптасуын көрсетті. Жабындардың қалыңдығы 27-33 μm аралығында болды. Рентгенфазалық талдау энергиясы жоғары өңдеу режимдерінде алюминий оксидінің кристалдық модификациялары мен алюмосиликатты муллит фазасының түзілетінін растады. Трибологиялық сынақтар микродоғалық оксидтеудің әртүрлі режимдері әртүрлі функционалдық артықшылықтарды қамтамасыз ететінін көрсетті. Al-3 жабыны үйкеліс коэффициентінің ең төмен мәнімен (0,45-0,50) сипатталса, Al-1 жабыны ең аз тозу ауданын көрсетті. Электрохимиялық өлшеулер Al-1 жабынының зерттелген жабындар арасында коррозиялық ток тығыздығының ең төмен мәнімен сипатталып, ең жоғары коррозияға төзімділікке ие екенін де көрсетті. Алынған нәтижелер микродоғалық оксидтеудің оңтайлы режимін болжанатын пайдалану жағдайларына қойылатын нақты трибологиялық және коррозиялық талаптарды ескере отырып таңдау қажеттігін көрсетеді.

Түйін сөздер: *микродоғалық оксидтеу; АМГ6 алюминий қорытпасы; оксидті жабындар; трибологиялық қасиеттер; коррозияға төзімділік.*

Л.Г. Сулюбаева[1], Д.Р. Байжан[1,2], Н.Е. Бердімуратов[1], Б.А. Алибекова[1]*
[1]Научно-исследовательский центр поверхностной инженерии и трибологии,
Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова,
070002, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск, ул. Шакарима, 148
[2]Шәкәрім университет, 071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20А
*e-mail: balymalibekova304@gmail.com

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА АЛЮМОСИЛИКАТНЫХ ПОКРЫТИЙ, СФОРМИРОВАННЫХ НА АЛЮМИНИЕВОМ СПЛАВЕ АМГ6

В работе выполнено комплексное исследование процессов формирования, структуры, фазового состава и эксплуатационных свойств оксидных покрытий, полученных на алюминиевом сплаве АМГ6 методом микродугового оксидирования. Обработка проводилась на лабораторной установке с импульсным источником питания и системой температурного контроля, обеспечивавшей стабильность электрических и тепловых режимов. Использование силикатно-щелочных электролитов различного состава позволило целенаправленно управлять морфологией и свойствами покрытий. Методами растровой электронной микроскопии и энергодисперсионного анализа установлено формирование многослойных оксидных покрытий с плотным внутренним барьерным слоем и развитым пористым внешним слоем. Толщина покрытий составляла 27-33 μm. Рентгенофазовый анализ подтвердил образование кристаллических модификаций оксида алюминия и алюмосиликатной фазы муллита при энергонасыщенных режимах обработки. Трибологические испытания показали, что различные режимы микродугового оксидирования обеспечивают разные функциональные преимущества. Покрытие Al-3 характеризовалось наименьшим коэффициентом трения (0,45–0,50), тогда как покрытие Al-1 продемонстрировало наименьшую площадь износа. Электрохимические измерения также показали, что покрытие Al-1 обладает наибольшей коррозионной стойкостью и характеризуется наименьшей плотностью коррозионного тока среди исследованных покрытий. Полученные результаты свидетельствуют о том, что оптимальный режим микродугового оксидирования следует выбирать с учетом конкретных требований к трибологическим и коррозионным свойствам для предполагаемых условий эксплуатации.

Ключевые слова: *микродуговое оксидирование; алюминиевый сплав АМГ6; оксидные покрытия; трибологические свойства; коррозионная стойкость.*

Information about authors

Laila Gylimmeddenovna Sulyubayeva – PhD, associate professor, Senior Researcher of Scientific Research Center «Surface Engineering and Tribology» at S. Amanzholov East Kazakhstan University, UstKamenogorsk, Kazakhstan; e-mail: lsulyubayeva@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1924-1459.

Daryn Rashituly Baizhan – senior Researcher at the Research Center for «Surface Engineering and Tribology» of the East Kazakhstan University named after S. Amanzholov, Ust-Kamenogorsk; doctoral student, Shakarim University, Semey, Kazakhstan; e-mail: daryn.baizhan@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9105-3129.

Nurbol Erboluly Berdimuratov – junior researcher of scientific research center «Surface engineering and tribol-ogy», Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; e-mail: nurbol.ber@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-6880-6439.

Balym Alibekovna Alibekova* – engineer of Scientific Research Center «Surface Engineering and Tribology» at Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; e-mail: balymalibekova304@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-7644-4527.

Авторлар туралы мәліметтер

Лайла Гылыммедденовна Сулюбаева – PhD, қауымдастырылған профессор, Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университетінің «Беттік инженерия және трибология» ғылыми-зерттеу орталығының аға ғылыми қызметкері, Өскемен қ., Қазақстан; e-mail: lsulyubayeva@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1924-1459.

Дарын Рашитулы Байжан – Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университетінің «Беттік инженерия және трибология» ғылыми-зерттеу орталығының аға ғылыми қызметкері, Өскемен; докторант, Shakarim University, Семей, Қазақстан; e-mail: daryn.baizhan@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9105-3129.

Нұрбол Ерболұлы Бердімуратов – Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университетінің «Беттік инженерия және трибология» ғылыми-зерттеу орталығының кіші ғылыми қызметкері, Өскемен қаласы, Қазақстан; e-mail: nurbol.ber@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-6880-6439.

Балым Әлібекқызы Әлібекова* – Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университетінің «Беттік инженерия және трибология» ғылыми-зерттеу орталығының инженері, Өскемен, Қазақстан; e-mail: balymalibekova304@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-7644-4527.

Сведения об авторах

Лайла Гылыммедденовна Сулюбаева – PhD, ассоциированный профессор, старший научный сотрудник научно-исследовательского центра «Инженерия поверхностей и трибология» Восточно-Казахстанского университета имени С. Аманжолова, г. Усть-Каменогорск, Казахстан; e-mail: lsulyubayeva@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1924-1459.

Дарын Рашитулы Байжан – старший научный сотрудник научно-исследовательского центра «Инженерия поверхности и трибология» Восточно-Казахстанского университета имени Сарсена Аманжолова, Усть-Каменогорск; докторант, Shakarim University, Семей, Казахстан; e-mail: daryn.baizhan@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9105-3129.

Нурбол Ерболулы Бердимуратов – младший научный сотрудник научно-исследовательского центра «Инженерия поверхности и трибология», Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова, г. Усть-Каменогорск, Казахстан; e-mail: nurbol.ber@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-6880-6439.

Балым Алибековна Алибекова* – инженер научно-исследовательского центра «Инженерия поверхности и трибология» Восточно-Казахстанского университета имени Сарсена Аманжолова, Усть-Каменогорск, Казахстан; e-mail: balymalibekova304@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-7644-4527.

Received 08.04.2026
Revised 18.08.2026
Accepted 25.08.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-65

CC BY 4.0
Check for updates

МРНТИ: 29.17.19

А.А. Ахметов*, М.В. Ермоленко, О.А. Степанова
Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А
*e-mail: akhmetov_alikhan@bk.ru

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОПТИМИЗАЦИИ ОРОСИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ РАСПЫЛЕНИЯ: ОБЗОР

Аннотация: *В статье представлен обзор современных исследований, посвящённых гидродинамическим и теплофизическим аспектам работы оросительных и распылительных устройств в технических системах. Цель работы заключается в систематизации научных представлений о влиянии конструктивных, режимных и теплофизических параметров сопел на формирование распылённого потока, равномерность орошения и эффективность тепло- и массообмена. Рассмотрены основные типы оросительных устройств, включая струйные, веерные, конусные, центробежные и пневматические распылители. Проанализировано влияние рабочего давления, расхода жидкости, геометрии проточной части, размера и скорости капель, угла раскрытия факела, плотности орошения и свойств рабочей среды на структуру капельного потока. Показано, что эффективность оросительных устройств определяется не только расходной характеристикой и давлением, но и рациональным сочетанием дисперсности распыла, устойчивости факела, равномерности распределения жидкости и условий взаимодействия капель с газовой средой, насадкой или теплообменной поверхностью. Особое внимание уделено распылительному охлаждению, где ключевое значение имеют капельный спектр, положение сопла, состояние поверхности, режим кипения и критический тепловой поток. Для градирен и испарительных систем выделена роль равномерного водораспределения как одного из определяющих факторов эффективности тепло- и массообмена. Рассмотрены возможности CFD-моделирования для анализа внутреннего течения в соплах, закручивания потока, формирования жидкой плёнки и структуры факела распыла. Сделан вывод о необходимости комплексного учёта гидродинамических, теплофизических и эксплуатационных параметров при проектировании и оптимизации оросительных устройств для градирен, испарительных охладителей, аппаратов газоочистки и установок распылительного охлаждения.*

Ключевые слова: *оросительные устройства; атомизация жидкости; тепло- и массообмен; распылительное охлаждение; CFD-моделирование.*

Введение

Оросительные и распылительные устройства широко применяются в технических системах, где требуется обеспечить эффективный контакт жидкости с газовой средой, нагретой поверхностью или зоной тепло- и массообмена. К таким системам относятся

©А.А. Ахметов, М.В. Ермоленко, О.А. Степанова, 2026

градирни, испарительные охладители, аппараты газоочистки, установки распылительного охлаждения, системы увлажнения воздуха, а также различные энергетические, климатические и промышленные аппараты. Несмотря на различие конструкций и условий эксплуатации, работа таких устройств основана на общем физическом процессе преобразовании сплошного потока жидкости в струю, плёнку или капельный факел.

В научной литературе данный процесс обычно рассматривается через понятие атомизации жидкости. Атомизация представляет собой разрушение струи или жидкой плёнки на отдельные капли под действием инерционных, вязкостных, поверхностных и аэродинамических сил. На характер распыления влияют давление перед соплом, расход жидкости, геометрия проточной части, свойства рабочей среды, а также условия взаимодействия факела с окружающим воздухом, насадкой или теплообменной поверхностью [1-6]. Поэтому оросительное устройство нельзя рассматривать только как элемент подачи воды или другой жидкости. Оно формирует структуру потока, от которой зависят последующие процессы тепло- и массообмена.

С теплофизической точки зрения особенно важны размер и скорость капель, угол раскрытия факела, плотность орошения и равномерность распределения жидкости. Уменьшение среднего размера капель увеличивает суммарную площадь межфазного контакта и может способствовать интенсификации испарения, теплоотдачи и массообмена. Однако чрезмерно мелкие капли легче уносятся воздушным потоком, быстрее теряют скорость и не всегда достигают расчётной зоны контакта. Следовательно, эффективность распыла определяется не минимальным размером капель как самоцелью, а рациональным сочетанием дисперсности, устойчивости факела и равномерности орошения.

Особое значение имеет взаимодействие капель с поверхностью. В системах распылительного охлаждения результат зависит не только от параметров истечения из сопла, но и от поведения капель после удара о нагретую стенку. Капля может растекаться, отскакивать, разрушаться или формировать жидкую плёнку, что влияет на смачивание поверхности и интенсивность отвода теплоты [7, 8]. В градирнях и испарительных охладителях, напротив, основную роль играет равномерное распределение воды по рабочему объёму аппарата и поверхности насадки. При неравномерном орошении часть зоны тепло- и массообмена используется неполностью, что снижает фактическую эффективность оборудования.

На практике параметры работы сопла тесно связаны между собой. Увеличение давления обычно повышает скорость истечения и способствует более интенсивному распаду струи или жидкой плёнки. Вместе с тем рост давления сопровождается увеличением гидравлических потерь, энергозатрат на перекачивание жидкости и риска уноса мелкодисперсных капель. Геометрия сопла, форма выходного отверстия и особенности внутреннего течения также существенно влияют на угол факела, коэффициент расхода, капельный спектр и распределение жидкости в рабочей зоне [9-12]. Следовательно, выбор и оптимизация оросительного устройства должны учитывать не один отдельный параметр, а совокупность гидродинамических, теплофизических и эксплуатационных характеристик.

В связи с этим актуальной задачей является систематизация современных исследований, посвящённых связи между конструкцией распылительных устройств, параметрами факела и эффективностью тепло- и массообмена. Такой подход позволяет перейти от простого подбора сопла по расходу или давлению к более обоснованной оценке его работы в конкретной технической системе.

Целью данной обзорной статьи является систематизация и анализ современных исследований, посвящённых влиянию конструктивных, гидродинамических и теплофизических параметров оросительных и распылительных устройств на формирование капельного потока, равномерность орошения и эффективность тепло- и массообмена в технических системах.

Для достижения поставленной цели в работе рассмотрены основные типы оросительных и распылительных устройств, проанализированы характеристики сопел и распылённого потока, обобщены данные по распылительному охлаждению, водораспределению в градирнях и применению CFD-моделирования для исследования внутреннего течения и структуры факела распыла.

Несмотря на значительное количество публикаций, посвящённых атомизации жидкости, характеристикам сопел, распылительному охлаждению и работе градирен, большинство исследований рассматривает указанные направления отдельно друг от друга. В существующих работах основное внимание, как правило, уделяется либо гидродинамике распыления, либо процессам теплообмена, либо вопросам водораспределения в конкретных технических системах.

В отличие от таких подходов, в настоящем обзоре оросительные устройства рассматриваются как элементы единой теплофизической системы, в которой гидродинамические параметры сопла непосредственно влияют на структуру капельного потока, характеристики межфазного взаимодействия и эффективность тепло- и массообмена. Особое внимание уделено взаимосвязи между внутренним течением в сопле, характеристиками факела распыла, размером и скоростью капель, равномерностью орошения и современными методами численного моделирования.

Представленный подход позволяет сформировать комплексное представление о путях оптимизации оросительных устройств в градирнях, испарительных системах, аппаратах газоочистки и установках распылительного охлаждения.

Методы исследования

Настоящая статья выполнена в формате обзорного исследования, направленного на систематизацию и анализ современных научных данных о гидродинамических и теплофизических закономерностях работы оросительных и распылительных устройств. Выбор обзорного формата обусловлен междисциплинарным характером рассматриваемой проблемы, которая объединяет вопросы атомизации жидкости, движения капельных и многофазных потоков, тепло- и массообмена, распылительного охлаждения, водораспределения в градирнях, а также численного моделирования течения в соплах.

Поиск литературных источников проводился по научным публикациям, представленным в международных базах данных и издательских платформах, включая Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink, Taylor & Francis Online и другие научные ресурсы. При поиске использовались ключевые слова и их сочетания на английском языке: atomization, spray nozzles, pressure-swirl atomizer, flat fan nozzle, droplet size distribution, spray characteristics, spray cooling, cooling tower nozzle, water distribution, heat and mass transfer, two-phase flow, CFD simulation. Дополнительно анализировались списки литературы в наиболее близких к теме обзорных, экспериментальных и расчётных работах.

В обзор включались источники, в которых оросительные и распылительные устройства рассматривались не только как элементы подачи жидкости, но и как устройства, формирующие структуру распылённого потока. Основное внимание уделялось публикациям, где анализировались давление перед соплом, расход жидкости, геометрия проточной части, угол раскрытия факела, размер и скорость капель, коэффициент расхода, плотность орошения, равномерность распределения жидкости и влияние этих параметров на тепло- и массообмен.

Критериями включения источников в обзор являлись: соответствие теме исследования, наличие анализа характеристик сопел или распылённого потока, связь рассматриваемых параметров с процессами тепло- и массообмена, наличие экспериментальных, теоретических или численных данных, а также научная значимость публикации. Предпочтение отдавалось работам, опубликованным в рецензируемых журналах, монографиям, обзорным статьям, международным стандартам и исследованиям, представленным в авторитетных научных базах данных.

Из анализа исключались публикации, не связанные напрямую с распылением, оросительными устройствами, характеристиками капельного потока, теплообменом, градирнями или CFD-моделированием сопел. Также не рассматривались работы, в которых распыление упоминалось только как вспомогательный технологический процесс без анализа гидродинамических или теплофизических параметров.

Отобранные источники были сгруппированы по нескольким основным направлениям: фундаментальная теория атомизации жидкости; экспериментальные исследования сопел и форсунок; характеристики капельного потока; методы диагностики и стандарты испытаний распыла; распылительное охлаждение и теплообмен; оросительные устройства градирен и

испарительных систем; CFD-моделирование внутреннего течения и структуры факела. Такая группировка позволила рассматривать оросительное устройство не изолированно, а как элемент технической системы, формирующий условия тепло- и массообмена.

При анализе экспериментальных исследований учитывались не только полученные результаты, но и методы их определения. Это связано с тем, что расход, угол факела, размер капель и равномерность распределения жидкости могут существенно зависеть от методики испытаний, типа измерительного оборудования, свойств жидкости, давления и конфигурации экспериментальной установки. В связи с этим отдельно учитывались международные стандарты, описывающие методы испытаний распылительных сопел, измерения капельного спектра и классификации распыла.

Особое внимание уделялось равномерности распределения жидкости. Для градирен, испарительных охладителей и аппаратов контактного теплообмена этот параметр имеет принципиальное значение, поскольку при неравномерном орошении часть рабочей зоны аппарата используется неполностью. Поэтому при анализе учитывались исследования, в которых рассматривались методы оценки пространственного распределения жидкости, включая применение паттернаторов и других диагностических подходов.

При обобщении результатов не выполнялось прямое сопоставление отдельных численных значений, полученных в разных исследованиях, поскольку параметры распыла зависят от типа сопла, геометрии канала, давления, свойств жидкости, температуры, метода измерения и условий проведения эксперимента. Основной акцент был сделан на выявлении повторяющихся закономерностей: влияния давления на распад струи, роли геометрии сопла в формировании факела, связи размера капель с площадью межфазного контакта, значения равномерности орошения для эффективности тепло- и массообмена, а также возможностей CFD-моделирования для анализа внутреннего течения в соплах.

Следовательно, методика исследования была основана на комплексном анализе литературных данных, их тематической группировке и сопоставлении с позиции единой гидродинамической и теплофизической логики. Такой подход позволил выявить основные факторы, определяющие эффективность оросительных устройств, и сформулировать направления их дальнейшей оптимизации.

Для отражения логики поиска, отбора и последующего анализа публикаций методическая схема исследования представлена в табличной форме. В таблице 1 приведены основные этапы работы с литературными источниками, их назначение и группы источников, использованные на каждом этапе анализа.

Таблица 1 – Методическая схема поиска, отбора и анализа литературных источников

Этап исследования	Содержание этапа	Назначение этапа	Источники
1	*2*	*3*	*4*
Поиск публикаций	Поиск работ по ключевым словам: atomization, spray nozzles, spray cooling, droplet size distribution, cooling tower nozzle, heat and mass transfer	Сформировать массив публикаций по гидродинамике распыла и теплофизическим процессам	[1-12]
Первичный отбор	Исключение работ, не связанных с соплами, распылением, тепло- и массообменом	Уточнить тематические границы обзора	[1-12]
Анализ характеристик сопел	Рассмотрение исследований, где приведены давление, расход, угол факела, размер и скорость капель	Выявить влияние режима работы и конструкции сопла на структуру потока	[18-26]
Учет стандартов испытаний	Анализ методик определения расхода, угла факела, распределения распыла и капельного спектра	Обеспечить корректную интерпретацию экспериментальных данных	[13-15]
Анализ равномерности распыла	Рассмотрение методов оценки пространственного распределения жидкости с применением паттернаторов	Оценить равномерность орошения в рабочей зоне аппарата	[16]

1	2	3	4
Анализ оптической диагностики	Учет лазерно-доплеровских и фазово-доплеровских методов измерения размера и скорости капель	Оценить надежность данных о капельном потоке	[17]
Систематизация результатов	Группировка источников по направлениям: атомизация, сопла, распылительное охлаждение и теплообмен, градирни, диагностика, CFD	Связать гидродинамические и теплофизические аспекты проблемы	[1-50]

Как видно из таблицы 1, обзор строился не по принципу простого перечисления публикаций, а через последовательное выделение тематических блоков. Это позволило связать фундаментальные представления об атомизации жидкости с прикладными вопросами выбора сопел, диагностики распыла, равномерности орошения и теплофизической эффективности технических систем.

Результаты исследований

Классификация оросительных и распылительных устройств

Оросительные и распылительные устройства различаются не только конструкцией, но и способом формирования потока. Это важно учитывать, потому что от типа устройства зависит форма факела, размер капель, равномерность распределения жидкости и характер взаимодействия с газовой средой или поверхностью теплообмена. В наиболее общем виде такие устройства можно разделить на гидравлические, центробежные, пневматические и ударные распылители.

Гидравлические сопла формируют факел за счет давления самой жидкости. К этой группе относятся струйные, веерные, полноконусные и полоконусные сопла. Их преимущество заключается в сравнительно простой конструкции и возможности работы без дополнительного подвода газа. Центробежные распылители отличаются тем, что жидкость перед выходом из сопла получает вращательное движение. За счет этого на выходе образуется тонкая жидкая пленка, которая затем распадается на капли. Пневматические распылители используют энергию газового потока, поэтому позволяют получать более мелкий распыл, но требуют дополнительного оборудования для подачи воздуха или газа. В ударных распылителях струя дробится при контакте с отражателем или пластиной, что часто применяется в системах орошения и водораспределения.

Такая классификация удобна для обзорного анализа, поскольку позволяет связать конструкцию устройства с теплофизическим результатом его работы. Обобщенная схема классификации оросительных устройств представлена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Классификация оросительных устройств по способу формирования распылённого потока [1-4, 18-23]

Как видно из рисунка 1, каждый тип распылителя формирует собственную структуру потока. Струйное сопло обеспечивает направленную подачу жидкости, но площадь межфазного контакта в этом случае ограничена. Веерные и конусные сопла лучше подходят для распределения жидкости по поверхности или объему. Центробежные и пневматические распылители создают более развитый капельный поток, однако их работа сильнее зависит от давления, свойств жидкости и состояния внутренних каналов. Поэтому выбор оросительного

устройства должен определяться не только требуемым расходом, но и задачей тепло- и массообмена: орошением поверхности, охлаждением газового потока, испарительным охлаждением, газоочисткой или распылительным охлаждением нагретой стенки.

Несмотря на общность принципа распыления жидкости, различные типы сопел формируют существенно отличающиеся структуры потока и капельные спектры. Для обобщения основных характеристик наиболее распространенных распылительных устройств в таблице 2 приведено их сравнительное описание.

Таблица 2 – Сравнительная характеристика основных типов распылительных устройств [1-4, 18-23]

Тип сопла	Форма факела	Характерный размер капель	Преимущества	Область применения
Струйное сопло	Компактная струя	Крупный, в зависимости от давления и конструкции сопла	Высокая дальность действия	Гидроочистка, мойка
Веерное сопло	Плоский факел	Средний, в зависимости от давления и конструкции сопла	Равномерное покрытие поверхности	Орошение, распыление растворов
Сопло полого конуса	Полый конический факел	Мелкий, в зависимости от давления и конструкции сопла	Большая площадь межфазного контакта	Газоочистка, охлаждение
Сопло полного конуса	Заполненный конус	Средний, в зависимости от давления и конструкции сопла	Равномерное объемное распределение жидкости	Градирни, теплообменные аппараты
Центробежное сопло	Закрученный факел	Мелкий, в зависимости от давления и конструкции сопла	Высокая дисперсность распыла	Распылительное охлаждение

Характеристики сопел и распыла

После выбора типа оросительного устройства ключевым вопросом становится оценка характеристик распыла. На практике работа сопла определяется не одним параметром, а сочетанием давления, расхода, геометрии выходного отверстия, свойств жидкости и условий взаимодействия факела с окружающей средой. Экспериментальные исследования показывают, что даже сопла одного назначения могут формировать заметно разные капельные спектры и зоны покрытия при изменении типоразмера или рабочего давления [18].

Одним из наиболее чувствительных параметров является давление перед соплом. При его увеличении возрастает скорость истечения жидкости, что обычно способствует более интенсивному распаду струи или жидкой пленки на капли. Однако повышение давления нельзя считать универсальным способом улучшения распыла. С одной стороны, оно может уменьшать средний размер капель и расширять факел. С другой стороны, при избыточном давлении увеличиваются гидравлические потери, возрастает нагрузка на насосное оборудование и повышается вероятность уноса мелких капель из рабочей зоны. Поэтому давление необходимо рассматривать совместно с типом сопла, свойствами жидкости и назначением системы.

Не менее важна геометрия выходной части сопла. Для веерных, полоконусных и центробежных распылителей форма канала и выходного отверстия определяет угол раскрытия факела, толщину жидкой пленки, распределение жидкости по зоне орошения и устойчивость потока. В работах, посвященных современным конструкциям сопел, показано, что изменение угла установки, формы выходного канала и режима подачи жидкости влияет не только на равномерность распределения, но и на спектр капель [19,20,21]. Это особенно важно для технических систем, где требуется не просто подать заданный расход, а обеспечить устойчивое покрытие поверхности или объема аппарата.

Для описания качества распыла часто используют понятие капельного спектра. Под ним понимают распределение капель по размерам в факеле. Такой показатель важен, потому что реальный распыл почти никогда не состоит из капель одного размера. В одном потоке одновременно присутствуют мелкие, средние и крупные капли. Мелкие капли имеют большую удельную поверхность и могут активнее участвовать в тепло- и массообмене, но они легче уносятся воздушным потоком. Крупные капли, наоборот, лучше сохраняют направление движения и достигают поверхности, однако имеют меньшую площадь контакта на единицу объема жидкости. Поэтому для оросительных устройств важен не минимальный размер капель как таковой, а рациональное распределение капель по размерам.

В литературе встречаются различные подходы к классификации распыла по дисперсности и потенциальному риску сноса. В работах по плоскофакельным соплам и международным системам классификации отмечается, что категория распыла зависит не только от конструкции сопла, но и от давления, расхода, свойств жидкости и условий испытаний [22, 23]. Это означает, что данные разных исследований следует сравнивать осторожно, особенно если они получены при разных режимах работы и методах измерения.

Отдельно следует выделить проблему уноса и удержания капель. Для технических систем распыления это имеет прямое теплофизическое значение. Если часть жидкости не достигает расчетной зоны контакта, фактическая площадь тепломассообмена уменьшается, даже если общий расход жидкости остается достаточным. Исследования процессов удара капель о поверхность, их удержания и сноса показывают, что характеристики распылённого потока зависят от размера и скорости капель, свойств жидкости, состояния поверхности и параметров окружающего воздушного потока [24, 25].

На характеристики распыла влияют и свойства рабочей жидкости. Вязкость, поверхностное натяжение и наличие добавок могут заметно изменить механизм распада струи. Например, для полимерных растворов и других сложных жидкостей каплеобразование может отличаться от распыления воды, поскольку такие жидкости сильнее сопротивляются деформации и могут образовывать более устойчивые жидкие нити [26]. Для оросительных устройств это особенно важно в тех случаях, когда используется не чистая вода, а технологический раствор, антифриз, суспензия или другой теплоноситель.

Для обобщения основных факторов, определяющих характеристики сопел и распыла, в таблице 3 приведены их гидродинамические и практические эффекты.

Таблица 3 – Конструктивные и режимные факторы, влияющие на характеристики распыла

Фактор	Влияние на распыленный поток	Практическое значение	Источники
1	*2*	*3*	*4*
Тип сопла	Определяет форму факела: струйную, веерную, полоконусную, полноконусную или центробежную	Влияет на область применения оросителя и характер распределения жидкости	[18, 22, 23]
Рабочее давление	Увеличивает скорость истечения и может уменьшать средний размер капель	Повышает интенсивность распыла, но увеличивает энергозатраты и риск уноса мелких капель	[18-20]
Геометрия выходного отверстия	Влияет на угол факела, толщину жидкой пленки и равномерность распределения	Позволяет адаптировать сопло под конкретную зону орошения	[19-21]
Размер капель	Определяет площадь межфазного контакта и склонность капель к уносу	Важен для тепло- и массообмена, охлаждения и смачивания поверхности	[22-25]
Скорость капель	Влияет на дальность проникновения факела и контакт с поверхностью	Определяет устойчивость движения капель в газовой среде	[18, 24, 25]
Свойства жидкости	Вязкость и поверхностное натяжение меняют механизм распада струи	Особенно важно для технологических жидкостей, растворов и теплоносителей	[26]

1	2	3	4
Равномерность распределения	Показывает, насколько стабильно жидкость покрывает рабочую зону	Определяет эффективность орошения и теплообмена	[19-21, 24]
Безразмерные критерии (Re, We, Oh)	Определяют режим распада струи и дисперсность распыла	Используются для обобщения результатов и проектирования сопел	[1-5,11]
Расстояние от сопла до поверхности или насадки	Влияет на раскрытие факела, скорость капель и площадь покрытия	Позволяет регулировать плотность орошения и равномерность контакта	[24,25,38]

Как видно из таблицы 3, характеристики распыла формируются не отдельным параметром, а совокупностью конструктивных и режимных факторов. Поэтому оценивать оросительное устройство только по расходу или рекомендуемому давлению недостаточно. Для теплофизических систем важнее понять, какую структуру капельного потока создает сопло и насколько эта структура соответствует условиям конкретного процесса.

Следовательно, анализ источников [18-26] показывает, что оптимизация сопла должна основываться на балансе между дисперсностью распыла, равномерностью покрытия, устойчивостью факела и допустимыми гидравлическими потерями. Этот вывод логично подводит к следующему разделу, где распыленный поток рассматривается уже с позиции теплофизики: через размер и скорость капель, площадь межфазного контакта, теплоотдачу и эффективность распылительного охлаждения.

Безразмерные критерии гидродинамики распыления

Для анализа процессов атомизации жидкости и обобщения результатов, полученных для различных типов сопел, и рабочих жидкостей, широко используются безразмерные критерии гидродинамики. Их применение позволяет учитывать влияние инерционных, вязкостных и капиллярных сил на формирование распылённого потока.

Одним из наиболее распространённых критериев является число Рейнольдса:

$$Re = \frac{\rho u d}{\mu}, \quad (1)$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м^3;

u – скорость потока, м/с;

d – характерный размер канала или диаметр струи, м;

μ – динамическая вязкость жидкости, Па·с.

Число Рейнольдса характеризует соотношение инерционных и вязкостных сил в потоке. При увеличении значения Re возрастает интенсивность турбулентности и вероятность разрушения жидкой струи.

Важную роль при анализе процессов распыления играет число Вебера:

$$We = \frac{\rho u^2 d}{\sigma}, \quad (2)$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м^3;

u – скорость потока, м/с;

d – характерный размер струи, м;

σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости, Н/м.

Число Вебера отражает соотношение инерционных сил и сил поверхностного натяжения. Увеличение значения We способствует более интенсивному распаду струи и образованию мелкодисперсного распыла.

Для комплексного учёта влияния вязкости и поверхностного натяжения используется число Онезорге:

$$Oh = \frac{\mu}{\sqrt{\rho \sigma d}}, \quad (3)$$

где μ – динамическая вязкость жидкости, Па·с;

ρ – плотность жидкости, кг/м^3;

σ – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м;

d – характерный размер струи или отверстия сопла, м.

Число Онезорге широко применяется для классификации режимов атомизации и оценки влияния физических свойств жидкости на процесс каплеобразования.

Использование критериев Re, We и Oh позволяет рассматривать процессы распыления в обобщённом виде и является важным инструментом при проектировании современных оросительных и распылительных устройств [1-5].

Теплофизические характеристики распылённого потока и распылительное охлаждение

После формирования факела распыла основное значение приобретает не только гидродинамика сопла, но и теплофизическое поведение капельного потока. В этом случае важно учитывать, как капли переносят теплоту, как они взаимодействуют с газовой средой или нагретой поверхностью и какие параметры распыла сильнее всего влияют на интенсивность теплообмена. В обзорной работе J. Kim распылительное охлаждение рассматривается как один из перспективных способов отвода высоких тепловых потоков, однако подчеркивается, что эффективность такого процесса определяется совокупностью факторов, включая расход жидкости, размер капель, скорость факела и условия контакта с поверхностью [27].

В более широком контексте распылительное охлаждение рассматривается вместе с другими методами охлаждения, включая охлаждение за счёт мгновенного испарения (flash evaporation cooling). В обзоре Cheng и соавторов показано, что такие подходы находят применение в тепловом управлении, электронике, энергетических установках и системах, где требуется компактный и интенсивный отвод теплоты [28]. При этом распылительное охлаждение отличается тем, что жидкость подается не сплошным потоком, а в виде капельного факела, что позволяет увеличить площадь контакта и гибко управлять зоной охлаждения.

В зависимости от температуры поверхности и плотности теплового потока при распылительном охлаждении могут реализовываться разные режимы теплообмена. При умеренных температурах преобладает однофазное охлаждение, когда жидкость нагревается без интенсивного кипения. При дальнейшем росте тепловой нагрузки возникает пузырьковое кипение, которое часто сопровождается увеличением коэффициента теплоотдачи. Обобщение этих режимов, включая критический тепловой поток, подробно представлено в первой части обзора Liang и Mudawar [29].

При высоких температурах процесс становится более сложным. Здесь могут возникать переходное и пленочное кипение, а также эффект Лейденфроста, при котором между каплей и перегретой поверхностью образуется паровая прослойка. Эта прослойка ухудшает прямой контакт жидкости с поверхностью и может снижать интенсивность теплоотдачи. Высокотемпературные режимы распылительного охлаждения, включая задачи закалки, рассмотрены во второй части обзора Liang и Mudawar [30].

Для понимания механизмов теплообмена важно учитывать не только средний расход жидкости, но и локальное поведение капель на поверхности. Horacek, Kiger и Kim показали, что при охлаждении одной форсункой теплопередача зависит от распределения жидкости по поверхности, характера смачивания и режима кипения [31]. В работе Rybicki и Mudawar дополнительно рассматривается влияние ориентации распыла, включая охлаждение поверхностей при различном направлении подачи факела [32].

Одним из ключевых параметров является средний диаметр Заутера. Этот показатель характеризует отношение объема капель к их поверхности и поэтому удобен для оценки площади межфазного контакта. В работе Estes и Mudawar предложена корреляция между средним диаметром Заутера и критическим тепловым потоком при распылительном охлаждении малых поверхностей [33]. Это подтверждает, что размер капель имеет не только гидродинамическое, но и прямое теплофизическое значение.

Распылительное охлаждение также рассматривается как один из подходов к управлению высокими тепловыми нагрузками. В работе Mudawar показано, что для таких систем важно учитывать не только максимальный тепловой поток, но и устойчивость режима, конструктивную сложность и возможность практического применения [34]. Современные

обзоры также подтверждают интерес к распылительному охлаждению как к эффективному методу терморегулирования, особенно для компактных систем с высокой плотностью тепловыделения [35].

Отдельное направление связано с ударом множества капель о поверхность. В таких условиях теплообмен определяется не только отдельным контактом капли со стенкой, но и взаимодействием соседних капель, образованием жидкой пленки, разбрызгиванием и повторным смачиванием поверхности. Эти вопросы рассматриваются в обзоре Benther и соавторов, где также отмечается перспективность использования модифицированных и улучшенных поверхностей [36]. Работа Serdyukov и соавторов дополняет этот подход, поскольку в ней одновременно анализируются удар капель и теплообмен при распылительном охлаждении [37].

Важным конструктивным фактором является положение сопла относительно охлаждаемой поверхности. Если сопло расположено слишком близко, факел может не успеть раскрыться, и жидкость будет распределяться неравномерно. При слишком большом расстоянии часть мелких капель может потерять скорость или быть унесена газовым потоком. Влияние положения сопла на однофазное распылительное охлаждение показано в работе Gao и Li [38].

Состояние поверхности также влияет на эффективность охлаждения. Гладкие и микроструктурированные поверхности по-разному взаимодействуют с каплями: меняются смачивание, площадь контакта, условия кипения и распределение жидкости. Экспериментальные данные по распылительному охлаждению гладких и микроструктурированных поверхностей представлены в работе Zhang, Kim и соавторов [39]. Кроме того, характеристики атомизации самого pressure-swirl сопла могут быть связаны с тепловой эффективностью системы, что показано в исследовании Xie и соавторов [40].

Для обобщения основных теплофизических факторов, влияющих на распылительное охлаждение, в таблице 4 представлены ключевые параметры распыленного потока.

Таблица 4 – Теплофизические параметры распыленного потока и их влияние на охлаждение

Параметр	Теплофизическое значение	Влияние на процесс охлаждения	Источники
Расход жидкости	Определяет количество охлаждающей среды, поступающей в зону теплообмена	Может повышать интенсивность охлаждения, но не гарантирует равномерного распределения	[27, 28]
Средний размер капель	Влияет на площадь межфазного контакта и скорость нагрева капель	Мелкие капли увеличивают поверхность контакта, но легче уносятся потоком	[29, 33]
Режим кипения	Определяет механизм отвода теплоты от поверхности	Пузырьковое кипение может повышать интенсивность теплоотдачи, тогда как переход к плёночному кипению и эффекту Лейденфроста снижает устойчивость теплоотвода.	[29, 30]
Критический тепловой поток	Показывает предельный режим эффективного охлаждения	При его превышении возможна потеря устойчивого теплоотвода	[29, 33, 34]
Удар капель о поверхность	Определяет смачивание, растекание и формирование жидкой пленки	Влияет на локальный теплообмен и равномерность охлаждения	[36, 37]
Расстояние от сопла до поверхности	Влияет на раскрытие факела и плотность орошения	Позволяет регулировать площадь покрытия и скорость капель	[38]
Состояние поверхности	Определяет смачивание и режимы кипения	Микроструктуры могут повышать теплоотдачу, но требуют учета условий эксплуатации	[39]
Тип распылителя	Формирует размер капель, угол факела и скорость потока	Связывает характеристики атомизации с тепловой эффективностью	[40]

Как видно из таблицы 4, распылительное охлаждение нельзя описывать только через расход жидкости. Один и тот же расход может давать различный тепловой эффект при изменении размера капель, положения сопла, режима кипения или состояния поверхности. Поэтому для анализа оросительных устройств необходим переход от простого гидравлического описания к комплексной теплофизической оценке.

Градирни и испарительные системы

Если в распылительном охлаждении основное внимание уделяется контакту капель с нагретой поверхностью, то в градирнях и испарительных охладителях главным становится взаимодействие воды с воздушным потоком. Здесь оросительное устройство должно не просто распылить воду, а распределить ее так, чтобы максимально эффективно использовать объем аппарата и поверхность насадки.

В работе Vitkovic показано, что водораспределительная характеристика сопел является важным параметром при выборе форсунок для градирен. Неравномерное распределение воды приводит к тому, что часть насадки переувлажняется, а часть остается недостаточно смоченной. В результате уменьшается фактическая площадь контакта воды с воздухом и снижается эффективность тепло- и массообмена [41].

Обзор Somasundar и соавторов посвящен типам сопел, применяемых в градирнях. В нем отмечается, что конструкция форсунки влияет на форму зоны орошения, размер капель и распределение воды по рабочему объему аппарата [42]. Поэтому выбор сопла для градирни должен учитывать не только расход воды, но и характер ее распределения.

Практическая оценка и прогнозирование работы сопел градирен подробно рассмотрены в работе Viljoen [43]. Такой подход важен для инженерного анализа, поскольку фактическая работа оросительного устройства может отличаться от расчетной из-за особенностей конструкции, давления, высоты установки и условий эксплуатации.

Для расчета эффективности градирен применяются различные модели, включая методы Merkel, Poppe и e-NTU. Kloppers и Kröger показали, что выбор расчетного метода влияет на оценку тепловой эффективности градирни, особенно при учете реальных условий тепло- и массообмена между водой и воздухом [44]. При этом корректность расчета во многом зависит от того, насколько точно заданы водораспределение, расход воздуха и состояние насадки.

Дополнительным эксплуатационным фактором является загрязнение насадки. Qureshi и Zubair рассмотрели модель мокрой градирни с учетом загрязнения заполнителя, показав, что отложения могут снижать эффективность тепло- и массообмена и изменять рабочие характеристики аппарата [45]. Следовательно, при анализе оросительных устройств важно учитывать не только начальные параметры сопла, но и устойчивость системы при длительной эксплуатации. Факторы эффективности оросительных устройств в градирнях и испарительных системах представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Факторы эффективности оросительных устройств в градирнях и испарительных системах

Фактор	Влияние на работу системы	Теплофизическое значение	Источники
Равномерность распределения воды	Определяет полноту смачивания насадки	Влияет на фактическую площадь тепло- и массообмена	[41]
Тип сопла градирни	Формирует зону орошения и размер капель	Определяет характер контакта воды с воздухом	[42, 43]
Расход воды	Задает количество жидкости, участвующей в охлаждении	Влияет на тепловую нагрузку и режим испарения	[44]
Расчетная модель градирни	Позволяет оценивать эффективность тепло- и массообмена	Методы Merkel, Poppe и e-NTU дают разные уровни детализации	[44]
Загрязнение насадки	Ухудшает распределение воды и движение воздуха	Снижает эффективность тепло- и массообмена	[45]
Высота установки сопла	Определяет раскрытие факела и площадь зоны орошения	Влияет на равномерность смачивания насадки и контакт воды с воздухом	[41,42,43]

Следовательно, для градирен основное значение имеет не только сам факт распыления, но и пространственное распределение воды в аппарате. Даже при достаточном расходе неравномерное орошение может снижать эффективность системы. Поэтому оросительное устройство в градирне следует рассматривать как элемент, который формирует режим работы всей зоны тепло- и массообмена.

CFD и моделирование распылительных устройств

Экспериментальные методы исследования распыления жидкостей позволяют получать данные о расходе жидкости, угле раскрытия факела распыла, размерах капель и их распределении в потоке, что необходимо для оценки эффективности и качества процесса распыления. Однако они не всегда дают полное представление о том, что происходит внутри сопла. Между тем именно внутреннее течение во многом определяет структуру будущего факела. Поэтому в последние годы значительное внимание уделяется численному моделированию, в том числе методам вычислительной гидродинамики.

В обзоре Schmidt и Corradini, посвященном внутреннему течению в форсунках, показано, что процессы внутри сопла могут существенно влиять на характеристики распыла. Хотя работа ориентирована на дизельные форсунки, рассмотренные в ней вопросы внутреннего течения, турбулентности, кавитации и структуры потока имеют значение и для более широкого анализа распылительных устройств [46].

Fu выполнил численное моделирование внутреннего течения swirl atomizer при атмосферном давлении. Такие исследования важны потому, что центробежные распылители формируют факел за счет закрученного движения жидкости, а значит, распределение давления и скорости внутри сопла напрямую связано с расходом, устойчивостью факела и формированием жидкой пленки [47].

В работе Malý и соавторов сравниваются двумерные и трехмерные подходы к моделированию внутреннего течения центробежной форсунки с закруткой потока. Упрощенные модели могут быть полезны на предварительном этапе, однако трехмерное моделирование лучше отражает сложную структуру течения, особенно при наличии закручивания и несимметричных каналов [48].

Дальнейшее развитие этого направления связано с поиском численных моделей, способных прогнозировать рабочие характеристики центробежной форсунки с закруткой потока. В работе Malý и соавторов рассматриваются подходы к расчету параметров распылителя и подчеркивается необходимость валидации моделей по экспериментальным данным [49]. Это важно, поскольку численная модель без проверки может не отражать реальную работу устройства. Ronceros и соавторы предложили теоретическую формулировку и численное моделирование центробежных форсунок с закруткой потока со спиральными каналами. Такие конструкции позволяют управлять закручиванием потока, но требуют учета сложной геометрии, турбулентности и особенностей формирования факела [50].

Возможности вычислительной гидродинамики (CFD) позволяют анализировать различные характеристики распылительных устройств, включая структуру потока, распределение скоростей и процесс диспергирования жидкости. Основные возможности CFD-моделирования представлены в таблице 6.

Как видно из таблицы 6, CFD-моделирование позволяет не только прогнозировать характеристики факела, но и анализировать причины их формирования внутри сопла. Однако результаты численного моделирования требуют экспериментальной проверки, поскольку реальные параметры распыла зависят от свойств жидкости, шероховатости каналов, точности изготовления сопла и условий измерения.

Анализ работ [46-50] показывает, что CFD-моделирование позволяет исследовать процессы, которые трудно или невозможно наблюдать экспериментально, включая распределение давления и скорости внутри сопла, развитие турбулентности, кавитационные явления и формирование жидкой пленки. При этом наибольшую точность обеспечивают трехмерные модели, учитывающие реальную геометрию сопла и закручивание потока. Однако повышение точности сопровождается увеличением вычислительных затрат, поэтому выбор расчетного подхода должен определяться целями исследования и необходимой степенью детализации.

Таблица 6 – Направления применения CFD-моделирования при анализе распылительных устройств

Направление моделирования	Что позволяет оценить	Практическое значение	Источники
Внутреннее течение в сопле	Поля давления, скорости, турбулентности и кавитации	Позволяет понять причины изменения расхода и формы факела	[46]
Моделирование swirl atomizer	Закручивание потока, формирование жидкой пленки, устойчивость факела	Используется при проектировании центробежных распылителей	[47]
2D и 3D модели	Различие между упрощенным и детальным описанием течения	Помогает выбрать уровень сложности расчетной модели	[48]
Прогноз характеристик распыла	Коэффициент расхода, угол факела, параметры пленки	Позволяет сократить объем экспериментальных испытаний	[49]
Модели сопел со спиральными каналами	Влияние геометрии каналов на закручивание потока	Полезно для оптимизации новых конструкций распылителей	[50]

Для обобщения рассмотренного массива литературы использованные источники были распределены по основным тематическим направлениям. Такое представление позволяет показать, какие группы исследований составили основу обзора: теория атомизации и распыления, характеристики сопел и факела, распылительное охлаждение и теплообмен, градирни и водораспределение, методы диагностики, а также CFD-моделирование. Тематическая структура использованных источников представлена на рисунке 2.

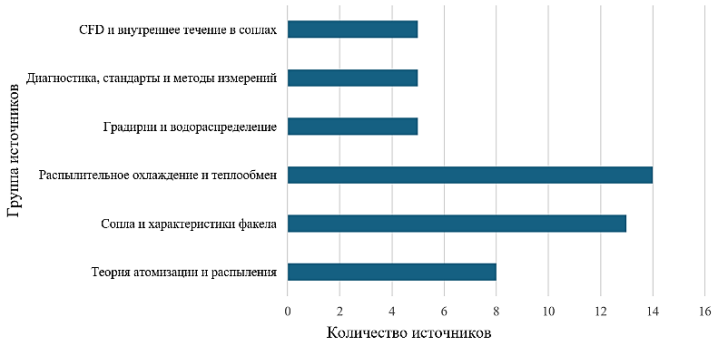


Рисунок 2 – Тематическая структура использованных литературных источников [1-50]

Как видно из рисунка 2, наибольшая часть источников относится к распылительному охлаждению и теплообмену, а также к исследованиям сопел и характеристик факела. Это объясняется тем, что именно эти направления наиболее полно отражают связь между гидродинамикой распыления и теплофизической эффективностью оросительных устройств. Источники по градирням, методам диагностики и CFD-моделированию дополняют обзор и позволяют рассмотреть проблему не только с экспериментальной, но и с расчетно-прикладной стороны.

Обсуждение результатов

Проведённый обзор показывает, что эффективность оросительных и распылительных устройств не может быть оценена только по расходу жидкости или рабочему давлению. Эти параметры являются важными, однако они отражают лишь гидравлическую сторону работы устройства. Для теплофизических систем более существенное значение имеет структура распылённого потока, формируемая соплом: форма факела, размер и скорость капель, равномерность распределения жидкости, плотность орошения и устойчивость взаимодействия капель с газовой средой, насадкой или теплообменной поверхностью.

Анализ фундаментальных работ по атомизации жидкости показывает, что распад струи или жидкой плёнки определяется совместным действием инерционных, вязкостных,

капиллярных и аэродинамических сил [1-6]. Поэтому одинаковое значение расхода или давления не гарантирует одинакового качества распыла. В зависимости от конструкции сопла один и тот же режим подачи жидкости может приводить к формированию компактной струи, веерного факела, полого или заполненного конуса, а также мелкодисперсного капельного потока. Это подтверждает необходимость рассматривать оросительное устройство не как простой элемент подачи жидкости, а как активный элемент формирования условий тепло- и массообмена.

Особенно важным является влияние рабочего давления. С одной стороны, увеличение давления обычно повышает скорость истечения жидкости, способствует более интенсивному распаду струи и может уменьшать средний размер капель. С другой стороны, чрезмерное повышение давления сопровождается ростом гидравлических потерь, увеличением энергозатрат и повышением вероятности уноса мелкодисперсных капель из рабочей зоны. Следовательно, повышение давления не может рассматриваться как универсальный способ повышения эффективности оросительного устройства. Более обоснованным является выбор такого режима работы, при котором обеспечивается рациональное сочетание дисперсности распыла, устойчивости факела и допустимых эксплуатационных затрат.

Сравнение различных типов сопел показывает, что каждая конструкция имеет собственную область рационального применения. Струйные сопла обеспечивают направленную подачу жидкости и большую дальность действия, однако создают ограниченную площадь межфазного контакта. Веерные и конусные сопла лучше подходят для равномерного распределения жидкости по поверхности или объёму аппарата. Центробежные и пневматические распылители позволяют формировать более развитый капельный поток, но их работа сильнее зависит от давления, свойств жидкости и состояния внутренних каналов. Поэтому выбор типа сопла должен определяться не только требуемым расходом, но и конкретной теплофизической задачей: охлаждением поверхности, испарительным охлаждением, газоочисткой, увлажнением или орошением насадки.

Капельный спектр является одним из ключевых параметров, связывающих гидродинамику распыла с теплофизической эффективностью. Мелкие капли имеют большую суммарную площадь поверхности и могут способствовать интенсификации испарения, теплоотдачи и массообмена. Однако они обладают меньшей инерцией, быстрее теряют скорость и легче уносятся воздушным потоком. Крупные капли, напротив, устойчивее достигают поверхности или зоны контакта, но имеют меньшую удельную площадь межфазного взаимодействия. Поэтому оптимизация распыла должна быть направлена не на получение минимального размера капель, а на формирование рационального капельного спектра, соответствующего условиям конкретного технического процесса.

В системах распылительного охлаждения связь между параметрами распыла и теплообменом проявляется особенно отчётливо. Эффективность охлаждения определяется не только расходом жидкости, но и средним диаметром капель, их скоростью, плотностью орошения, расстоянием от сопла до поверхности, состоянием поверхности и режимом кипения [27-40]. При умеренных тепловых нагрузках возможно однофазное охлаждение или пузырьковое кипение, при котором коэффициент теплоотдачи может возрастать. При более высоких температурах возникают переходное и плёночное кипение, а также эффект Лейденфроста, ухудшающий прямой контакт жидкости с поверхностью. Это показывает, что гидродинамическая структура факела непосредственно влияет на устойчивость и интенсивность теплообмена.

Для градирен и испарительных охладителей главным фактором становится равномерность распределения воды по рабочему объёму аппарата и поверхности насадки. Даже при достаточном общем расходе неравномерное орошение приводит к тому, что часть насадки переувлажняется, а другая часть используется неполностью. В результате уменьшается фактическая площадь контакта воды с воздухом и снижается эффективность тепло- и массообмена [41-45]. Следовательно, для таких систем качество работы оросительного устройства определяется не только расходной характеристикой, но и пространственным распределением жидкости.

Отдельное значение имеет эксплуатационная устойчивость оросительных устройств. В реальных условиях параметры распыла могут изменяться из-за загрязнения жидкости, износа выходных отверстий, образования отложений, изменения давления и свойств рабочей

среды. Это особенно важно для градирен, испарительных аппаратов и промышленных систем, работающих длительное время. Поэтому при выборе и оптимизации сопел необходимо учитывать не только начальные характеристики распыла, но и сохранение равномерности орошения, формы факела и расходных характеристик в процессе эксплуатации.

CFD-моделирование является перспективным инструментом анализа оросительных и распылительных устройств, поскольку позволяет изучать процессы, которые трудно наблюдать экспериментально: распределение давления и скорости внутри сопла, закручивание потока, кавитацию, турбулентность и формирование жидкой плёнки [46-50]. Вместе с тем численное моделирование не может полностью заменить экспериментальные исследования. Реальные характеристики факела зависят от шероховатости каналов, свойств жидкости, точности изготовления сопла и условий измерения. Поэтому наиболее надёжным подходом является сочетание CFD-анализа с экспериментальной проверкой полученных результатов.

Проведённый анализ показывает, что оптимизация оросительных устройств должна иметь комплексный характер. Недостаточно выбирать сопло только по расходу, давлению или типоразмеру. Необходимо одновременно учитывать гидродинамические параметры распыла, теплофизические условия процесса и эксплуатационные ограничения. Такой подход позволяет перейти от простого подбора оросительного устройства к обоснованному проектированию распылительных систем для градирен, испарительных охладителей, установок распылительного охлаждения, аппаратов газоочистки и других технических систем.

Заключение

Проведённый обзор показал, что оросительные и распылительные устройства в технических системах нельзя рассматривать только как элементы подачи жидкости. Их основная роль заключается в формировании структуры межфазного контакта, от которой зависят интенсивность тепло- и массообмена, равномерность орошения, устойчивость факела и эффективность работы всего аппарата.

Установлено, что характеристики распылённого потока определяются совокупным влиянием конструктивных, гидродинамических и теплофизических факторов. К наиболее значимым параметрам относятся тип сопла, рабочее давление, расход жидкости, геометрия проточной части, размер и скорость капель, угол раскрытия факела, плотность орошения, свойства рабочей среды и условия взаимодействия капель с газовым потоком, насадкой или теплообменной поверхностью.

Анализ работ по атомизации жидкости показывает, что повышение давления может способствовать более интенсивному распаду струи и уменьшению среднего размера капель. Однако данный способ повышения дисперсности имеет ограничения, поскольку сопровождается увеличением гидравлических потерь, энергозатрат и риска уноса мелкодисперсных капель из рабочей зоны. Поэтому оптимизация оросительного устройства должна быть направлена не на максимизацию давления, а на выбор рационального режима, обеспечивающего требуемую структуру распыла при допустимых эксплуатационных затратах.

Особое значение имеет капельный спектр. Мелкие капли увеличивают суммарную площадь межфазного контакта и могут способствовать интенсификации испарения, теплоотдачи и массообмена. В то же время они быстрее теряют скорость и легче уносятся воздушным потоком. Крупные капли устойчивее достигают поверхности или зоны контакта, но обладают меньшей удельной площадью взаимодействия. Следовательно, для технических систем важен не минимальный размер капель как самоцель, а рациональное распределение капель по размерам с учётом конкретной инженерной задачи.

Для систем распылительного охлаждения показано, что эффективность теплоотвода определяется не только расходом жидкости, но и средним диаметром капель, скоростью факела, плотностью орошения, расстоянием от сопла до поверхности, состоянием поверхности и режимом теплообмена. При высоких тепловых нагрузках дополнительно необходимо учитывать критический тепловой поток, переходное и плёночное кипение, а также эффект Лейденфроста. Это подтверждает прямую связь между гидродинамической структурой факела и теплофизической устойчивостью процесса охлаждения.

Для градирен и испарительных систем ключевым фактором является равномерность водораспределения. Даже при достаточном общем расходе жидкости неравномерное орошение снижает фактическую площадь контакта воды с воздухом или насадкой, что приводит к ухудшению тепло- и массообмена. Поэтому при выборе оросительных устройств для таких аппаратов необходимо учитывать не только расходную характеристику сопла, но и форму зоны орошения, устойчивость факела, высоту установки, состояние насадки и возможное изменение характеристик в процессе эксплуатации.

CFD-моделирование является важным инструментом анализа и оптимизации распылительных устройств. Оно позволяет исследовать внутреннее течение в соплах, распределение давления и скорости, закручивание потока, турбулентность, кавитационные явления и формирование жидкой плёнки. Вместе с тем расчётные модели должны обязательно проверяться экспериментальными данными, поскольку реальные параметры распыла зависят от свойств жидкости, шероховатости каналов, точности изготовления сопла и условий измерения.

В результате обзора сформирована интегрированная схема анализа оросительных устройств, объединяющая конструктивный, гидродинамический, дисперсный и теплофизический уровни. В отличие от подходов, в которых атомизация, распылительное охлаждение, водораспределение и CFD-моделирование рассматриваются преимущественно раздельно, предложенная систематизация показывает их последовательную взаимосвязь в цепочке «параметры сопла - структура распылённого потока - условия межфазного взаимодействия - теплофизическая эффективность». Именно данная взаимосвязь определяет авторскую позицию и научную новизну выполненного обзорного исследования.

Именно поэтому, дальнейшая оптимизация оросительных устройств должна основываться на комплексном подходе, объединяющем гидродинамические, теплофизические и эксплуатационные параметры. Такой подход позволяет перейти от простого выбора сопла по расходу и давлению к обоснованному проектированию распылительных систем для градирен, испарительных охладителей, аппаратов газоочистки, установок распылительного охлаждения и других технических систем.

Перспективы дальнейших исследований

Несмотря на значительное количество исследований, посвящённых атомизации жидкости, характеристикам сопел, распылительному охлаждению, градирням и CFD-моделированию, ряд вопросов остаётся недостаточно изученным. В первую очередь это касается установления прямой связи между внутренней гидродинамикой сопла, структурой формируемого факела и конечной теплофизической эффективностью технической системы. Во многих работах подробно рассматриваются либо параметры распылённого потока, либо процессы теплообмена, однако эти явления не всегда анализируются как единая взаимосвязанная система.

Одним из перспективных направлений является разработка комплексного критерия эффективности оросительного устройства. Такой критерий должен учитывать не только расход жидкости и давление перед соплом, но и средний размер капель, скорость факела, равномерность распределения жидкости, плотность орошения, площадь межфазного контакта, гидравлические потери и интенсивность тепло- и массообмена. Это позволило бы сравнивать различные типы сопел не по отдельным характеристикам, а по их реальному влиянию на работу конкретного аппарата.

Отдельного внимания заслуживает исследование оросительных устройств в условиях длительной эксплуатации. В реальных технических системах характеристики распыла могут изменяться вследствие загрязнения жидкости, износа выходных отверстий, образования отложений, изменения шероховатости внутренних каналов, колебаний давления и изменения свойств рабочей среды. Поэтому дальнейшие исследования должны учитывать не только начальные параметры сопла, но и стабильность формы факела, расходной характеристики и равномерности орошения в процессе продолжительной работы.

Перспективным направлением является совместное применение экспериментальных методов и CFD-моделирования. Эксперимент позволяет получать фактические данные о расходе жидкости, угле раскрытия факела, размере и скорости капель, а также распределении жидкости в рабочей зоне. CFD-моделирование, в свою очередь, даёт возможность анализировать внутреннее течение в сопле, распределение давления и

скорости, закручивание потока, турбулентность, кавитационные явления и формирование жидкой плёнки. Наиболее надёжные результаты могут быть получены при сочетании этих подходов и обязательной валидации расчётных моделей по экспериментальным данным.

Важным направлением дальнейших исследований является изучение распыления не только воды, но и других рабочих жидкостей: растворов, антифризов, суспензий, технологических жидкостей и специальных теплоносителей. Изменение вязкости, плотности, поверхностного натяжения и теплофизических свойств жидкости может существенно влиять на механизм распада струи, размер капель, угол факела, гидравлическое сопротивление и интенсивность тепло- и массообмена. Это особенно актуально для энергетических, холодильных, климатических и промышленных установок, работающих в широком диапазоне температур и режимов.

Также перспективным является исследование влияния схемы размещения сопел в аппарате. Для градирен, испарительных охладителей и аппаратов газоочистки важно учитывать не только характеристики отдельного распылителя, но и взаимодействие нескольких факелов, перекрытие зон орошения, высоту установки сопел, влияние воздушного потока и равномерность распределения жидкости по объёму аппарата или поверхности насадки. Такой подход позволит более точно оценивать эффективность всей системы, а не только отдельного оросительного элемента.

Для систем распылительного охлаждения дальнейшие исследования целесообразно направить на изучение связи между капельным спектром, состоянием охлаждаемой поверхности и режимами теплообмена. Особый интерес представляют процессы перехода от однофазного охлаждения к пузырьковому, переходному и плёночному кипению, а также условия возникновения эффекта Лейденфроста. Более глубокое понимание этих процессов позволит повысить устойчивость теплоотвода при высоких тепловых нагрузках.

Таким образом, дальнейшее развитие исследований в области оросительных и распылительных устройств должно быть направлено на переход от анализа отдельных параметров распыла к комплексной оценке их влияния на работу теплофизической системы. Такой подход позволит более обоснованно выбирать тип сопла, режим давления, схему размещения оросителей и условия эксплуатации для градирен, испарительных охладителей, аппаратов газоочистки, установок распылительного охлаждения и других технических систем.

Список литературы

1. Lefebvre A.H. Atomization and Sprays / A.H. Lefebvre, V.G. McDonell. – 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2017. https://www.routledge.com/Atomization-and-Sprays/Lefebvre-McDonell/p/book/9781498736251.
2. Handbook of Atomization and Sprays: Theory and Applications / N. Ashgriz et al. – New York: Springer, 2011. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7264-4.
3. Nasr G.G. Industrial Sprays and Atomization: Design, Analysis and Applications / G.G. Nasr, A.J. Yule, L. Bendig. London: Springer, 2002. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-3816-7.
4. Bayvel L. Liquid Atomization / L. Bayvel, Z. Orzechowski/ Washington: Taylor & Francis, 1993. https://www.routledge.com/Liquid-Atomization/Bayvel/p/book/9780891169598.
5. Sirignano W.A. Fluid Dynamics and Transport of Droplets and Sprays / W.A. Sirignano. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2010. https://www.cambridge.org/.
6. Multiphase Flows with Droplets and Particles / C.T. Crowe et al. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2011. https://www.routledge.com/Multiphase-Flows-with-Droplets-and-Particles/Crowe-Schwarzkopf-Sommerfeld-Tsuji/p/book/9781439840504.
7. Yarin A.L. Drop impact dynamics: splashing, spreading, receding, bouncing / A.L. Yarin // Annual Review of Fluid Mechanics. – 2006. – Vol. 38. – P. 159-192. https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.38.050304.092144.
8. Rein M. Phenomena of liquid drop impact on solid and liquid surfaces / M. Rein // Fluid Dynamics Research. – 1993. – Vol. 12, № 2. – P. 61-93. https://doi.org/10.1016/0169-5983(93)90106-K.
9. Experimental investigations of spray characteristics of a pressure-swirl atomizer / X. Fan et al // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy. – 2020. – Vol. 234, № 5. https://doi.org/10.1177/0957650919875612.

10. Experimental investigation of flat fan nozzle V-cut depths and its impact on spray characteristics / W. Mughal et al // Scientific Reports. – 2025. – Vol. 15. – Article 22959. https://doi.org/10.1038/s41598-025-05319-z.
11. Mondal D. Droplet size and velocity distributions in a spray from a pressure swirl atomizer: application of maximum entropy formalism / D. Mondal, A. Datta, A. Sarkar // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. – 2004. – Vol. 218, № 7. – P. 737-749. https://doi.org/10.1243/0954406041319563.
12. Droplet spectrum of standard flat fan and hollow cone spray nozzles / J.P.A.R. Cunha et al // Pesquisa Agropecuária Brasileira. – 2004. – Vol. 39, № 10. – P. 977-985. https://apct.sede.embrapa.br/pab/article/view/6865.
13. ISO 5682-1:2017. Equipment for crop protection – Spraying equipment – Part 1: Test methods for sprayer nozzles. Geneva: International Organization for Standardization, 2017. https://www.iso.org/standard/60053.html.
14. ISO 25358:2018. Crop protection equipment – Droplet-size spectra from atomizers – Measurement and classification. Geneva: International Organization for Standardization, 2018. https://www.iso.org/.
15. ANSI/ASABE S572.3. Spray Nozzle Classification by Droplet Spectra. St. Joseph, MI: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2020. URL: https://elibrary.asabe.org/azdez.asp?AID=51101.
16. Miller P.C.H. Evaluation of a spray nozzle patternator / P.C.H. Miller // Journal of Agricultural Engineering Research. – 1986. – № 1. – P. 43-52. https://doi.org/10.1016/0261-2194(86)90032-3.
17. Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Techniques / H.-E. Albrecht et al. Berlin: Springer, 2003. https://doi.org/10.1007/978-3-662-05165-8.
18. Effect of nozzle type, size and pressure on spray droplet characteristics / D. Nuyttens et al // Biosystems Engineering. – 2007. – Vol. 97, № 3. – P. 333-345. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.03.001.
19. Reducing ground and airborne drift losses in young apple orchards with PWM-controlled spray systems / R. Salcedo et al // Computers and Electronics in Agriculture. – 2021. – Vol. 184. – Article 106389. https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106389.
20. Characterization of activation pressure, flow rate and spray angle for PWM-controlled hollow-cone nozzles / R. Salcedo et al // Biosystems Engineering. – 2022. – Vol. 218. – P. 139-152. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.04.002.
21. Effect of angled spray nozzle designs on spray distribution and droplet spectrum / M.M. Negrisoli et al // Revista Ciência Agronômica. – 2021. – Vol. 52, № 3. https://www.scielo.br/j/rca/a/3YNNjbRVPPQmDk8dPyHTD3f/.
22. Czaczyk Z. Spray classification for selected flat fan nozzles / Z. Czaczyk // Journal of Plant Protection Research. – 2012. – Vol. 52, № 1. https://www.plantprotection.pl/Spray-classification-for-selected-flat-fan-nozzles,91811,0,2.html.
23. The international (BCPC) spray classification system including a drift potential factor / E.S.E. Southcombe et al // Proceedings of the Brighton Crop Protection Conference – Weeds. – 1997. – P. 371-380.
24. Spillman J.J. Spray impaction, retention and adhesion: an introduction to basic characteristics / J.J. Spillman // Pesticide Science. – 1984. – Vol. 15, № 2. – P. 97-106. https://doi.org/10.1002/ps.2780150202.
25. Hewitt A.J. Spray drift: impact of requirements to protect the environment / A.J. Hewitt // Crop Protection. – 2000. – Vol. 19, № 8-10. – P. 623-627. https://doi.org/10.1016/S0261-2194(00)00082-X.
26. Gaillard A. What determines the drop size in sprays of polymer solutions? / A. Gaillard, R. Sijs, D. Bonn // arXiv. 2021. https://arxiv.org/abs/2108.11163.
27. Kim J. Spray cooling heat transfer: the state of the art / J. Kim // International Journal of Heat and Fluid Flow. – 2007. – Vol. 28, № 4. – P. 753-767. https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2006.09.003.
28. Spray cooling and flash evaporation cooling: the current development and application / W.-L. Cheng et al // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – Vol. 55. – P. 614-628. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.014.

29. Liang G. Review of spray cooling – Part 1: Single-phase and nucleate boiling regimes, and critical heat flux / G. Liang, I. Mudawar // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2017. – Vol. 115. – P. 1174-1205. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.06.029.
30. Liang G. Review of spray cooling - Part 2: High temperature boiling regimes and quenching applications / G. Liang, I. Mudawar // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2017. – Vol. 115. – P. 1206-1222. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.06.030.
31. Horacek B. Single nozzle spray cooling heat transfer mechanisms / B. Horacek, K.T. Kiger, J. Kim // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2005. – Vol. 48, № 8. – P. 1425-1438. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.10.026.
32. Rybicki J.R. Single-phase and two-phase cooling characteristics of upward-facing and downward-facing sprays / J.R. Rybicki, I. Mudawar // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2006. – Vol. 49, № 1-2. P. 5-16. https://engineering.purdue.edu/mudawar/files/articles-all/2006/2006-01.pdf.
33. Estes K.A. Correlation of Sauter mean diameter and critical heat flux for spray cooling of small surfaces / K.A. Estes, I. Mudawar // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 1995. – Vol. 38, № 16. – P. 2985-2996. https://doi.org/10.1016/0017-9310(95)00047-C.
34. Mudawar I. Assessment of high-heat-flux thermal management schemes / I. Mudawar // IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies. – 2001. – Vol. 24, № 2. – P. 122-141. https://doi.org/10.1109/6144.926375.
35. Spray cooling as a high-efficient thermal management solution: a review / J. Yin et al // Energies. – 2022. – Vol. 15, № 22. – Article 8547. https://doi.org/10.3390/en15228547.
36. Heat transfer during multiple droplet impingement and spray cooling: review and prospects for enhanced surfaces / J.D. Benther et al // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2021. – Vol. 178. – Article 121587. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121587.
37. The simultaneous analysis of droplets' impacts and heat transfer during spray cooling / V. Serdyukov et al // Water. – 2021. – Vol. 13, № 19. – Article 2730. https://doi.org/10.3390/w13192730.
38. Gao X. Effects of nozzle positioning on single-phase spray cooling / X. Gao, R. Li // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2017. – Vol. 115. – P. 1247-1257. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.08.095.
39. Experimental investigation of spray cooling on smooth and micro-structured surfaces / Z. Zhang et al // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2014. – Vol. 78. – P. 879-887. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0017931014003159.
40. Characterization of spray atomization and heat transfer performance of pressure swirl nozzles / J.L. Xie et al // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2013. – Vol. 46. – P. 18-26. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1290072912003456.
41. Vitkovic P. Water distribution characteristics of spray nozzles in a cooling tower / P. Vitkovic // EPJ Web of Conferences. – 2015. – Vol. 92. – Article 02109. https://doi.org/10.1051/epjconf/20159202109.
42. Review on cooling tower nozzle types / K.G. Somasundar et al // Materials Today: Proceedings. – 2021. – Vol. 37. – P. 3016-3018. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.723.
43. Viljoen D.J. Evaluation and performance prediction of cooling tower spray nozzles. Master's thesis. Stellenbosch University, 2006. URL: https://scholar.sun.ac.za/.
44. Kloppers J.C. Cooling tower performance evaluation: Merkel, Poppe, and e-NTU methods of analysis / J.C. Kloppers, D.G. Kröger // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – 2005. – Vol. 127, № 1. – P. 1-7. https://doi.org/10.1115/1.1787504.
45. Qureshi B.A. A complete model of wet cooling towers with fouling in fills / B.A. Qureshi, S.M. Zubair // Applied Thermal Engineering. – 2006. – Vol. 26, № 16. – P. 1982-1989. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.01.010.
46. Schmidt D.P. The internal flow of diesel fuel injector nozzles: a review / D.P. Schmidt, M.L. Corradini // International Journal of Engine Research. – 2001. – Vol. 2, № 6. – P. 1-22. https://doi.org/10.1243/1468087011545316.
47. Fu Q. Numerical simulation of the internal flow of swirl atomizer under ambient pressure / Q. Fu // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. – 2016. – Vol. 230, № 10. – P. 1760-1770. https://doi.org/10.1177/0954406215598803.

48. 2D and 3D numerical modelling of internal flow of pressure-swirl atomizer / M. Malý et al // EPJ Web of Conferences. – 2019. – Vol. 213. – Article 02055. https://doi.org/10.1051/epjconf/201921302055.
49. Searching for a numerical model for prediction of pressure-swirl atomizer performance / M. Malý et al // Applied Sciences. – 2022. – Vol. 12, № 13. – Article 6357. https://doi.org/10.3390/app12136357.
50. Comprehensive theoretical formulation and numerical simulation of pressure-swirl atomizers with helical channels / J. Ronceros et al // Energies. – 2024. – Vol. 17, № 21. – Article 5414. https://doi.org/10.3390/en17215414.

А.А. Ахметов*, М.В. Ермоленко, О.А. Степанова
Шәкәрім университеті, 071412, Қазақстан Республикасы, Семей қаласы, Глинка көшесі, 20А
*e-mail: akhmetov_alikhan@bk.ru

ТЕХНИКАЛЫҚ БҮРКУ ЖҮЙЕЛЕРІНДЕГІ СУАРУ ҚҰРЫЛҒЫЛАРЫН ОҢТАЙЛАНДЫРУДЫҢ ГИДРОДИНАМИКАЛЫҚ ЖӘНЕ ЖЫЛУФИЗИКАЛЫҚ АСПЕКТІЛЕРІ – ШОЛУ

Мақалада техникалық жүйелердегі суару және бүрку құрылғыларының жұмыс істеуінің гидродинамикалық және жылуфизикалық аспектілеріне арналған заманауи зерттеулерге шолу ұсынылған. Жұмыстың мақсаты суару құрылғыларының конструкциялық, гидродинамикалық және жылуфизикалық параметрлерінің бүрку сипаттамалары мен жылу- және массаалмасу тиімділігіне әсері туралы заманауи ғылыми көзқарастарды жүйелеу болып табылады. Бүркілген ағынның қалыптасуын анықтайтын негізгі факторлар, соның ішінде жұмыс қысымы, сұйықтық шығыны, саптама геометриясы, бүріккіш түрі, тамшылардың өлшемі мен жылдамдығы, бүрку алауының ашылу бұрышы, сұйықтықтың таралу біркелкілігі және жұмыс ортасының қасиеттері қарастырылған. Суару құрылғыларының тиімділігі тек шығын мен қысыммен ғана емес, сонымен қатар тамшылы ағын құрылымымен және оның газдық ортамен, толтырмамен немесе жылуалмасу бетімен өзара әрекеттесу жағдайларымен анықталатыны көрсетілген. Тамшылы спектр, суару тығыздығы, саптаманың орналасуы, беттің күйі және жылуалмасу режимі шешуші рөл атқаратын бүрку арқылы салқындату мәселелеріне ерекше назар аударылған. Градирнялар мен буландырғыш жүйелер үшін жылу- және массаалмасу тиімділігін анықтайтын негізгі факторлардың бірі ретінде судың біркелкі таралуының маңызы көрсетілген. Сонымен қатар саптамалардағы ішкі ағынды және бүрку алауының қалыптасуын зерттеуге арналған CFD-модельдеу мүмкіндіктері қарастырылған. Суару құрылғыларын жобалау және оңтайландыру кезінде гидродинамикалық, жылуфизикалық және пайдалану параметрлерін кешенді түрде ескеру қажеттілігі туралы қорытынды жасалған.

Түйін сөздер*: *суару құрылғылары; сұйықтықтың атомизациясы; жылу- және массаалмасу; бүрку арқылы салқындату; CFD-модельдеу.

A.A. Akhmetov*, M.V. Yermolenko, O.A. Stepanova
Shakarim University, 071412, Republic of Kazakhstan, Semey, 20A Glinka St.
*e-mail: akhmetov_alikhan@bk.ru

HYDRODYNAMIC AND THERMOPHYSICAL ASPECTS OF SPRAYING DEVICE OPTIMIZATION IN TECHNICAL SPRAY SYSTEMS: A REVIEW

This paper presents a review of recent studies devoted to the hydrodynamic and thermophysical aspects of irrigation and spraying devices operating in technical systems. The aim of the study is to systematize current knowledge on the influence of design, hydrodynamic, and thermophysical parameters of irrigation devices on spray characteristics and the efficiency of heat and mass transfer processes. The main factors governing spray formation are considered, including operating pressure, liquid flow rate, nozzle geometry, atomizer type, droplet size and velocity, spray cone angle, liquid distribution uniformity, and properties of the working medium. It is shown that the efficiency of irrigation devices is determined not only by flow rate and pressure but also by the structure of the droplet flow and the conditions of its interaction with the surrounding gas medium, packing elements, or heat-transfer surfaces. Particular attention is paid to spray cooling, where heat transfer intensity depends on droplet size distribution, irrigation density, nozzle position, surface condition, and heat transfer regime. For cooling towers and evaporative systems, uniform water distribution is identified as one of the key factors affecting heat and mass transfer performance. The capabilities of CFD modeling for investigating internal nozzle flow and spray cone formation are also discussed. It is concluded that the optimization of irrigation devices should be based on the integrated consideration of hydrodynamic, thermophysical, and operational parameters during their design and application.

Key words: *irrigation devices; liquid atomization; heat and mass transfer; spray cooling; CFD modeling.*

Сведения об авторах

Алихан Алибекович Ахметов* – докторант образовательной программы 8D05302- «Техническая физика» кафедры «Техническая физика и теплоэнергетика», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: akhmetov_alikhan@bk.ru.

Михаил Вячеславович Ермоленко – к.т.н., ассоциированный профессор, старший преподаватель кафедры «Техническая физика и теплоэнергетика», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: tehfiz@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1677-8023.

Ольга Александровна Степанова – кандидат технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Техническая физика и теплоэнергетика», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: aug11@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5221-1772.

Авторлар туралы мәліметтер

Алихан Алибекович Ахметов* – «Техникалық физика және жылуэнергетика» кафедрасының 8D05302 – «Техникалық физика» білім беру бағдарламасының докторанты, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: akhmetov_alikhan@bk.ru.

Михаил Вячеславович Ермоленко – техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, «Техникалық физика және жылу энергетикасы» кафедрасының аға оқытушысы, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: tehfiz@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1677-8023.

Ольга Александровна Степанова – техника ғылымдарының кандидаты, профессор, «Техникалық физика және жылу энергетикасы» кафедрасының меңгерушісі, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: aug11@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5221-1772.

Information about the authors

Alikhan Alibekuly Akhmetov* – PhD Student of the Educational Program 8D05302 – Technical Physics, Department of «Technical Physics and Thermal Power Engineering», Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: akhmetov_alikhan@bk.ru.

Mikhail Vyacheslavovich Yermolenko – Candidate of Technical Sciences, associate professor, senior teacher of the department of «Technical Physics and Heat Power Engineering», Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: tehfiz@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1677-8023.

Olga Aleksandrovna Stepanova – Candidate of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of «Technical Physics and Heat Power Engineering», Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: aug11@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5221-1772.

Поступила в редакцию 29.06.2026
Поступила после доработки 20.08.2026
Принята к публикации 21.08.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-66

BY 4.0
Check for updates

ҒТАХР: 29.19.21

Т. Тусеев[1], А.А. Куйкабаева[1]*, Э.М. Зульбухарова[1], А.К. Данлыбаева[1], Қ.М. Омаров[2]
[1]Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті,
050040, Қазақстан Республикасы, Алматы қ. әл-Фараби даңғылы, 71
[2]Әскери бөлім 18292,
2050008, Қазақстан Республикасы, Алматы қаласы, Байзақов көшесі, 275 а
*e-mail: a.kuikabaeva1@gmail.com

КРЕМНИЙ ДИОКСИДІНІҢ (SiO_2) ГИДРОКСИЛ ҚАБАТЫНА ɣ-СӘУЛЕЛЕНУДІҢ ӘСЕРІ

Аңдатпа: *Жұмыста γ-сәулеленудің кремний диоксидінің адсорбциялық қасиеттеріне әсері зерттелді. SiO_2 бетінде оттегінің гамма-адсорбциясының спектралдық және температуралық тәуелділіктері анықталды, сәулеленудің гидроксилдік қабат күйіне ықпалы қарастырылды, парамагниттік және адсорбциялық орталықтар арасындағы өзара байланыс айқындалды, сондай-ақ радиациялық адсорбциядағы қоспалардың рөлі белгіленді. Вакуумда жүргізілген γ-сәулелену ИҚ-спектрдің түрін өзгертеді: оқшауланған және сутекпен байланысқан гидроксил топтарының (3750,*

©Т. Тусеев, А.А. Куйкабаева, Э.М. Зульбухарова, А.К. Данлыбаева, Қ.М. Омаров, 2026

3605 см⁻¹) интенсивтілігі азаяды, су молекуласының деформациялық тербеліс аймағында жаңа жолақтар (1555, 1520, 1380 см⁻¹) пайда болады. γ-кванттарымен сәулеленген SiO_2-ге (сәулелену дозасы 24 кГрей) оттегі жіберілгенде 3750 см⁻¹ жолақтың интенсивтілігі төмендейді. Сонымен қатар жұтылу максимумының аз жиіліктер жағына бірнеше см⁻¹-ге ығысуы байқалады.

Зерттеулер нәтижесінде γ-сәулеленген SiO_2-нің ИҚ-спектрлерін талдау барысында мынадай құбылыстар анықталды: γ-сәулелену әсерінен дегидро қышқылдандыру және дегидрлеу процестері жүреді. Сонымен қатар, оттегінің γ-адсорбциясы кезінде басқа адсорбция түрлерімен қатар қалдық органиканың радиолизі жүріп, нәтижесінде әртүрлі формиаттәрізді қосылыстар мен су түзіледі.

SiO_2 бетінің алдын ала активтендірілуі 200, 400, 600 және 800°С температураларда жүргізілді. Адсорбциялық сыйымдылықтың температуралық тәуелділігі 400–600 °С аралығында минимумға ие екендігі байқалды. Алдын ала прокалка температурасы артқан сайын γ-адсорбция жылдамдығы да, жалпы адсорбцияланған оттегінің мөлшері де өседі. Бұл температураларда ИҚ-спектроскопия деректері бойынша гидроксил топтарының бұзылуы жүреді.

Термодесорбциялық зерттеулер газ бөліну жылдамдығының максимумдары 100–120 °С және 200-400 °С аралығында байқалатынын көрсетті. Бұл бірнеше типті адсорбция орталықтарының бар екендігін дәлелдейді: бірінші максимум әдетте Н-орталықтарға, ал екіншісі координациялық орталықтарға сәйкес келеді.

ЭПР-спектрдің дозалық тәуелділігі белгілі заңдылыққа бағынады: сигнал формасы өзгермей, олардың интенсивтілігі доза артқан сайын ұлғаяды.

Алдын ала γ-сәулеленген SiO_2 бетінде оттегінің адсорбциясы парамагниттік орталықтардың санын арттырады, бұл оттегінің радикалды формада да адсорбцияланатынын көрсетеді.

Парамагниттік орталықтардың температуралық тәуелділігі айқын максимумға ие – шамамен 400 °С-та байқалады. 120 °С -ге дейінгі температураларда парамагниттік орталықтар іс жүзінде жойылмайды. Ал 240 °С температурада олар толықтай күйдіруге ұшырап, жоғалады. Бұл деректер SiO_2 бетінде әртүрлі типтегі адсорбциялық орталықтардың бар екенін және олардың тұрақтылығы температураға тәуелді екенін дәлелдейді.

Түйін сөздер: адсорбция, γ-сәулелену, спектрлік тәуелділік, температуралық тәуелділік, катализдік процесс.

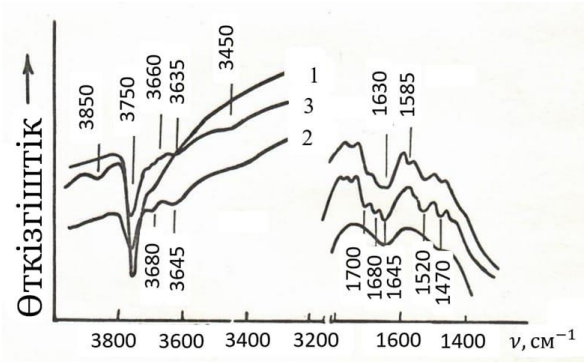
Кіріспе

Адсорбция беткі электрондық процестерге елеулі ықпал ететіндіктен қатты дене бетінде радиациялық-физикалық құбылыстарды зерттегенде, γ-сәулелену әсерінен жүретін адсорбциялық үрдістер маңызды рөл атқарады. Сәулелену жағдайындағы адсорбция мен оның салдарын зерттеу радиациялық ақаулардың түзілу механизмін және олардың адсорбциялық әрі катализдік процестердегі қатысуын түсінуге мүмкіндік береді. Бұл беттік және көлемдік ақаулардың рөлін, сондай-ақ белсенді орталықтардың табиғатын анықтауға жол ашады [1-3].

Тәжірибелік бөлім. Зерттеу нысандары ретінде кремний диоксидінің түрлері пайдаланылды: ICI (ірі кеуекті ірі силикагель), зертханалық жағдайда синтезделген аса таза «04» қоспасыз силикагель және аэросилдер [4]. Үлгілерге вакуумдық-термиялық өңдеу жүргізу және гамма-адсорбцияны зерттеу үшін қолданылған қондырғы цеолит-көмір адсорбциялық сорғылардан, диффузиялық сорғыдан, салқындатқыш тұзақтардан және қыздырылатын майсыз жоғары вакуумды ысырмадан құралған екі параллельді сорғылау тармағынан тұрады. Гамма-адсорбцияға арналған тәжірибелерде адсорбент – газ жүйесіндегі қысым өлшеулері адсорбат ретінде қолданылған газ бойынша алдын ала градирленген манометрлердің көмегімен жүргізілді. Жүйедегі температура хромель-алюмель, хромель-копель және платина-платинородий термопарларының көмегімен өлшенді. Зерттеуге пайдаланылған газдар негізінен сутек пен оттегі болды. γ-кванттарының көзі ретінде орталық арнасындағы дозалық қуаты 200 рад/сек сәулелену көзі – радиоактивті 60Co изотобының препараты болатын гамма-қондырғы қолданылды. Жұмыста жиіліктерінің аумағы 5000-400 см⁻¹ болатын «Karl Zeiss Jena» фирмасының UR-20c типті ИҚ-спектрометрі қолданылды. ЭПР (электрондық парамагниттік резонанс) әдісі арқылы гамма-кванттарымен сәулелену дозасының шамасына және алдын ала өңдеу температурасына байланысты сәулелендірілген кремний диоксидіндегі радиациялық ақаулар зерттелді [4]. Сәулелендіру алдында кремний диоксиді бірнеше сағат бойы термо-вакуумдық өңдеуден өткізілді. Үлгілер сәулелендірер алдында 6-8 сағат ауада қыздырылып, сонша уақыт вакуумда 400°С температурада күйдірілді.

Зерттеу нәтижелері және оларды талқылау

1-суреттен көрініп тұрғандай, вакуумда γ-сәулелендіру спектр түрін өзгертеді: оқшауланған және сутекпен байланысқан гидроксил топтарының (3750, 3605 $см^{-1}$) интенсивтілігі азаяды, ал су молекулаларының деформациялық тербелістері аймағында жаңа жолақтар (1555, 1520, 1380 $см^{-1}$) пайда болады.

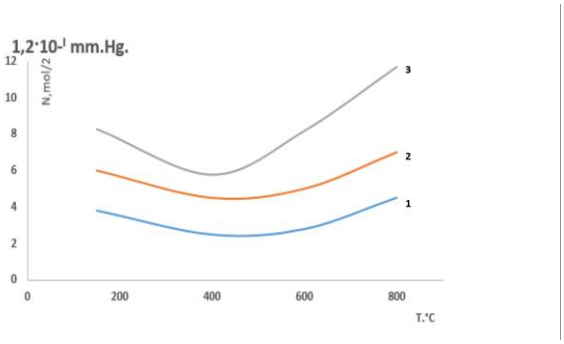


1 – шығыс спектр ($Т_к$ =400^0 С), 2 – 2,4 Мрад, 3 – O_2 жіберу

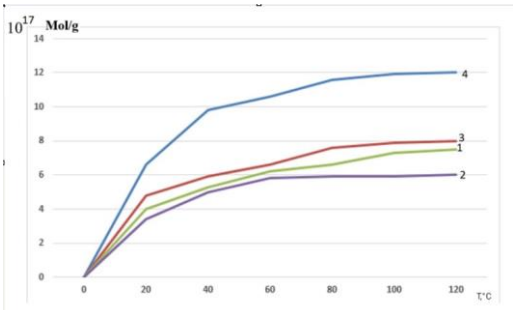
Сурет 1 – γ -сәулеленген двуокись кремнидің ИҚ спектрлері

Сәулелену дозасы 2,4 Мрад болатын γ-кванттарымен сәулелендірілген SiO_2-ге оттегін жіберу 3750 $см^{-1}$ жолағының интенсивтілігінің азаюына алып келеді. Сонымен қатар, жұтылу максимумының бірнеше $см^{-1}$-ге (төмен жиіліктер жағына қарай) ығысуы байқалады. Осылайша, γ-сәулелендірілген SiO_2 үлгілерінің ИҚ-спектрлерін зерттеу нәтижесінде γ-сәулеленудің әсерінен дегидроксилдену және дегидратация процестері жүретіні анықталды. SiO_2 бетінің алдын ала температуралық белсендендірудің маңыздылығын анықтау үшін 200, 400, 600 және 800 °С температуралары таңдалды.

Алынған эксперименттік мәліметтер 2-6-суреттерде келтірілген. 2-суреттен көрініп тұрғандай, SiO_2 адсорбциялық сыйымдылығының температураға тәуелділігі 400-600 °С күйдіру аймағында минимумға ие.



Сурет 2 – алдын ала күйдіру температурасына байланысты γ-адсорбцияланған оттегі мөлшерінің тәуелділігі: Dγ = 2,4 (1,3) және 18,6 (2) Мрад, P_0 = 7·10^{-2} (1,2) және 1,2·10^{-1} (3) мм. сын. бағ.



1 – $Т_к$=200, 2 – 400, 3 – 600, 4 – 800°С (Dγ= 2,4 Мрад)

Сурет 3 – кремний диоксидіндегі гамма-адсорбцияның кинетикасы

350-500°С аралығында алдын ала өңдеу температурасы артқанда адсорбциялық қабілеттің өсетіні [4] еңбегінде, SiO_2 бетінде γ- және радиациялық адсорбцияны зерттеу барысында байқалған. Алдын ала өңдеу температурасы артқан сайын каталитикалық белсенділіктің жоғарылауы [5] еңбегінде атап өтілген. Оттегінің гамма-адсорбциясы кезінде алдын ала өңдеу температурасының 600-800°С-қа дейін жоғарылауы SiO_2-тің O_2-ге қатысты адсорбциялық сыйымдылығының артуына әкелетін құбылыс байқалады. Оттек реакциясының өнімдері сутектік байланыс түзе алатын беткі гидроксил топтарынан бөлек, радикалды орталықтардың да бар екенін болжамдауға болады (5-сурет). Қоспалық орталықтардың рөлін де жоққа шығаруға болмайды, алайда олар алдын ала өңдеу температурасына тәуелді емес сияқты, сондықтан бұл жерде олар қарастырылмайды [6].

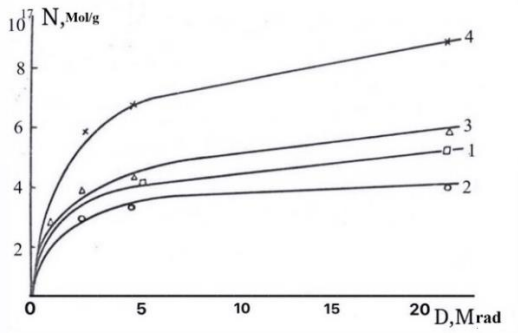
Болжам бойынша, 200°С температурада өңдеу кезінде негізгі рөлді қалдық органикалық ластаушы заттардың тотығуы атқарады; бұл температурада органика толық күйіп бітпейді, ал сәулелендіру кезінде радиолиз және органикалық бөлшектердің бетке қарай диффузиясы орын алуы мүмкін. Алдын ала өңдеу температурасы 200°С болған жағдайда біз келесі адсорбция орталықтарын ескере аламыз: 1) беткі гидроксилдік орталықтар, 2) радикалды орталықтар және 3) қоспалық орталықтар. Жоғарыда аталған орталықтардағы адсорбциядан бөлек, оттегі ішінара тотығу процестеріне де жұмсалуы мүмкін.

Алдын ала 400°С температурада күйдірілген кезде адсорбция минималды деңгейде болады, бұл күтпеген нәтиже болып көрінеді. Бұл жағдайда тотығу процестері маңызды рөл атқармайды [7].

SiO_2-ті алдын ала күйдірудің алдыңғы температурасына қарағанда оттегінің адсорбцияланған молекулалары санының азаюы, болжам бойынша, 200°С температурада тотығу процестерінің елеулі үлесімен түсіндіріледі. Өйткені 400°С кезінде координациялық байланысқан судың жойылуына байланысты радикалды орталықтардың түзілу процесі жеңілдейді, яғни радикалды орталықтар саны артуы байқалады (5-сурет). Алдын ала күйдіру температурасы артқан сайын гамма-адсорбция жылдамдығы да, сондай-ақ жалпы адсорбцияланған оттегі мөлшері де өседі.

Бұл эффектті түсіндіру үшін γ-сәулелендіру кезінде адсорбентте белсенді адсорбция орталықтарының түзілу сызбасын келесідей деп болжауға болады: күйдіру температурасы артқан сайын SiO_2 бетінде силоксан көпірлерінің саны артады, олар оттегінің қатысуымен тиімді байланыс түзе алады. γ-сәулелену байланыстарды үзбей бүкіл кешенді қозған күйге келтіреді. Алдын ала өңдеу температурасы өзгерген кезде SiO_2 бетінде оттегінің γ-адсорбциясының дозалық тәуелділігі (4-сурет) айтарлықтай өзгерістерге ұшырамайды.

Сапалық тұрғыдан алғанда, барлық температуралар үшін сәулелену дозасы артқан сайын адсорбцияланған зат мөлшері өседі [8]. Күйдіру температурасы артқан сайын (бұл әсіресе 800 °С температурада айқын байқалады) қанығу үлкен дозаларда жүзеге асады. Егер 400°С температурада қанықтыру шамамен 10 Мрад дозада жүрсе, 600°С және 800°С температурада осы дозалар аймағында сіңірілген газ мөлшерінің жоғарылауы байқалады. Басқаша айтқанда, температура жоғарылаған сайын радиацияның шығымы да артады.

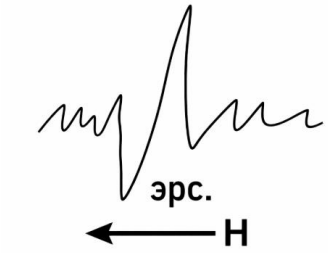


1 – $T_к$=200, 2 – 400, 3 – 600, 4 – 800°С (P_o=7.10^{-2} мм.сын.бағ.)

Сурет 4 – SiO_2 бетінде O_2-нің γ-адсорбциясының дозалық тәуелділігі

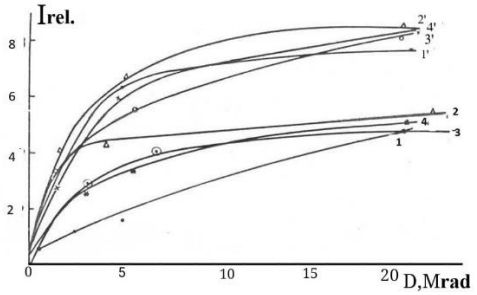
γ – сәулелендірілген SiO_2-тің ЭПР спектрлері (5-сурет) кем дегенде 5 немесе 6 сызықтан тұрады, және 6-сызық 1 Мрад-тан жоғары дозаларда пайда болып, дозамен пропорционалды түрде интенсивтілігі артады. SiO_2-тің ЭПР спектріндегі барлық

компоненттердің дозалық тәуелділігі бірдей заңдылыққа бағынады: олардың интенсивтілігі доза артқан сайын өседі, сигналдың формасы өзгермей сақталады [9].



Сурет 5 – γ -сәулелендірілген SiO_2 ЭПР спектрі. (D = 18,6 Мрад)

SiO_2 ЭПР спектрінің температуралық және дозалық тәуелділігі, сондай-ақ оған оттегінің адсорбциясының әсері 6-суретте көрсетілген. Бұл тәжірибелерде (Т > 400°С) үлгілер алдын ала кварц ампулаларында сыналды, содан кейін вакуумды бұзбай, шыны ампулаларға ауыстырылып бөлме температурасында сәулелендірілді. Оттегін жіберу белгілі көлемдегі ампулаға жүзеге асырылды.



1 – Т = 200, 2 – 400, 3 – 600, 4 – 800°С, 1' - 4' – 0_2 шығарғаннан кейінгі (P_O=I,2'I0 мм. сын.бағ.)

Сурет 6 – SiO_2-дегі парамагниттік орталықтардың дозаға тәуелділігі

Температураға тәуелділікті зерттеу нәтижесінде парамагниттік орталықтардың (ПМО) ең жоғары концентрациясы алдын ала күйдіру температурасы 400-600°С аралығында байқалатыны анықталды. Дәл осы температурада γ-сәулелендірілген SiO_2 үлгілерінің адсорбциялық белсенділігі ең төмен деңгейде болады.

Қорытынды

1. Кремний диоксиді бетіндегі гамма-адсорбциялық құбылыстарды зерттеу кезінде адсорбция жылдамдығы мен адсорбцияланған газдың мөлшері, парамагниттік орталықтардың концентрациясы (γ-сәулелену кезінде) үлгінің алдын ала қыздыру температурасына байланысты екендігі анықталды. γ-адсорбциялық белсенділіктің минимумы Т = 800°С және Т = 400°С температураларда байқалады [10].
2. γ-сәулелермен сәулелендіру оксидтердің беткі гидроксил топтарының бұзылуына әкеледі. Бұл кезде су мен сутегі молекулалары бөлінеді. Судың десорбциясы 400°С дейінгі күйдіру температурасында жүреді, ал сутегінің десорбциясы 400 °С-тан жоғары температурада жүзеге асады. Сусыздандыру және дегидроксилдену кремний диоксиді бетінде шиеленісті силоксан көпірлерін пайда тудырады.
3. Гамма-сәулелермен сәулелену кезінде кремний диоксидінде электронды және тесік қасиеттері бар парамагниттік орталықтар пайда болады. ЭПР (электронды парамагниттік резонанс) сигналдарының максималды қарқындылығы 400°С алдын ала өңдеу температурасында байқалады.

Әдебиеттер тізімі

1. Bondarenko G.G. Radiatsionnaya fizika, struktura i prochnost' tverdykh tel: uchebnoe posobie / G.G. Bondarenko. – 3-e izd. – M. : Laboratoriya znanii, 2024. – 465 s. (in Russian).
2. Impact of Gamma-Ray Radiation on SiO_2 Hydroxyl Cover / T. Tusseyev et al // AIP Conference Proceedings. – 2024. – Vol. 3020, iss. 1. – Art. 030009. https://doi.org/10.1063/5.0193755.

3. Meng D. Gamma-ray irradiation-induced oxidation and disproportionation at the amorphous SiO_2/Si interfaces / D. Meng, M. Lan, Z. Yang // Journal of Materials Chemistry C. – 2020. – Vol. 8, № 47. – P. 17065-17073. https://doi.org/10.1039/D0TC03942J.
4. Polymerization, grafting and adsorption in the presence of inorganic substrates: thermal polymerization of styrene with untreated and γ-irradiated silica gel as a case study / F. D'Acunzo et al // Polymer. – 2013. – Vol. 54, iss. 25. – P. 6695-6701. https://doi.org/10.1016/j.polymer.2013.10.044.
5. Performance degradation mechanism of γ-ray irradiated sol-gel silica film / B. Li et al // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2023. – Vol. 622. – Art. 122666. https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2023.122666.
6. The effect of γ-ray radiation on surface physicochemical processes on Al_2O_3 / T.T. Tusseyev et al // Journal of Physics: Conference Series. – 2025. – Vol. 2984. – Art. 012021. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2984/1/012021.
7. Sn/SnO_2/MWCNT composite anode and electrochemical impedance spectroscopy studies for Li-ion batteries / M. Alaf et al // Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures. – 2016. – Vol. 24, № 10. – P. 630-634. https://doi.org/10.1080/1536383X.2016.1221403.
8. Radtsig V.A. Hydrogenation of the silanone groups $(\equiv Si–O)_2Si=O$: experimental and quantum-chemical studies / V.A. Radtsig, I.N. Senchenya // Russian Chemical Bulletin. – 1996. – Vol. 45, № 8. – P. 1849-1856. https://doi.org/10.1007/BF01457762.
9. Li C. Radiation stability of SiO_2 micro- and nanopowders under electron and proton exposure / C. Li, M.M. Mikhailov, V.V. Neshchimenko // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2014. – Vol. 319. – P. 123–127. https://doi.org/10.1016/j.nimb.2013.11.007.
10. Radiation-stimulated adsorption processes on the surface of beryllium oxide / T.T. Tusseyev et al // Chimica Techno Acta. – 2022. – Vol. 9, № 1. – Art. 20229106. – P. 1-5. https://doi.org/10.15826/chimtech.2022.9.1.06.

T. Tusseyev[1], A. Kuykabaeva[*], A. Danlybaeva[1], E. Zulbukharova[1], K. Omarov[2]
Al-Farabi Kazakh National University,
050040, Republic of Kazakhstan, Almaty, Al-Farabi Avenue, 71
[2]Military Unit 18292
2050008, Republic of Kazakhstan, Almaty city, Baizakov Street, 275a
[*]e-mail: a.kuikabaeva1@gmail.com

THE EFFECT OF γ IRRADIATION ON THE HYDROXYL LAYER OF SILICON DIOXIDE (SiO_2)

The study investigated the effect of γ-irradiation on the adsorption properties of silicon dioxide. Spectral and temperature dependencies of gamma-adsorption of oxygen on SiO2 were determined, the influence of irradiation on the state of the hydroxyl layer was examined, the correlation between paramagnetic and adsorption centers was revealed, and the role of impurities in radiation adsorption was established.

γ-irradiation in vacuum changes the appearance of the IR spectrum: the intensity of isolated and hydrogen-bonded hydroxyl groups (3750, 3605 cm^{-1}) decreases, while new bands (1555, 1520, 1380 cm^{-1}) appear in the region of water deformation vibrations. Introducing oxygen onto γ-irradiated SiO2 (irradiation dose 24 kGy) causes a decrease in the intensity of the 3750 cm^{-1} band. At the same time, a slight shift of the absorption maximum toward lower frequencies by several cm^{-1} is observed.

In the study of IR spectra of γ-irradiated SiO2, it was established that γ-irradiation induces processes of dehydroxylation and dehydration. During γ-adsorption of oxygen, along with other forms of adsorption, radiolysis of residual organic matter occurs, resulting in the formation of various formate-like compounds as well as water.

Preliminary activation of the SiO_2 surface was carried out at temperatures of 200, 400, 600 and 800°C. The temperature dependence of the adsorption capacity of SiO2 shows a minimum in the calcination range of 400-600°C. With increasing preliminary calcination temperature, both the rate of gamma-adsorption and the total amount of adsorbed oxygen increase. At these temperatures, IR spectroscopy data indicate the destruction of hydroxyl groups.

Thermodesorption studies reveal that maxima in gas release rates are observed at 100-120°C and 200-400°C, indicating the presence of several types of adsorption centers. The first maximum is usually attributed to H-centers, while the second corresponds to coordination centers.

The dose dependence of the EPR spectrum of SiO2 follows a regular pattern: the intensities increase with rising dose while the signal shape remains unchanged.

Oxygen adsorption on pre-irradiated SiO2 increases the number of paramagnetic centers, which provides grounds to conclude that oxygen adsorption also occurs in a radical form.

The temperature dependence of paramagnetic centers shows a pronounced maximum at 400°C. Up to 120°C, the paramagnetic centers on SiO2 are almost not annealed. At 240°C, however, the paramagnetic centers are completely annealed. This behavior highlights the thermal stability range of different adsorption-related centers and confirms the radical nature of oxygen interaction with γ-irradiated silica.

Key words: *adsorption, γ irradiation, spectral dependence, temperature dependence, catalytic process.*

Т. Тусеев[1], А.А. Куйкабаева[*], А.К. Данлыбаева[1], Э.М. Зульбухарова[1], К.М. Омаров[2]
[1]Казахский Национальный Университет имени аль-Фараби,
050040, Республика Казахстан, Алматы, проспект аль-Фараби, 71
Воинская часть 18292, 2050008, Республика Казахстан, Алматы, улица Байзакова, 275 а
*e-mail: a.kuikabaeva1@gmail.com

ВЛИЯНИЕ γ-ИЗЛУЧЕНИЯ НА ГИДРОКСИЛЬНЫЙ СЛОЙ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ (SiO_2)

В работе проведены исследования влияния γ-излучения адсорбционные свойства диоксида кремния. Определены спектральные и температурные зависимости гамма-адсорбции кислорода на SiO_2, изучено влияние облучения на состояние гидроксильного слоя, выявлена взаимосвязь между парамагнитными и адсорбционными центрами, а также установлена роль примесей в радиационной адсорбции. γ-облучение в вакууме изменяет вид ИК-спектра: уменьшается интенсивность изолированных и водородно-связанных гидроксильных групп (3750, 3605 $см^{-1}$), появляются новые полосы (1555, 1520, 1380 $см^{-1}$) в области деформационных колебаний воды. Напуск кислорода на облученный γ-квантами SiO_2 (доза облучения 24 КГрей) вызывает уменьшение интенсивности полосы 3750 $см^{-1}$. Одновременно происходит некоторое смещение максимума поглощения (в сторону малых частот) на несколько см $^{-1}$.

При исследовании ИК-спектров γ-облученных SiO_2 установлено, что под воздействием γ-облучения происходит процесс дегидроксилирования и дегидратации, при γ-адсорбции кислорода наряду с другими формами адсорбции идет процесс радиолиза остаточной органики и в результате которой образуются различные формиатподобные соединения, а также вода. Предварительная активация поверхности SiO_2 производилась при температурах: 200, 400, 600 и 800°C. Температурная зависимость адсорбционной емкости $Si0_2$ имеет минимум в области прокалки 400 - 600°C. С увеличением температуры предварительной прокалки возрастает и скорость гамма-адсорбции и, вместе с тем, общее количество адсорбированного кислорода. При этих температурах, по данным ИК-спектроскопии, происходит разрушение гидроксильных групп. Термодесорбционные исследования показывают, что максимумы скоростей газовыделения наблюдаются при температурах 100-120°C и 200-400°C, что говорит о наличии нескольких типов центров адсорбции. Первый максимум обычно приписывается Н-центрам, второй – координационным. Дозовая зависимость ЭПР-спектра SiO_2 подчиняется закономерности: их интенсивности увеличиваются с ростом дозы при неизменной форме сигнала.

*Адсорбция кислорода на предварительно облученной SiO_2 увеличивает число парамагнитных центров**,** что даёт основание говорить об адсорбции кислорода и в радикальной форме. Температурная зависимость парамагнитных центров имеет ярковыраженный максимум при 400°C. Парамагнитные центры на SiO_2 до 120°C почти не отжигаются. При температуре 240°C парамагнитные центры полностью отжигаются.*

Ключевые слова: *адсорбция, γ-излучение, спектральная зависимость, температурная зависимость, катализный процесс.*

Авторлар туралы мәліметтер

Тугара Тусеев – ф.-м.ғ.д., Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің доценті, физика-техникалық факультеті, жылу физикасы және техникалық физика кафедрасы; e-mail: turgaratus@mail.ru.

Айжан Амангалиевна Куйкабаева* – PhD, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің доценті, физика-техникалық факультеті, жылу физикасы және техникалық физика кафедрасы; e-mail: a.kuikabaeva@gmail.com.

Актолқын Кентаевна Данлыбаева – аға оқытушы, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, физика-техникалық факультеті, жылу физикасы және техникалық физика кафедрасы; e-mail: daniybaeva@gmail.com.

Эльмира Мукановна Зульбухарова – аға оқытушы, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, физика-техникалық факультеті, жылу физикасы және техникалық физика кафедрасы; e-mail: Zulbuharova@mail.ru.

Қуандық Мейрамгалиевич Омаров – магистр, Әскери бөлім 18292; e-mail: omar_kyandyk84@mail.ru.

Сведения об авторах

Тугара Тусеев – д.ф.-м.н., профессор, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, физико-технический факультет, кафедра теплофизики и технической физики; e-mail:turgaratus@mail.ru.

Айжан Амангалиевна Куйкабаева* – PhD, доцент Казахский национальный университет им. аль-Фараби, физико-технический факультет, кафедра теплофизики и технической физики; e-mail: a.kuikabaeva@gmail.com.

Актолкын Кентаевна Данлыбаева – к.ф.-м.н., старший преподаватель, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, физико-технический факультет, кафедра теплофизики и технической физики; e-mail: ospan.doszhanov56@mail.ru.

Эльмира Мукановна Зульбухарова – старший преподаватель, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, физико-технический факультет, кафедра теплофизики и технической физики; e-mail: Zulbuharova@mail.ru.

Куандык Мейрамгалиевич Омаров – магистр, Воинская часть 18292; e-mail: omar_kyandyk84@mail.ru.

Information about the authors

Turgara Tusseyev – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Docent, Al-Farabi Kazakh National University, Faculty of Physics and Technology, Departament of Thermophysics and Technical Physics; e-mail: turgaratus@mail.ru.

Aizhan Amangalievna Kuykabayeva* – PhD, Senior teacher, Al-Farabi Kazakh National University, Faculty of Physics and Technology, Departament of Thermophysics and Technical Physics; e-mail: a.kuikabaeva@gmail.com.

Aktolkyn Kentaevna Danlybayeva – Candidat of Physical and Mathematical Sciences, Senior teacher, Al-Farabi Kazakh National University, Faculty of Physics and Technology, Departament of Thermophysics and Technical Physics; e-mail: daniybaeva@gmail.com.

Elmira Zulbukharova – Senior teacher, Al-Farabi Kazakh National University, Faculty of Physics and Technology, Departament of Thermophysics and Technical Physics; e-mail: Zulbuharova@mail.ru.

Kuandyk Meiramgalievich Omarov – Master's degree, Military Unit 18292; e-mail: omar_kyandyk84@mail.ru.

Редакцияға енуі 30.03.2026
Өңдеуден кейін түсуі 11.06.2026
Жариялауға қабылданды 12.06.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-67

МРНТИ: 29.15.3, 58.35.09

CC BY 4.0
Check for updates

А.К. Мухамедиев*, И.В. Прозорова, А.А. Прозоров, А.С. Акаев
Национальный ядерный центр Республики Казахстан,
Республика Казахстан, г. Курчатов, ул. Бейбіт атом, 10
*e-mail: mukhamediev@nnc.kz

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ ОЯТ БН-350 ПРИ РАЗРУШЕНИИ ВНУТРЕННИХ КОНСТРУКЦИЙ КОНТЕЙНЕРА ХРАНЕНИЯ

Аннотация: *Актуальность исследования обусловлена необходимостью обеспечения радиационной безопасности при длительном хранении отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) реактора БН-350, отличающегося сложным изотопным составом и высоким уровнем остаточной активности. Цель работы – оценка радиационной обстановки при повреждении защитных и внутренних конструктивных элементов контейнера хранения ОЯТ в различных аварийных сценариях.*

В работе использованы методы трёхмерного моделирования с помощью метода Монте-Карло, а также сценарный анализ разрушений контейнера, включая локальное разрушение стенок и внутренних элементов, перераспределение топлива и осыпание топливных таблеток. Расчёты

©А.К. Мухамедиев, И.В. Прозорова, А.А. Прозоров, А.С. Акаев, 2026

мощности дозы и плотности потоков γ-излучения проводились с учётом всех процессов рассеяния и поглощения излучения.

Результаты моделирования показали, что разрушение внутренних конструкций контейнера приводит к многократному увеличению дозового поля как по высоте контейнера, так и на определённом расстоянии от него, формированию выраженной анизотропии γ-излучения и локальных пиков мощности дозы. Это подчёркивает критическую роль целостности внутренних элементов для поддержания радиационной безопасности.

Выводы исследования могут быть использованы для оценки радиационного риска, разработки регламентов контроля состояния контейнеров и планирования мер защиты персонала при долговременном хранении ОЯТ БН-350.

Ключевые слова: *Монте-Карло, MCNP, радиационная безопасность, МЭД, БН-350, γ-излучение, ОЯТ.*

Введение

Отработавшее ядерное топливо реакторов на быстрых нейтронах является интенсивным источником γ-излучения, что требует повышенных мер радиационной безопасности при его транспортировании и долговременном хранении. Особое место в этой области занимает ОЯТ реактора БН-350, отличающееся сложным изотопным составом и высоким уровнем остаточного энерговыделения на протяжении длительного времени после выгрузки из активной зоны.

Безопасность хранения ОЯТ БН-350 определяется эффективностью защитных свойств контейнеров хранения, включающих внутренние конструкции: корзины для тепловыделяющих сборок, дистанционирующие и фиксирующие элементы, а также материалы для радиационной и нейтронной защиты. В проектных условиях эти элементы обеспечивают заданную геометрию размещения топлива, ограничивают нейтронное размножение и снижают уровни мощности дозы за пределами контейнера до нормативных значений.

В процессе длительной эксплуатации и хранения возможна деградация внутренних конструктивных элементов контейнера под воздействием механических, термических, коррозионных и аварийных факторов. Потенциальное разрушение или смещение отдельных элементов приводит к изменению пространственного распределения источников излучения и ухудшению защитных свойств контейнера, что может вызвать локальное или общее повышение γ-излучения.

Несмотря на наличие многочисленных исследований, посвящённых оценке радиационных характеристик контейнеров хранения ОЯТ[1-3], влияние различных вариантов разрушения внутренних конструкций на формирование радиационной обстановки для ОЯТ БН-350 остаётся недостаточно изученным, что обосновывает необходимость проведения моделирования и анализа возможных нештатных конфигураций.

Условия и методы

Настоящая работа направлена на исследование радиационных характеристик ОЯТ реактора БН-350 с учётом возможного разрушения внутренних конструкций контейнера хранения. В расчётах применяется детализированное трёхмерное моделирование, учитывающее реальные размеры контейнера и чехлов, распределение топлива, а также состав и толщину защитных слоёв, поскольку такая детализация существенно влияет на распределение мощности γ-излучения и оценку дозовых полей при повреждённых состояниях контейнера [4, 5].

Рассматриваются изменения целостности внутренних элементов, включая частичное и полное разрушение стенок ТВС и перераспределение топлива [6], что приводит к локальным пикам дозовых полей и изменению спектрального состава излучения. Анализ таких сценариев позволяет выявить закономерности изменения мощности дозы, оценить влияние характера и степени разрушений на защитные свойства контейнера и определить наиболее радиационно-опасные конфигурации.

Полученные данные создают основу для количественной оценки радиационного риска для персонала и окружающей среды и могут быть использованы для практических рекомендаций по обеспечению долговременной радиационной безопасности хранения ОЯТ БН-350.

Радиационные расчеты были проведены с помощью многоцелевой программы MCNP с использованием библиотек констант ENDF/B5 и ENDF/B6 [7, 8]. Плотность потока излучения рассчитывалась при условии учета всех процессов, связанных с рассеянием и поглощением γ-излучения. Перевод флюенса фотонного излучений в эффективную дозу осуществлялся с помощью коэффициентов, описанных в [9].

Упаковочный комплект хранения (УКХ). Контейнер разработан специально для долговременного хранения ТВС реактора БН-350 и представляет собой массивный металлический цилиндр, толщиной стенки 450 мм (внутренним диаметр – 1500 мм, внешний – 2400 мм). Контейнер обеспечивает механическую стойкость, защиту от коррозии и радиационное экранирование. Для повышения радиационной защиты боковая металлическая оболочка дополнена композитной многослойной системой, состоящей из чередующихся слоев из стали и высокопрочного бетона. Детальные параметры указаны в таблице 1.

Таблица 1 – Состав и материалы элементов конструкции

№	Элемент	Толщина, мм	Материал
1	Боковая стенка	16	Сталь 12Х18Н10Т
		53	Бетон ОПБСТ В90 Д3400
		25	Сталь 09Г2СА-А
		340	Бетон ОПБСТ В110 Д4100
		16	Сталь 09Г2СА-А
2	Крышка	190	Сталь 09Г2СА-А
		180	Сталь 09Г2СА-А
		25	Сталь 12Х18Н10Т
3	Дно	20	Сталь 12Х18Н10Т
		70	Бетон ОПБСТ В90 Д3400
		25	Сталь 09Г2СА-А
		330	Бетон ОПБСТ В110 Д4100
		25	Сталь 09Г2СА-А
	Используемые материалы		
4	сталь 12Х18Н10Т	высоко-коррозионностойкая нержавеющая сталь, обеспечивает долговечность конструкции	
5	сталь 09Г2СА-А	конструкционная сталь, компенсирует растягивающие напряжения в массиве бетонных элементов, повышает прочность и долговечность контейнера	
6	бетон В90 Д3400	тяжелый бетон высокой плотности, эффективно ослабляет поток γ-излучения	
7	бетон В110 Д4100	особо тяжелый бетон, обеспечивает дополнительное экранирование и структурную жесткость защитной оболочки.	

Расчетная конфигурация восьмиместного УКХ приведена на рисунке 1.

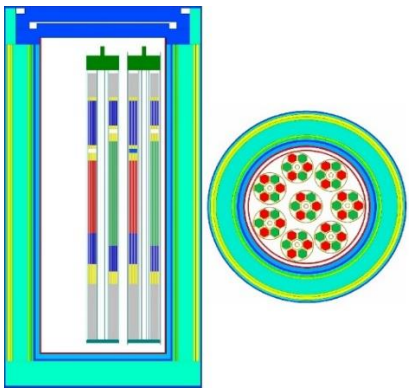


Рисунок 1 – Расчетная конфигурация УКХ

Расчеты проведены на дату 01.01.2025 г. Суммарная интенсивность на эту дату гамма-излучения продуктов деления, γ-излучения и излучения ^{60}Co от одного УКХ с восьмиместным чехлом составила $8 \cdot 1{,}76 \cdot 10^{11} = 1{,}41 \cdot 10^{12}$ квант/с.

МЭД определялась на расстоянии 1 м от корпуса УКХ.

Расчетная модель чехла для программы MCNP воспроизводит реальные конструктивные элементы и материалы корпуса чехла, а также характеристики топлива. В качестве расчетного выбран наиболее «горячий» шестиместный чехол. Корпус представляет собой цилиндр диаметром 406,4 мм и длиной 3854 мм (с захватной головкой – 3989 мм); толщина обечайки – 4 мм, днища – 25 мм, крышки с приваренной защитной пробкой – 200 мм. В каждом чехле размещены 3 ОТВС активной зоны РУ БН-350 третьего типа и 3 экранные ОТВС второго типа, ТВС расположены симметрично вокруг центральной опорной трубы, чередуясь по окружности с равным шагом, что обеспечивает сбалансированное распределение топлива и снижает коэффициент размножения нейтронов (рис. 2).

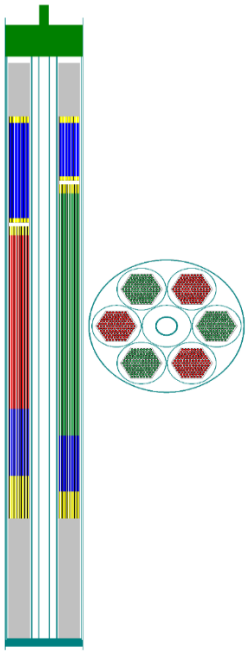


Рисунок 2 – Расчетная конфигурация шестиместного чехла

Был разработан сценарный анализ разрушений (локальное разрушение стенок и внутренних элементов контейнера) – для исследования радиационной обстановки в различных нештатных конфигурациях создано 8 (модели № 2-9) полноценных расчётных моделей чехлов, учитывающих частичное и полное разрушение стенок, а также осыпание топливных таблеток (табл. 2). Эти модели позволяют системно анализировать перераспределение источников γ-излучения внутри чехла и формируют локальные пики мощности дозы, демонстрируя влияние характера и степени разрушений на радиационную обстановку.

Таблица 2 – Расчетные модели чехлов с ТВС

№ модели	% разрушения чехла ТВС	% осыпания топливных таблеток	Примечания
1	-	-	исходное состояние
2	25%	-	лёгкие повреждения чехла ТВС
3		25%	лёгкие повреждения чехла ТВС с осыпанием верхней части топлива
4	50%	-	средние повреждения чехла ТВС
5		25%	средние повреждения чехла ТВС с осыпанием верхней части топлива
6		50%	средние повреждения чехла ТВС, половина топлива осыпана
7	100%	-	полное разрушение стенок чехла
8		25%	полное разрушение стенок чехла с осыпанием верхней части топлива
9		50%	полное разрушение стенок чехла, половина топлива осыпана

Результаты

В результате расчетов были полу чены данные о дозовых полях γ-излучения, создаваемого одиночным контейнером с отработавшим ядерным топливом, с различными вариантами разрушения стенок ТВС и осыпанием топлива. На рисунках 3-7 представлены распределения МЭД для всех вариантов расчетных моделей.

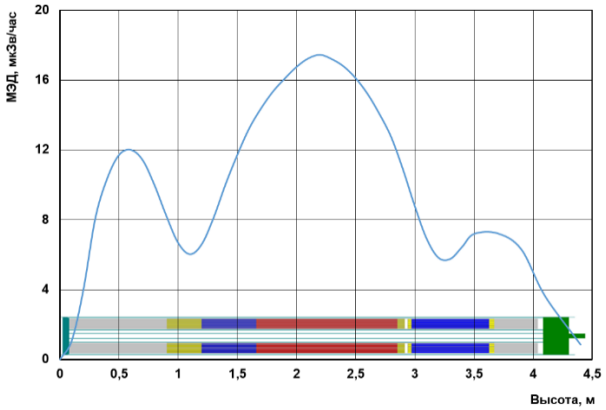


Рисунок 3 – Распределение МЭД по высоте (модель № 1- исходное состояние) на расстоянии 1 м от боковой стенки УКХ

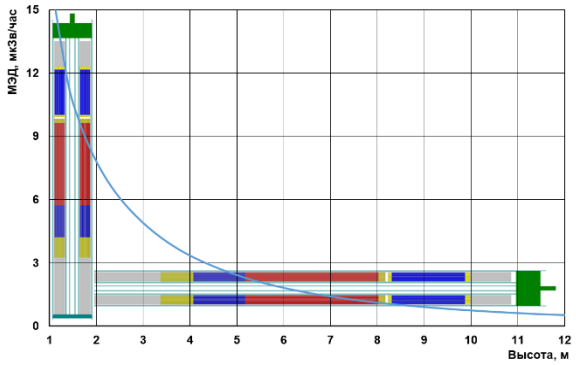


Рисунок 4 – Распределение МЭД (модель № 1 исходное состояние) на расстоянии 1-12 м от боковой стенки УКХ

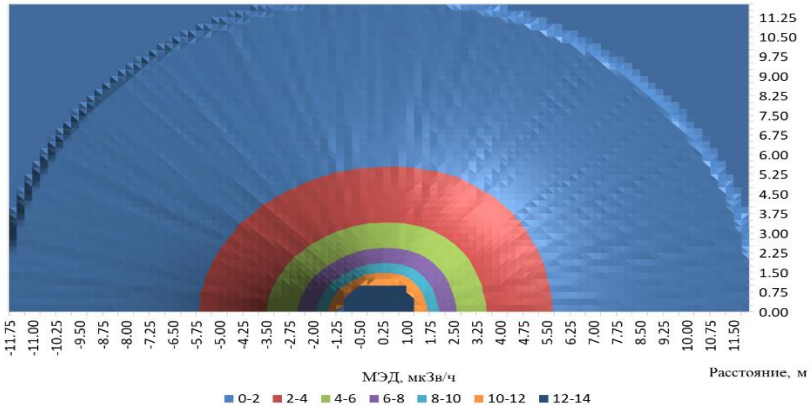


Рисунок 5 – Картограмма дозовых полей ионизирующего излучения (модель № 1 исходное состояние) от центра УКХ

Среднее значение МЭД по высоте УКХ от 0 до 2 м на расстоянии 1 м от стенки УКХ составляют:

1) Для модели № 1(исходная) – 9,96 мкЗв/ч;
2) Для моделей № 2, 4 и 7 – 12,8, 13,22 и 13,94 мкЗв/ч;
3) Для моделей № 3, 5 и 8 – 18,1; 18,38 и 19,1 мкЗв/ч;
4) Для моделей № 6 и 9 – 25,06 и 25,58 мкЗв/ч.

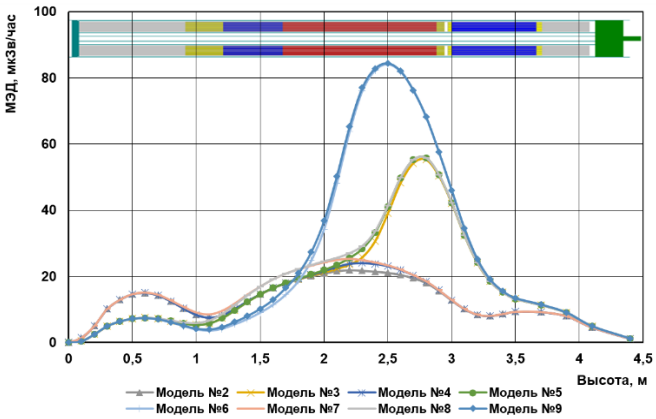


Рисунок 6 – Распределение МЭД по высоте (модели № 2-9) на расстоянии 1 м от боковой стенки УКХ

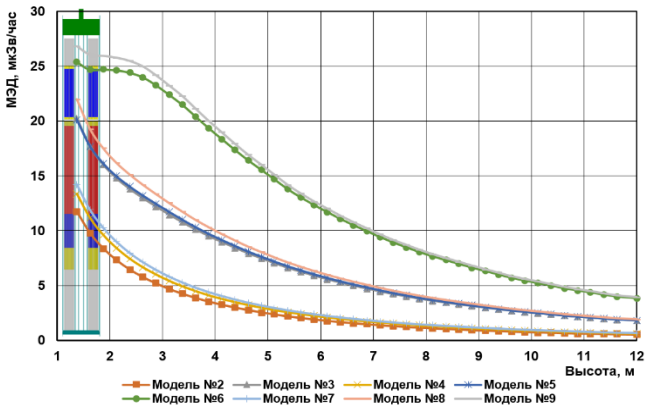


Рисунок 7 – Распределение МЭД по высоте (модели № 2-9) на расстоянии 1-12 м от боковой стенки УКХ

Обсуждение результатов

Результаты расчетов демонстрируют, что нештатные разрушения внутренних конструкций контейнера УКХ с ОЯТ БН-350 существенно изменяют радиационную обстановку рядом с контейнером. Нарушение проектной геометрии размещения топлива приводит к перераспределению γ-излучения, формированию выраженной анизотропии полей дозы и локальным пикам МЭД. Эти эффекты согласуются с другими исследованиями, где точное трёхмерное моделирование структуры контейнера и источников излучения является ключевым для корректной оценки дозовых характеристик с помощью метода Монте Карло [10, 11].

Наиболее критические сценарии сочетают разрушение стенок ТВС и одновременного перераспределения топлива, что создаёт локальные зоны 2–3-кратной дозовой нагрузки по высоте, разрушение ТВС и осыпание топлива значительно повышает МЭД от исходного.

Таким образом, трехмерное детализированное моделирование радиационной обстановки в MCNP с точным воспроизведением геометрии контейнера, чехлов и распределения топлива позволяет достоверно выявлять критические конфигурации и оценивать относительные изменения дозовых полей. Ограничения модели связаны с допущением стационарности источников излучения, неизменностью физико-химических свойств материалов и использованием табличных коэффициентов перевода флюенса в дозу. Несмотря на это, моделирование предоставляет надежную основу для выявления наиболее опасных сценариев разрушений и количественной оценки радиационного риска для персонала при обращении с ОЯТ.

Выводы

1. Основные результаты исследования

Разработано девять полноценных расчетных моделей контейнера УКХ с ОЯТ БН-350, включая исходное состояние и восемь нештатных сценариев разрушений. Анализ

показывает, что разрушение стенок ТВС и осыпание топлива приводит к многократному увеличению МЭД и формированию анизотропных дозовых полей. Наиболее критические сценарии сочетают значительное разрушение конструкций и перераспределение топливной массы.

2. Влияние разрушения внутренних конструкций

Нарушение проектной геометрии размещения топлива снижает эффективность самозащиты и повышает МЭД дозового поля. Локальное увеличение γ-излучения особенно заметно при утрате элементов, выполняющих функцию ограничения нейтронного размножения ~10%, однако разрушение непосредственно топливных элементов способствует повышению значения МЭД на 156%, а при наихудшем сценарии – на 287%.

3. Практическая значимость

Полученные результаты позволяют:

– обосновывать меры радиационной безопасности при длительном хранении ОЯТ;

– разрабатывать регламенты контроля состояния контейнеров;

– оценивать риски при потенциальной деградации внутренних элементов конструкций.

4. Направления дальнейших исследований

– создание более детализированных моделей деградации конструкций с учетом времени хранения, активности продуктов деления.

– экспериментальная верификация расчетов на основе дозиметрических измерений.

– расширение анализа на контейнеры других конструкций и различные сроки выдержки ОЯТ.

Заключение

Выполненное моделирование подтвердило, что разрушения внутренних конструкций контейнера УКХ с ОЯТ реактора БН-350 существенно меняют распределение и интенсивность полей γ- и вокруг УКХ. Перераспределение топлива вследствие разрушения стенок ТВС приводит к локальному увеличению МЭД и к выраженной анизотропии дозовых полей, причём вклад той или иной геометрии возрастает при разрушении ТВС или осыпания топливных таблеток значительным образом.

Анализ моделей № 2-9 показал, что локальное разрушение стенок ТВС и осыпание топлива могут увеличивать МЭД на расстоянии 1 м от боковой стенки УКХ до 85 мкЗв/ч, что значительно выше значения для исходного, неразрушенного состояния.

Локальные пики дозовых полей формируются вблизи зон скопления топлива, а анизотропия распределения гамма-излучения достигает 2-3-кратного различия по высоте. Эти численные данные позволяют прогнозировать изменения дозовых характеристик при различных сценариях разрушений, определять критические зоны для персонала и планировать меры радиационной защиты, включая дистанционное наблюдение и усиленное экранирование в областях с максимальными МЭД.

Полученные закономерности позволяют прогнозировать изменение дозовых характеристик при деградации конструкций и могут служить основой для разработки практических мер контроля, оценки рисков и совершенствования требований к конструкции и эксплуатации УКХ в условиях длительного хранения отработавшего топлива.

Список литературы

1. Problems of Temporary Storage of SNF of Research Reactors in At-Reactor Storages. / V.P. Evstigneev et al // D. Radioactive Waste. – 2018. – № 3(4). – P. 87-94.

2. Radiation shielding analysis of the HI-STORM FW storage cask / D. Grgic et al // Nuclear Engineering and Design/ – 2022. – Vol. 396. https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2022.111878.

3. SHIELDING ANALYSIS OF DUAL PURPOSE CASKS FOR SPENT NUCLEAR FUEL UNDER NORMAL STORAGE CONDITIONS / KO J. et al // Nuclear Engineering and Technology. – 2014. – Vol. 46, Issue 4. – P. 547-556, ISSN 1738-5733. https://doi.org/10.5516/NET.08.2013.039.

4. Lee K. Evaluation of dose rate and uncertainty of fuel debris in a canister for safe handling and management of damaged nuclear fuels / K. Lee, M. Fratoni // Annals of Nuclear Energy. – 2023. – № 181. – P. 109515. https://doi.org/10.1016/j.anucene.2022.109515.

5. Sobolev A.V. Problemy raschetnogo analiza radiatsionnoi bezopasnosti konteinerov OYAT / A.V. Sobolev, P.A. Danilov // Izvestiya vuzov. Yadernaya ehnergetika. – 2019. – № 4. – S. 39-48. https://doi.org/10.26583/npe.2019.4.03. (in Russian).

6. Radiation effect assessment on spent fuel transport CASK by aircraft sabotage attack / H. Park et al // Annals of Nuclear Energy. – 2024. – № 198. – P. 110325. https://doi.org/10.1016/j.anucene.2023.110325.
7. MCNP – a general Monte-Carlo Code for neutron and photon Transport /J.F. Briesmeister et al. Los Alamos, 1997. – LA-7396M.
8. ENDF/B-VI Nuclear Data for Science and Technology: Cross Sections, Covariances, Fission Product Yields and Decay Data / M.B. Chadwick et al // Nuclear Data Sheets. – 2006. – Vol. 107, Issues 12. – P. 2931-3060.
9. Gigienicheskie normativy. Sanitarno-ehpidemiologicheskie trebovaniya k obespecheniyu radiatsionnoi bezopasnosti, utverzhdennye prikazom Ministra natsional'noi ehkonomiki Respubliki Kazakhstan № 155 ot 27.02.2015. (in Russian).
10. Ueki K. Radiation shielding analysis of a spent fuel transport cask with an actual configuration model using the Monte Carlo method – comparison with the discrete ordinates Sn method / K. Ueki, K. Sasaki // Proceedings of the 14th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials (PATRAM 2004), Berlin, Germany, September 20-24, 2004. Available at: https://resources.inmm.org/patram-proceedings/radiation-shielding-analysis-spent-fuel-transport-cask-actual-configuration.
11. Propagation of radiation source uncertainties in spent fuel cask shielding calculations / B. Ebiwonjumi et al // Nuclear Engineering and Technology. – 2022. – № 54(8). – P. 3073-3084. https://doi.org/10.1016/j.net.2022.03.001.

Статья подготовлена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (Проект программно-целевого финансирования BR24993104 «Проведение исследований в обоснование выбора эффективных и оптимальных способов и технологий обращения с ОЯТ реакторной установки БН-350»).

А.К. Мухамедиев*, И.В. Прозорова, А.А. Прозоров, А.С. Акаев
Қазақстан Республикасының Ұлттық ядролық орталығы,
Қазақстан Республикасы, Курчатов қ., Бейбіт атом к-сі, 10
*e-mail: mukhamediev@nnc.kz

САҚТАУ КОНТЕЙНЕРІНІҢ ІШКІ КОНСТРУКЦИЯЛАРЫ БҰЗЫЛҒАН КЕЗДЕ БН-350 ПЯО-НЫҢ РАДИАЦИЯЛЫҚ ЖАҒДАЙЫН МОДЕЛЬДЕУ

Зерттеудің өзектілігі күрделі изотоптық құрамымен және қалдық белсенділігінің жоғары деңгейімен ерекшеленетін БН-350 реакторының пайдаланылған ядролық отынын (ПЯО) ұзақ уақыт сақтау кезінде радиациялық қауіпсіздікті қамтамасыз ету қажеттілігіне негізделген. Жұмыстың мақсаты – әртүрлі авария сценарийлерінде ПЯО-ны сақтау контейнерінің қорғаныш және ішкі конструктивтік элементтері зақымдалған кезде радиациялық ахуалды бағалау.

Жұмыста Монте-Карло әдісімен үш өлшемді модельдеу әдістері, сондай-ақ қабырғалары мен ішкі элементтерінің жергілікті бұзылуын, отынды қайта бөлуді және отын таблеткаларының төгілуін қоса алғанда, контейнердің бұзылуын сценарийлік талдау қолданылады. Дозаның қуатын және γ-сәулелену ағындарының тығыздығын есептеу сәулеленудің барлық шашырау және сіңіру процестерін ескере отырып жүргізілді.

Модельдеу нәтижесі контейнердің ішкі конструкциясының бұзылуы контейнердің биіктігі бойынша да, одан белгілі бір қашықтықта да доза өрісінің бірнеше есе ұлғаюына, γ-сәулеленудің айқын анизотропиясының және доза қуатының жергілікті шыңының қалыптасуына әкелетінін көрсетті. Бұл радиациялық қауіпсіздікті сақтау үшін ішкі элемент тұтастығының маңызды рөлін көрсетеді.

Зерттеу қорытындылары радиациялық тәуекелді бағалау, контейнерлердің жай-күйін бақылау регламенттерін әзірлеу және БН-350 ПЯО-ны ұзақ уақыт сақтау кезінде персоналды қорғау шараларын жоспарлау үшін пайдаланылуы мүмкін.

Түйін сөздер: *Монте-Карло, MCNP, радиациялық қауіпсіздік,ЭДҚ, БН-350, γ-сәулелену, ПЯО.*

A.K. Mukhamediyev*, I.V. Prozorova, A.A. Prozorov, A.S. Akayev
National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan,
Republic of Kazakhstan, Kurchatov city, Beibit Atom street, 10
*e-mail: mukhamediev@nnc.kz

MODELING THE RADIATION ENVIRONMENT OF BN-350 SPENT NUCLEAR FUEL UNDER STORAGE CONTAINER INTERNAL STRUCTURE FAILURE SCENARIOS

The study addresses radiation safety in the long-term storage of spent nuclear fuel (SNF) from the BN-350 reactor. The fuel is characterized by a complex isotopic composition and a high level of residual activity. The aim of this work is to evaluate the radiation environment under various accident scenarios involving damage to protective and internal structural elements of a spent nuclear fuel (SNF) storage container.

The study employs three-dimensional Monte Carlo modeling methods. In addition, a scenario-based analysis of container failure is performed, including local damage to the walls and internal components, fuel redistribution, and fuel pellet fragmentation. Dose rate and gamma-ray flux density calculations were carried out with consideration of all scattering and absorption processes.

The simulation results show that damage to the internal structures of the container leads to a multiple increase in the dose field along the container height and at a certain distance from it, as well as pronounced gamma-ray anisotropy and local dose rate peaks. This emphasizes the importance of maintaining the integrity of internal components for radiation safety.

The findings of this study can be applied to radiation risk assessment, development of container condition monitoring regulations, and planning of personnel protection measures during long-term storage of BN-350 spent nuclear fuel (SNF).

Key words: *Monte Carlo, MCNP, radiation safety, dose rate, BN-350, gamma radiation, spent nuclear fuel.*

Сведения об авторах

Асхат Кспекович Мухамедиев* – инженер лаборатории, Филиал Институт атомной энергии Национального ядерного центра Республики Казахстан города Курчатов, Республика Казахстан; e-mail: mukhamediev@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-6717-1598.

Ирина Валентиновна Прозорова – начальник лаборатории, Филиал Институт атомной энергии Национального ядерного центра Республики Казахстан города Курчатов, Республика Казахстан; e-mail: prozorova@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8701-9756.

Андрей Александрович Прозоров – начальник группы лаборатории, Филиал Институт атомной энергии Национального ядерного центра Республики Казахстан города Курчатов, Республика Казахстан; e-mail: paa@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-5055-9272.

Асан Сабырович Акаев – начальник отдела, Филиал Институт атомной энергии Национального ядерного центра Республики Казахстан города Курчатов, Республика Казахстан; e-mail: akaev@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4792-6161.

Авторлар туралы мәлімет

Асхат Кспекович Мухамедиев* – Қазақстан Республикасы, Курчатов қ., Қазақстан Республикасының Ұлттық ядролық орталығының Атом энергиясы институты филиалының зертхана инженері; e-mail: mukhamediev@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-6717-1598.

Ирина Валентиновна Прозорова – Қазақстан Республикасы, Курчатов қ. Қазақстан Республикасының Ұлттық ядролық орталығының Атом энергиясы институты филиалының зертхана бастығы; e-mail: prozorova@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8701-9756.

Андрей Александрович Прозоров – Қазақстан Республикасы, Курчатов қ. Қазақстан Республикасының Ұлттық ядролық орталығының Атом энергиясы институты филиалы зертханасының топ бастығы; e-mail: paa@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-5055-9272.

Асан Сабырович Акаев – Қазақстан Республикасы, Курчатов қ. Қазақстан Республикасының Ұлттық ядролық орталығының Атом энергиясы институты филиалының бөлім бастығы; e-mail: akaev@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4792-6161.

Information about the authors

Askhat Kspekovich Mukhamediev* – Laboratory Engineer, Institute of Atomic Energy Branch, National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Republic of Kazakhstan; e-mail: mukhamediev@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-6717-1598.

Irina Valentinovna Prozorova – Head of Laboratory, Institute of Atomic Energy Branch, National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Republic of Kazakhstan; e-mail: prozorova@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8701-9756.

Andrey Alexandrovich Prozorov – Head of Laboratory Group, Institute of Atomic Energy Branch, National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Republic of Kazakhstan; e-mail: paa@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-5055-9272.

Asan Sabyrvich Akaev – Head of Department, Institute of Atomic Energy Branch, National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Republic of Kazakhstan; e-mail: akaev@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4792-6161.

Поступила в редакцию 20.04.2026
Поступила после доработки 25.06.2026
Принята к публикации 26.06.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-68

IRSTI: 55.19.03

BY 4.0
Check for updates

Zh.B. Sagdolina[1], D.B. Buitkenov[1], M.M. Ezhembaev[1], N.N. Yusof[2], A.B. Nabioldina[*]
[1]Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University
070002, Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk, st. Shakarima 148
[2]School of Physics, Universiti Sains Malaysia, 11800, USM, Penang, Malaysia
*e-mail: anabioldina@vku.edu.kz

INFLUENCE OF PROTECTIVE COATING ON THE MECHANICAL AND TRIBOLOGICAL PERFORMANCE OF CEMENTED CARBIDE TURNING INSERTS

Abstract: *This study presents a comprehensive comparative evaluation of the performance characteristics of commercial coated cemented carbide turning inserts of different grades after turning operations. The wear mechanisms of the cutting edge were investigated using scanning electron microscopy (SEM) and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS). In addition, the mechanical properties of the coatings, including microhardness and elastic modulus, were determined by instrumented indentation, while their adhesion strength was evaluated using the progressive scratch test. The results revealed that the coating failure was governed by a combination of abrasive and adhesive wear mechanisms, accompanied by localized edge chipping, crater formation, and material transfer from the workpiece onto the tool surface. The highest microhardness values (2258-2261 HV) were obtained for the YBC252 series inserts, which correlated with a lower degree of coating degradation after machining. Scratch test results demonstrated that coatings with higher hardness exhibited greater resistance to mechanical failure and superior adhesion strength. The comprehensive analysis established a clear relationship between the mechanical properties of the coatings, their wear mechanisms, and the service performance of commercial cemented carbide turning inserts.*

Key words: *turning insert, cemented carbide tool, coating wear, scanning electron microscopy, energy-dispersive X-ray spectroscopy, microhardness, scratch test, adhesion strength.*

Introduction

Improving the productivity of modern machining processes is closely associated with enhancing the service life of cutting tools. Among various tool materials, WC-Co cemented carbide turning inserts are widely used owing to their high hardness, excellent thermal stability, and superior wear resistance. To further improve their performance, protective coatings produced by chemical vapor deposition (CVD) and physical vapor deposition (PVD) technologies are commonly applied to the insert surface. Multilayer coating systems such as TiCN/Al_2O_3/TiN, TiAlN, TiN, and their modifications are extensively employed because they provide increased hardness, reduced friction coefficient, and enhanced tool life during the machining of various engineering materials [1, 2]. Each layer in a multilayer coating system performs a specific function. The TiCN layer provides high hardness and excellent resistance to abrasive wear, while the Al_2O_3 layer acts as an effective thermal and diffusion barrier, reducing heat transfer and diffusion wear during cutting. The outer TiN layer decreases the friction coefficient and improves the tribological interaction between the cutting tool and the workpiece. The synergistic effect of these layers significantly improves the durability of cutting tools under high cutting speeds and elevated temperatures.

In recent years, considerable attention has been devoted to investigating the wear behavior of coated cemented carbide inserts after machining. Previous studies have shown that coating degradation during turning results from the combined effects of mechanical and thermal loading, leading to abrasive, adhesive, diffusion, and oxidative wear mechanisms. Depending on the cutting conditions, these mechanisms result in crater wear, flank wear, built-up edge formation, local coating delamination, and cutting-edge chipping [3, 4]. Scanning electron microscopy (SEM) combined with energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) has become one of the most effective approaches for investigating coating degradation. These techniques enable detailed characterization of wear morphology, identification of coating failure regions, and determination of material transfer from the

©Zh.B. Sagdolina, D.B. Buitkenov, M.M. Ezhembaev, N.N. Yusof, A.B. Nabioldina, 2026

workpiece to the cutting tool surface. Several studies have reported that the presence of elements such as Fe, Cr, and Cu on worn tool surfaces indicates adhesive interaction between the workpiece and the cutting tool, resulting in the formation of secondary surface layers within the tool–chip contact zone [5]. In addition to wear morphology, the mechanical properties of protective coatings play a crucial role in determining tool performance. Coating microhardness governs resistance to plastic deformation and abrasive wear, whereas adhesion strength determines the coating's ability to remain intact under progressively increasing contact loads. Instrumented indentation and progressive scratch testing are widely used to evaluate hardness, elastic modulus, critical failure loads, and coating adhesion. Numerous investigations have demonstrated that increased microhardness and improved adhesion strength significantly reduce wear intensity and extend cutting tool life [6, 7].

Despite the considerable number of studies devoted to the development of advanced protective coatings and the investigation of their wear mechanisms, comparative studies of commercial coated cemented carbide turning inserts from different manufacturers tested under identical cutting conditions remain limited. Most published research focuses on one or two coating systems, whereas comprehensive comparisons involving wear morphology, mechanical properties, and adhesion performance of commercially available inserts are rarely reported [8, 9].

Therefore, the objective of the present study is to perform a comprehensive comparative evaluation of the performance of commercial coated cemented carbide turning inserts after turning operations. The study combines SEM/EDS analysis of wear mechanisms with instrumented indentation measurements of microhardness and elastic modulus, together with progressive scratch testing to evaluate coating adhesion. Furthermore, the relationship between the mechanical properties of the coatings, their failure mechanisms, and the operational performance of the cutting inserts is established.

Materials and methods

Six commercially available coated cemented carbide turning inserts from different manufacturers were selected as the materials for this study. The investigated inserts differed in carbide grade, coating architecture, and intended machining applications. The following inserts were examined: ONGU08T508-PM JT4235, RT16.01N-1.50GM YBG201, DCMT070208-HM YBG202, CNMG120408-DM YBC252, VBMT160408-HM YBC252, and TN16ER300M T8030. All investigated inserts were manufactured from WC-Co cemented carbide substrates coated with multilayer wear-resistant coatings deposited by industrial coating technologies. According to the manufacturers' specifications, the coating systems consisted of various combinations of TiN, TiCN, and Al_2O_3 layers designed to improve wear resistance, thermal stability, and tribological performance during metal cutting. Prior to the mechanical characterization, all inserts were subjected to turning tests under identical cutting conditions. After machining, the worn inserts were used for subsequent investigations of wear morphology, mechanical properties, and coating adhesion.

The worn cutting edges were examined using a SEM3200 scanning electron microscope (SEM) to investigate the wear morphology and coating degradation after machining. The observations were performed at different locations along the cutting edge to identify wear mechanisms, coating failure regions, crater wear, edge chipping, plastic deformation, and other surface defects. The chemical composition of the wear products and the transferred workpiece material was analyzed using an XFlash Detector 730M-300 energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) system (Bruker, Germany). Elemental mapping and point analyses were performed in representative wear regions to determine the distribution of coating elements and to identify the transfer of workpiece material onto the cutting tool surface.

The mechanical properties of the coatings were evaluated by instrumented indentation using a FISCHERSCOPE HM2000S tester in accordance with ISO 14577. Measurements were performed using a Vickers diamond indenter, allowing continuous recording of the load–displacement curve during loading and unloading. The maximum applied load was 2000 mN, with a holding time of 20 s at the peak load. The obtained load–displacement curves were used to determine the Vickers hardness (HV) and the instrumented elastic modulus (EIT) of the coatings. For each insert, measurements were performed at several locations on the coating surface, and the reported values represent the average of multiple indentations.

The adhesion strength of the coatings was evaluated by means of a progressive scratch test using an Anton Paar RST300 scratch tester in accordance with the recommendations of ISO 20502. A Rockwell C diamond indenter with a tip radius of 200 μm was employed. Scratch tests were performed under a linearly increasing normal load ranging from 0.5 to 200 N over a 3 mm scratch length at a constant scratching speed of 4 mm/min. During the test, the normal load, tangential force, friction coefficient, penetration depth, residual depth, and acoustic emission signal were continuously recorded. The critical loads corresponding to coating failure were determined from abrupt changes in the friction coefficient, acoustic emission signals, penetration depth, and by optical examination of the scratch tracks after testing.

Results and discussion

After the turning operation, the worn surfaces of the cutting inserts were examined by scanning electron microscopy (SEM) in combination with energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS). The investigations were aimed at identifying the wear mechanisms, the nature of coating failure, and determining the elemental composition of the surface after service. The SEM images of the worn surface of the ONGU08T508-PM JT4235 insert (Fig. 1) indicate significant damage to the cutting part of the tool. Intensive crater wear accompanied by local coating failure was observed on the rake face. Chipping and local edge spalling were detected in the cutting-edge region, indicating the development of fatigue-induced coating failure under high contact stresses. The EDS analysis revealed the presence of iron (Fe) in the wear zone, indicating the transfer of workpiece material onto the tool surface as a result of adhesive interaction. During the friction between two metals, adhesion of the contacting surfaces may occur, resulting in the transfer of the machined material onto the surface of the cutting tool. A built-up edge forms on the rake face along the cutting edge and consists of highly deformed particles of the workpiece material. It should be noted that the built-up edge forms most intensively during the machining of ductile metals, such as steel, aluminum, and ductile brass. The banded structure of the built-up edge indicates its continuous growth due to retarded layers of the chip adhering to its surface (Fig. 1). In addition, coating constituents and cemented carbide substrate elements (W and Al) were identified in the damaged region, indicating local disruption of the integrity of the protective coating and partial exposure of the substrate. The obtained results suggest that the dominant wear mechanisms of this insert are crater wear, adhesive wear, and localized cutting-edge chipping.

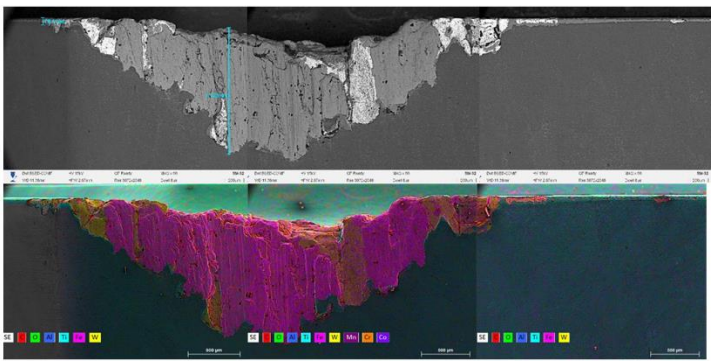


Figure 1 – SEM micrographs of the worn surface and EDS elemental maps of the ONGU08T508-PM JT4235 turning insert after turning

The SEM analysis of the YBC252 CNMG120408-DM insert (Fig. 2) showed that the coating failure was predominantly localized in the cutting-edge region. The elemental distribution maps indicate a non-uniform distribution of aluminum, which is associated with the local degradation of the upper Al_2O_3 layer. In certain areas, partial preservation of the underlying Ti(C,N) layer was observed, confirming the multilayer structure of the coating. The EDS analysis revealed the presence of iron (Fe) in the wear region, which is associated with the transfer of workpiece material and the formation of secondary surface layers in the tool–chip contact zone. Despite the local degradation of the upper coating layer, a significant part of the protective coating system retained its integrity, indicating sufficiently high resistance of the coating to service loading.

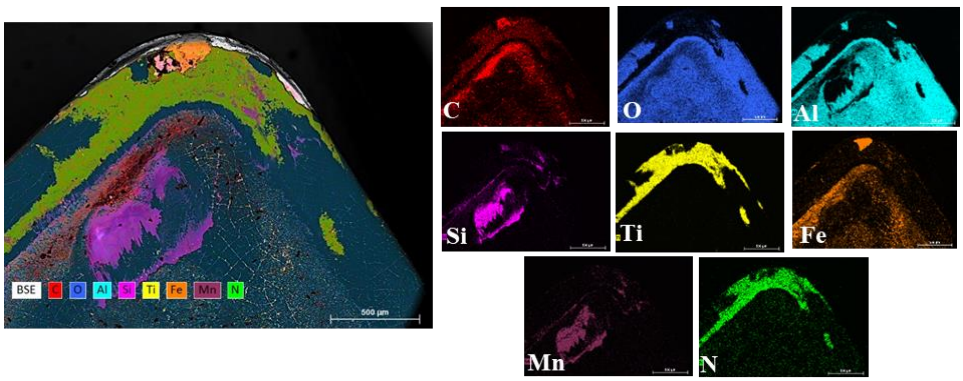


Figure 2 – SEM micrographs of the worn surface and EDS elemental distribution maps of the YBC252 CNMG120408-DM cemented carbide turning insert after turning

Local chipping and minor edge spalling were observed on the surface of the YBG202 DCMT070208-HM insert (Fig. 3). Compared with the previous samples, the coating degradation was less pronounced, and no evidence of severe crater wear was observed. Elemental analysis revealed the presence of copper (Cu) on the worn surface, indicating the transfer of workpiece material during the cutting process and the development of adhesive interaction between the tool and the workpiece. At the same time, coating elements (Ti, Al, N, and O) remained on the surface, confirming that a significant portion of the protective coating was preserved after service. The analysis of the surface morphology indicates that adhesive and abrasive wear are the predominant wear mechanisms for this sample, while the coating degradation is localized in nature.

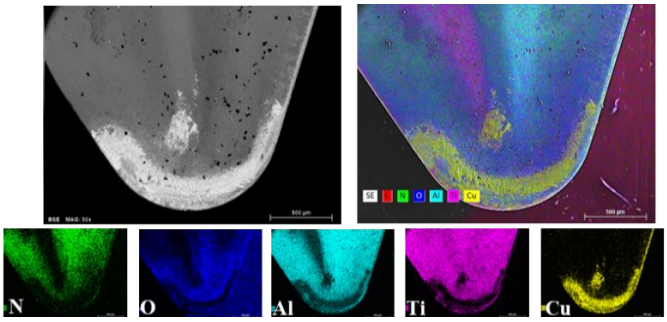


Figure 3 – SEM micrographs of the worn surface and EDS elemental distribution maps of the YBG202 DCMT070208-HM cemented carbide turning insert after turning

The comparison of the SEM/EDS results showed that the failure behavior of the investigated coatings strongly depends on their composition and structure. The most severe coating degradation was observed for the ONGU08T508-PM JT4235 insert, which was characterized by pronounced crater wear, cutting-edge chipping, and transfer of workpiece material onto the tool surface. The YBC252 CNMG120408-DM coating exhibited local degradation of the upper Al_2O_3 layer while preserving the underlying Ti(C,N) layer, indicating the high effectiveness of the multilayer coating architecture. The YBG202 DCMT070208-HM insert exhibited the lowest degree of coating degradation, where adhesive interaction and abrasive wear were the dominant wear mechanisms without significant disruption of the coating integrity.

To evaluate the mechanical properties of the investigated coatings, instrumented indentation tests were performed. The obtained values of microhardness and elastic modulus, as well as the representative load-penetration depth curves, are presented in Fig. 4. The test results showed that the investigated commercial coatings exhibited different mechanical properties. The microhardness values ranged from 1792 to 2261 HV, whereas the elastic modulus varied from 410 to 571 GPa. The lowest microhardness was obtained for the DNMG 150608E-FM insert and amounted to 1792 ± 170 HV, with an elastic modulus of 297.9 ± 160.6 GPa. The highest microhardness was observed for the YBC252 series inserts. The VBMT160408-HM YBC252 insert exhibited a microhardness of 2261 ± 390 HV, while the CNMG120408-DM YBC252 insert showed a value of 2259 ± 365 HV. At the same time, these coatings exhibited high elastic modulus values (413-516 GPa), indicating their high resistance to plastic deformation under contact loading.

Sample	HV	E, GPa
ONGU08T508-PM JT4235	1850.7±175.9	310.0±108.8
DNMG 150608E-FM	1792.0±169.6	297.9±160.6
TN 16ER300M Grade T8030	1937.8±241.6	570.7± 74.3
YBC252 VBMT160408-HM	2261.4± 389.7	515.5±110.5
YBC252 CNMG120408-DM	2258.7±365.1	413.0± 85.8

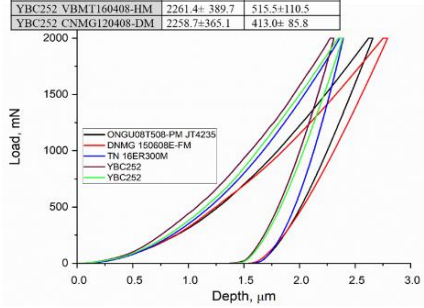


Figure 4 – Dependence of indentation depth on the applied load

The adhesion strength of the coatings was evaluated by means of a progressive scratch test. The obtained curves of the friction coefficient, tangential force, indenter penetration depth, residual depth, and acoustic emission are presented in Fig. 5. For all investigated samples, a gradual increase in the friction coefficient and indenter penetration depth was observed with increasing normal load. Coating failure was accompanied by characteristic spikes in the acoustic emission signal and changes in the penetration depth profile, indicating the local initiation of cracks and partial coating failure. It should be noted that the investigated coatings exhibited different behavior under scratch loading. For the YBC252 series inserts, the recorded parameters changed more gradually, without abrupt fluctuations during the initial stages of the test, indicating high coating adhesion strength and its ability to withstand increasing loads without premature failure. In contrast, for the ONGU08T508-PM JT4235, RT16.01N-1.50GM YBG201, and TN16ER300M Grade T8030 inserts, signs of local coating failure appeared at lower loads. This was accompanied by an increase in the acoustic emission signal and a more pronounced increase in the indenter penetration depth, indicating lower resistance of these coatings to contact mechanical loading. The scratch test results are consistent with the instrumented indentation and SEM analyses. Coatings with higher microhardness exhibited superior adhesion strength and a lower degree of degradation after turning. In contrast, coatings with lower hardness showed earlier failure under mechanical loading and more intensive wear of the cutting edge.

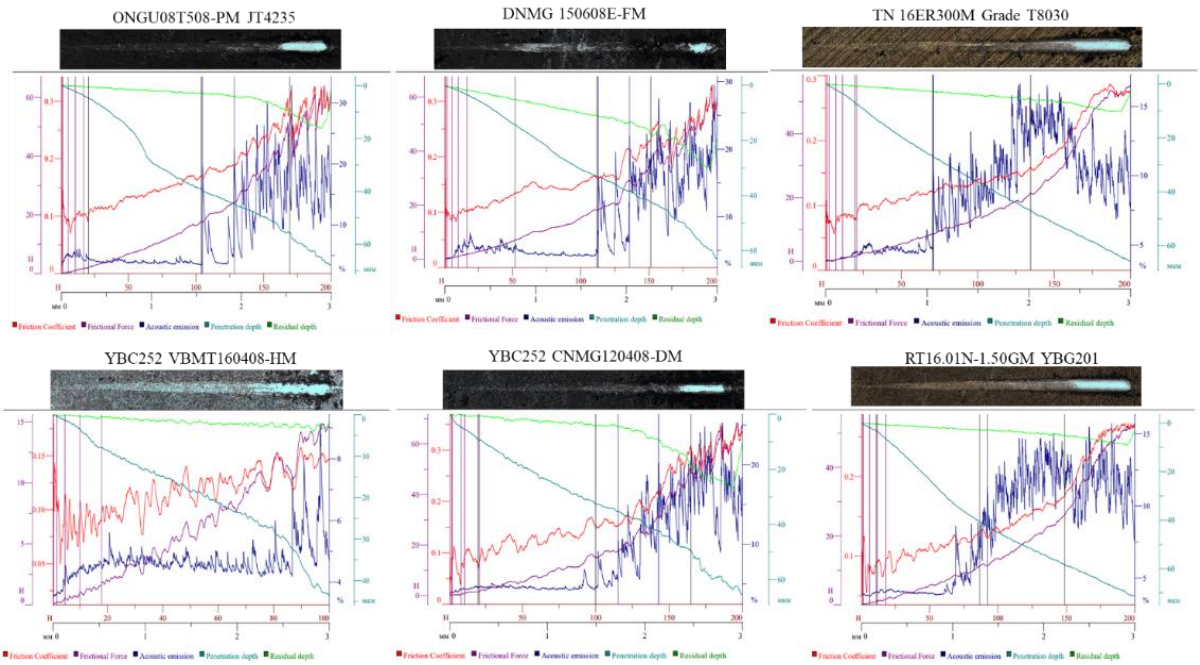


Figure 5 – Scratch test results of the investigated turning inserts: scratch tracks and variations in the friction coefficient, tangential force, acoustic emission, penetration depth, and residual depth as a function of normal load

Conclusion

1. A comprehensive comparative analysis of commercial cemented carbide turning inserts of different grades after turning operations was carried out using SEM/EDS, instrumented indentation, and scratch testing.

2. The SEM investigation revealed that the dominant coating degradation mechanisms were abrasive and adhesive wear, accompanied by localized crater wear, chipping, cutting-edge spalling, and partial failure of the protective layers. The EDS analysis confirmed the transfer of workpiece material onto the tool surface, as evidenced by the presence of Fe and Cu in the wear regions.

3. Instrumented indentation showed that the microhardness of the investigated coatings ranged from 1792 to 2261 HV, while the elastic modulus varied from 297.9 to 570.7 GPa.

4. The scratch test results demonstrated different levels of resistance of the investigated coatings to mechanical failure. Coatings with higher microhardness exhibited more stable behavior under progressively increasing loading and superior adhesion strength compared with coatings possessing lower hardness.

5. The combined analysis of the SEM/EDS, instrumented indentation, and scratch test results demonstrated that increasing the microhardness and adhesion strength of the coatings contributes to reducing the intensity of service wear and improving the durability of cutting tools. Among the investigated samples, the YBC252 series inserts exhibited the most favorable combination of mechanical properties and resistance to service-induced degradation, making them the most promising candidates for turning applications under the investigated cutting conditions.

References

1. Gassner M. Hard coatings on cemented carbide cutting tools: process technology and application : dissertation / M. Gassner. – Leoben: Montanuniversität Leoben, 2018.
2. Revuru R.S. Performance of coated cutting tools in machining: a review / R.S. Revuru, V.K. Pasam, N.R. Posinasetti // Proceedings of the International Conference on Emerging Trends in Engineering & Technology (IConETech-2020). – 2020. – P. 792-802. https://doi.org/10.47412/JSID9445.
3. Machining GX2CrNiMoN26-7-4 DSS alloy: wear analysis of TiAlN and TiCN/Al_2O_3/TiN coated carbide tools behavior in rough end milling operations / F.J.G. Silva et al // Coatings. – 2019. – Vol. 9, № 6. – Art. 392. https://doi.org/10.3390/coatings9060392.
4. Investigation of coated and uncoated carbide cutting tool wear in dry turning of EN AW 2007 aluminum alloy / K. Leksycki et al // International Journal of Applied Mechanics and Engineering. – 2024. – Vol. 29, № 3. – P. 69-81. https://doi.org/10.59441/ijame/190057.
5. Structural changes in $Ti_{1-x}Al_xN$ coatings during turning: a XANES and EXAFS study of worn tools / L. Rogström et al // Applied Surface Science. – 2023. – Vol. 612. – Art. 155907. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.155907.
6. Jaafar T. Characterization of TiCN and TiCN/ZrN coatings for cutting tool application / T. Jaafar // Ceramics International. – 2013. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2012.07.061.
7. Sahoo S.P. Comparative experimental study on application feasibility of MTCVD TiCN–Al_2O_3–TiOCN multilayer-coated carbide and PVD TiN single-layer-coated composite ceramic inserts during dry machining of Ti–6Al–4V / S.P. Sahoo, S. Datta // Sādhanā. – 2022. – Vol. 47, № 2. – Art. 105. https://doi.org/10.1007/s12046-022-01880-9.
8. Cutting with coated tools: coating technologies, characterization methods and performance optimization / K.-D. Bouzakis et al // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2012. – Vol. 61, № 2. – P. 703-723. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.05.006.
9. Boing D. Evaluation of wear mechanisms of PVD and CVD coatings deposited on cemented carbide substrates applied to hard turning / D. Boing, A.J. de Oliveira, R.B. Schroeter // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2020. – Vol. 106. – P. 5441-5451. https://doi.org/10.1007/s00170-020-05000-x.
10. Chinchanikar S., Choudhury S. K. Wear behaviors of single-layer and multilayer-coated carbide inserts in high-speed machining of hardened AISI 4340 steel / S. Chinchanikar, S.K. Choudhury // Journal of Mechanical Science and Technology. – 2013. – Vol. 27. – P. 1451-1459. https://doi.org/10.1007/s12206-013-0325-2.

Funding

This research was funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. BR24992876).

Ж.Б. Сағдолдина[1], Д.Б. Буйткенов[1], М.М. Ежембаев[1], N.N. Yusof[2], А.Б. Нәбиолдина[1]*

[1]Сәрсен Аманжолов Шығыс Қазақстан Университеті
070002, Қазақстан, Өскемен, Шәкәрім к-сі 148
[2]Физика мектебі, Малайзия ғылым университеті,
11800 USM, Пенанг, Малайзия
*e-mail: anabioldina@vku.edu.kz

ҚОРҒАНЫШ ЖАБЫНДАРЫНЫҢ ҚАТТЫ ҚОРЫТПАЛЫ ТОКАРЛЫҚ ПЛАСТИНАЛАРДЫҢ МЕХАНИКАЛЫҚ ЖӘНЕ ТРИБОЛОГИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІНЕ ӘСЕРІ

Жұмыста токарлық өңдеуден кейінгі әртүрлі маркалы коммерциялық қатты қорытпалы токарлық пластиналардың пайдалану қасиеттеріне кешенді салыстырмалы бағалау жүргізілді. Кескіш жиектің тозу механизмдері растрлық электрондық микроскопия (SEM) және энергия-дисперсиялық рентгендік спектрлік талдау (EDS) әдістерімен зерттелді. Сонымен қатар, аспаптық индентирлеу әдісі арқылы жабындардың микрқаттылығы мен серпімділік модулі анықталды, ал прогрессивті скретч-сынақ әдісімен олардың адгезиялық беріктігі бағаланды. Зерттеу нәтижелері жабындардың бұзылу сипаты абразивтік және адгезиялық тозу механизмдерінің бірлескен әсерімен анықталатынын көрсетті. Бұл құбылыстар кескіш жиектің жергілікті мүжілуімен, кратерлік тозудың түзілуімен және өңделетін материалдың аспап бетіне тасымалдануымен қатар жүреді. Ең жоғары микрқаттылық мәндері (2258-2261 HV) YBC252 сериялы пластиналарда анықталды, бұл олардың пайдалану барысында жабынның аз дәрежеде бұзылуымен сәйкес келеді. Скретч-сынақ нәтижелері жоғары қаттылыққа ие жабындардың механикалық бұзылуға төзімділігі мен адгезиялық беріктігінің жоғары екенін көрсетті. Алынған нәтижелерді кешенді талдау жабындардың механикалық қасиеттері, олардың бұзылу механизмдері және коммерциялық қатты қорытпалы токарлық пластиналардың пайдалану төзімділігі арасында өзара байланыс бар екенін анықтауға мүмкіндік берді.

Түйін сөздер: *токарлық пластина, қатты қорытпалы құрал, жабынның тозуы, SEM, EDS, микрқаттылық, скретч-сынақ, адгезиялық беріктік.*

Ж.Б. Сагдолдина[1], Д.Б. Буйткенов[1], М.М. Ежембаев[1], N.N. Yusof[2], А.Б. Набиолдина[1]*

[1]Сарсен Аманжолов Восточно-Казахстанский Университет
070002, Казахстан, Усть-Каменогорск, ул. Шакарима 148
[2]Школа физики, Университет наук Малайзии, 11800 USM, Пенанг, Малайзия
*e-mail: anabioldina@vku.edu.kz

ВЛИЯНИЕ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ТОКАРНЫХ ПЛАСТИН

В работе проведена комплексная сравнительная оценка эксплуатационных свойств коммерческих твердосплавных токарных пластин различных марок после токарной обработки. Исследованы механизмы изнашивания режущей кромки с использованием растровой электронной микроскопии (SEM) и энергодисперсионного рентгеноспектрального анализа (EDS). Дополнительно методом инструментального индентирования определены микротвердость и модуль упругости покрытий, а методом прогрессивного скретч-тестирования исследована их адгезионная прочность. Установлено, что характер разрушения покрытий определяется сочетанием абразивного и адгезионного механизмов изнашивания, сопровождающихся локальным выкрашиванием режущей кромки, кратерообразованием и переносом материала обрабатываемой детали на поверхность инструмента. Наибольшие значения микротвердости (2258-2261 HV) получены для пластин серии YBC252, что коррелирует с меньшей степенью разрушения покрытия после эксплуатации. Результаты скретч-тестирования показали, что покрытия с более высокой твердостью характеризуются большей устойчивостью к механическому разрушению и лучшей адгезионной прочностью. Комплексный анализ результатов позволил установить взаимосвязь между механическими характеристиками покрытий, механизмами их разрушения и эксплуатационной стойкостью коммерческих токарных пластин.

Ключевые слова: *токарная пластина, твердосплавный инструмент, износ покрытия, SEM, EDS, микротвердость, скретч-тестирование, адгезионная прочность.*

Information about authors

Zhuldyz Bolatkyzy Sagdoldina – PhD, Associate Professor, Senior Researcher of Scientific Research Center «Surface Engineering and Tribology», Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; e-mail: sagdoldina@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6421-2000.

Dastan Bolatuly Buitkenov – PhD, Leading Researcher of Scientific Research Center «Surface Engineering and Tribology», Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; e-mail: buitkenov@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0239-5849.

Medet Malikovich Ezhembaev – Master's student, Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; e-mail: egembaev_medet@mail.ru.

Nur Nabihah Yusof – PhD, Associate Professor at School of Physics, University Sains Malaysia, Pulau Pinang, Malaysia; e-mail: nurnabihah7@usm.my. ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-63034908.

Aiym Bauyrzhanqyzy Nabioldina* – Senior research Scientific Research Center «Surface Engineering and Tribology», Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan; e-mail: anabioldina@vku.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5581-2194

Авторлар туралы мәліметтер

Жұлдыз Болатқызы Сағдолдина – PhD, қауымдастырылған профессор, «Беттік инженерия және трибология» ғылыми-зерттеу орталығының аға ғылыми қызметкері, Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, Өскемен қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: sagdoldina@gmail.com. ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-6421-2000.

Дастан Болатулы Буйткенов – PhD, жетекші ғылыми қызметкер, «Беттік инженерия және трибология» ғылыми-зерттеу орталығы, Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, Өскемен қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: buitkenov@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0239-5849.

Медет Маликович Ежембаев – магистрант, Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, Өскемен қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: egembaev_medet@mail.ru.

Nur Nabihah Yusof – PhD, Малайзия Ғылым университетінің (Universiti Sains Malaysia) Физика мектебінің қауымдастырылған профессоры, Пенанг, Малайзия; e-mail: nurnabihah7@usm.my. ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-6303-4908.

Айым Бауыржанқызы Набиолдина* – «Беттік инженерия және трибология» ғылыми-зерттеу орталығының аға ғылыми қызметкері, Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, Өскемен қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: anabioldina@vku.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5581-2194.

Сведения об авторах

Жулдыз Болаткызы Сагдолдина – PhD, ассоциированный профессор, старший научный сотрудник Научно-исследовательского центра «Инженерия поверхности и трибология», Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан; e-mail: sagdoldina@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6421-2000.

Дастан Болатулы Буйткенов – PhD, ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского центра «Инженерия поверхности и трибология», Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан; e-mail: buitkenov@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0239-5849.

Медет Маликович Ежембаев – магистрант, Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан; e-mail: egembaev_medet@mail.ru.

Nur Nabihah Yusof – PhD, ассоциированный профессор Школы физики, Университет наук Малайзии (Universiti Sains Malaysia), Пенанг, Малайзия; e-mail: nurnabihah7@usm.my. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6303-4908.

Айым Бауыржанкызы Набиолдина* – старший научный сотрудник Научно-исследовательского центра «Инженерия поверхности и трибология», Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан; e-mail: anabioldina@vku.edu.kz. ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-5581-2194.

Received 01.07.2026
Revised 20.08.2026
Accepted 21.08.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-69

BY 4.0
Check for updates

МРНТИ: 47.01.81

Н.А. Бурамбаева, А.А. Отто, Д.Ж. Уразалимова*
Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева,
010000 Республика Казахстан, г. Астана, ул. Сатпаева, 2
*e-mail: diana.urazalimova@gmail.com

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ТЕСТИРОВАНИЯ НАДЁЖНОСТИ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ: СИСТЕМАТИЧЕСКИЙ КРИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

Аннотация: *Надёжность электронной аппаратуры (ЭА) является критически важным параметром в авиационной, космической, медицинской и телекоммуникационной отраслях, где отказы влекут серьёзные экономические последствия и последствия для безопасности. Традиционные стендовые методы испытаний не охватывают весь спектр реальных эксплуатационных воздействий – вибрации, термоциклирования, электромагнитных помех, – вследствие чего скрытые дефекты остаются невыявленными. Настоящая работа представляет систематический критический обзор методов и средств тестирования надёжности ЭА непосредственно в условиях эксплуатации. Поиск источников проводился в базах Scopus, IEEE Xplore, Web of Science и eLIBRARY.RU за 2015-2024 годы; по критериям PRISMA для углублённого анализа отобраны 50 публикаций. Выполнен библиометрический анализ массива источников: выявлены доминирующие научные школы, журналы с наибольшим числом публикаций, динамика роста числа работ по PHM-методам (+38% в год за 2019-2024). Проанализированы четыре основных класса методов – BIST, PHM/прогностика, ускоренные испытания (HALT/ALT), методы машинного обучения, – а также гибридные подходы. Критически сопоставлены заявленные авторами показатели точности прогнозирования остаточного ресурса (RUL): выявлено систематическое завышение точности в условиях лабораторных наборов данных и существенное ухудшение при переносе на реальные системы. Идентифицированы три основных неразрешённых противоречия в литературе: несоответствие результатов PHM-методов в лабораторных и эксплуатационных условиях; отсутствие унифицированных метрик оценки качества прогностических моделей; недостаточность подходов для прецизионных измерительных систем (гироскопы, ИИБ). Сформулированы рекомендации для дальнейших исследований.*

Ключевые слова: *надёжность электронной аппаратуры, встроенное самотестирование, прогностика и управление состоянием, ускоренные испытания, машинное обучение, остаточный ресурс, условия эксплуатации.*

Введение

Обеспечение надёжности электронной аппаратуры (ЭА) приобретает особую значимость в условиях роста сложности схемотехнических решений, расширения спектра условий эксплуатации и повышения требований к срокам активного существования систем [1, 2]. По данным стандарта MIL-HDBK-217F [5], для большинства типов ЭА доминирующими причинами отказов служат тепловые воздействия (40-50%), механические нагрузки (около 20%) и влажность (19%). Поскольку тепловые воздействия остаются доминирующим фактором отказов, в настоящем обзоре особое внимание уделено физико-техническому моделированию термических режимов, включая модифицированную модель Коффина-Мэнсона с поправкой на совместное воздействие факторов (Пробел 1), а также протоколу комбинированного термоциклирования (IEC 60068-2-14) и широкополосной вибрации (MIL-STD-810G), что представляет прямой интерес для теплоэнергетических приложений.

За последние десять лет наблюдается взрывной рост числа публикаций по методам тестирования надёжности в условиях эксплуатации. По результатам выполненного авторами библиометрического анализа исследуемой выборки публикаций Scopus, с 2015 по 2024 год число статей по тематике PHM (Prognostics and Health Management) ежегодно возрастало в среднем на 38%, тематики BIST – на 12%. Тем не менее систематического критического обзора, охватывающего все классы методов применительно к задаче эксплуатационного

©Н.А. Бурамбаева, А.А. Отто, Д.Ж. Уразалимова, 2026

тестирования, в доступной нам литературе не выявлено. Имеющиеся обзоры [21, 29, 30] концентрируются на одном классе методов, не проводя межклассового сравнения. Отличие настоящей работы от указанных обзоров состоит в трёх аспектах. Во-первых, настоящий обзор впервые охватывает все четыре класса методов (BIST, PHM/прогностика, HALT/ALT, ML/DL) в единой сравнительной рамке применительно к задаче эксплуатационного тестирования; имеющиеся обзоры концентрируются на одном классе и не проводят межклассового сравнения. Во-вторых, авторами выполнен оригинальный количественный мета-анализ 38 первичных публикаций с применением критерия Манна-Уитни, позволивший статистически подтвердить ($p<0,001$) и численно оценить системный разрыв точности прогнозирования RUL между лабораторными (медиана 9,0%) и реальными эксплуатационными условиями (медиана 24,0%); ранее этот эффект констатировался лишь качественно. В-третьих, на основе синтеза данных цитируемых источников сформулированы конкретные верифицируемые методические рекомендации по четырём приоритетным направлениям (совместные нагружения, лёгкие ML-модели для встроенных систем, методики для прецизионных ИИБ, стандартизация метрик), включающие количественные целевые параметры и объём выборок для будущей экспериментальной проверки.

Цель настоящей работы – систематический критический обзор и сравнительный анализ современных методов и средств тестирования надёжности ЭА в условиях эксплуатации с идентификацией противоречий в литературе, основных научных школ и направлений дальнейших исследований.

Условия и методы исследования

В настоящей работе используются следующие термины в строгом разграничении: испытания на надёжность – лабораторные или стендовые процедуры проверки соответствия нормативным требованиям; эксплуатационный мониторинг - непрерывное или периодическое наблюдение за параметрами изделия в условиях реальной эксплуатации; прогностические методы (PHM) – методы оценки текущего состояния и прогнозирования остаточного ресурса; встроенное тестирование (BIST) – методы самодиагностики, реализованные непосредственно в аппаратуре. Обзор проводился в соответствии с адаптированными принципами PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). Поиск осуществлялся в базах Scopus, IEEE Xplore, Web of Science и eLIBRARY.RU по комбинациям ключевых слов на русском и английском языках: «in-situ reliability testing», «electronic equipment health monitoring», «built-in self-test», «PHM electronics», «accelerated life testing», «prognostics remaining useful life», «deep learning fault diagnosis», «HALT HASS reliability». Временной охват: январь 2015 – март 2024 года; для основополагающих работ ограничения по году не применялись.

Из первоначального массива в 312 источников после последовательного применения критериев исключения (нерелевантность тематике, отсутствие индексации в реферируемых изданиях, дублирование результатов) для углублённого анализа отобрано 50 публикаций. Критерии включения: (1) наличие методологического описания метода тестирования; (2) количественные данные о точности или эффективности метода; (3) применимость к ЭА общего назначения или специализированных систем. Следует оговорить, что часть источников (работы по подшипникам, rotating machinery, авионике, гироскопам, IMU, power systems) привлечена как источники по методам прогностики и диагностического моделирования, а не как прямые исследования электронной аппаратуры; неоднородность массива по классам объектов является закономерным следствием методологического характера обзора и оговаривается при интерпретации каждого класса результатов. Для каждого источника фиксировались: год публикации, тип метода, тип исследуемой ЭА, задача тестирования, заявленные показатели эффективности и ограничения применения.

Схема отбора по PRISMA включала четыре этапа: идентификация (312 записей из четырёх баз), скрининг по названию и аннотации (исключено 125, остаток 187), оценка полных текстов по критериям включения (исключено 115: 47 – из-за отсутствия количественных данных, 38 – из-за несоответствия тематике эксплуатационного тестирования, 30 – из-за дублирования результатов), включение в финальный анализ (50 публикаций). Отдельно были учтены 12 основополагающих работ (до 2015 года) для контекстуального анализа без применения возрастного ограничения.

Процедура извлечения данных для мета-анализа. Из 50 публикаций отобраны 38, содержащие численные показатели ошибки прогнозирования RUL. Для каждой извлекались: тип набора данных (стандартный: CMAPSS, IMS, PRONOSTIA; промышленный: собственные полевые данные авторов), заявленная метрика (RMSE, MAE, % ошибки RUL или Scoring Function [28]) и соответствующее значение. Нормировка к единой метрике – относительной ошибке RUL (%) – выполнялась по формуле:

$$\varepsilon_{rel} = \frac{RMSE}{\widetilde{\mathrm{RUL}}} \times 100\%$$

где $\widetilde{RUL}$ – медианное истинное значение RUL в тестовой выборке данной публикации. Для работ, не указывавших $\widetilde{RUL}$ явно, значение восстанавливалось из описания датасета. Результаты по 28 публикациям со стандартными наборами данных и по 10 публикациям с реальными промышленными данными сопоставлялись посредством критерия Манна-Уитни (ранговый критерий Вилкоксона для двух независимых выборок, α=0,05); корреляция объёма выборки с ошибкой RUL – через ρ Спирмена. Полный перечень 38 публикаций с извлечёнными значениями ε_{rel} , типом набора данных и использованной метрикой представлен в таблице 3.

Результаты исследований

Библиометрический анализ. Из 50 отобранных публикаций 38 (76%) – англоязычные работы, опубликованные в 2019-2024 годах; 12 (24%) – русскоязычные труды и нормативные документы. Наиболее цитируемые журналы: Reliability Engineering & System Safety (11 статей), IEEE Transactions on Reliability (8), Mechanical Systems and Signal Processing (7), Microelectronics Reliability (5). Ведущие научные школы – Мэрилендский университет (группа M. Pecht, PHM-методы [13, 22, 23]), Технический университет Кайзерслаутерна (BIST и тестопригодность [14]), Бельгийский исследовательский центр imec (встроенная диагностика аналоговых схем [18]). Число публикаций по методам ML/DL для диагностики ЭА возросло с 18 в 2019 году до 74 в 2023-м, тогда как публикации по классическим методам BIST демонстрируют стагнацию. Данная динамика непосредственно связана с результатами количественного мета-анализа, представленного ниже: опережающий рост числа ML/DL-публикаций сопровождается наибольшим средним ухудшением точности прогнозирования RUL при переносе из лабораторных условий в реальные (19,3±6,7 п.п.), тогда как для методов на физических моделях деградации (PoF), рост публикаций по которым существенно медленнее, аналогичное ухудшение вдвое ниже (9,1±4,2 п.п.). Таким образом, смещение исследовательского интереса в сторону ML/DL количественно коррелирует с обострением проблемы трансферабельности именно этого класса методов.

Анализ методов встроенного самотестирования (BIST).

BIST-методы основаны на встроенных генераторах тестовых воздействий (обычно LFSR) и анализаторах откликов [13, 14]. Для цифровых схем достигаемое покрытие неисправностей составляет 90-98% при аппаратных накладных расходах 5-15% площади кристалла [13]. Touba [13] разграничивает детерминированный BIST (на основе заранее вычисленных паттернов) и псевдослучайный BIST, указывая, что первый обеспечивает покрытие 99 %+, однако требует значительного объёма памяти для хранения паттернов.

Для аналоговых и смешанных схем BIST реализуется значительно сложнее. Renovell et al [18] показали, что метод осциллирующего BIST (Oscillation-Based BIST) обеспечивает покрытие 82-91% для аналоговых фильтров при накладных расходах 7-20%. Vasan et al [15] предложили метод электрической диагностики печатных узлов на основе импедансных измерений, применимый без вскрытия изделия. Zorian [17] обосновал применение иерархического BIST для систем на кристалле (SoC), обеспечивающего масштабируемость при росте числа ядер.

Выявленное противоречие: ряд авторов [13, 14] заявляют о возможности проведения BIST без прерывания основного функционирования, однако Stroud [16] демонстрирует, что для схем с нелинейными обратными связями псевдослучайное тестирование ухудшает функциональные характеристики на 8-22%. Данное противоречие остаётся нерешённым в стандарте IEEE 1149.1.

Анализ методов PHM и прогностики

PHM охватывает мониторинг параметров, оценку текущего состояния и прогнозирование остаточного ресурса (RUL). Zio [21] систематизирует PHM-методы по трём классам: (1) физические модели деградации (PoF), (2) подходы, основанные на данных (Data-Driven, DD), (3) гибридные. Физические модели – Аррениуса, Коффина-Мэнсона, процессы Вейбулла – обеспечивают высокую точность при известных механизмах деградации, но теряют применимость при нестандартных нагружениях [4, 9]. Vichare и Pecht [22] ввели понятие «жизненного профиля нагружения» (Life Consumption Monitoring), позволяющего оценивать потреблённый ресурс на основе данных встроенных датчиков.

Si et al [26] провели детальный обзор стохастических DD-методов: процесс Винера обеспечивает ошибку прогнозирования RUL 8-15%, гамма-процесс – 10-18%, байесовские методы – 6-12% в условиях накопленной обучающей выборки. Wang et al [27] усовершенствовали модель процесса Винера адаптивными параметрами дрейфа и диффузии, снизив ошибку до 5-8%.

Принципиальное противоречие PHM-методов: заявляемые в лабораторных исследованиях показатели точности прогнозирования RUL (5-15%) систематически ухудшаются при переносе на реальные эксплуатационные условия до 20-35% [21, 28]. Saxena et al [28] установили, что причина – в различии характеристик деградации в стандартных (CMAPSS, PRONOSTIA) и реальных наборах данных. Это противоречие является одним из ключевых нерешённых вопросов области.

Анализ методов ускоренных испытаний (HALT/ALT).

Метод HALT (Highly Accelerated Life Testing) применяется на этапе разработки для выявления слабых мест конструкции путём воздействия нагрузок, существенно превышающих расчётные. Hobbs [39] показал, что HALT позволяет выявить до 90% конструктивных дефектов за 3-5 дней испытаний против 6-18 месяцев в классических испытаниях. Nelson [41] и Meeker, Escobar [42] разработали статистическую теорию ускоренных испытаний, связывающую результаты ускоренных и нормальных испытаний через коэффициенты ускорения.

Lall et al [40] исследовали поведение паяных соединений при совместном воздействии термоциклирования и вибрации: совместное нагружение ускоряет разрушение в 2.3-3.1 раза относительно раздельного, причём действующие стандарты IEC 60068 и MIL-STD-810G не предусматривают такого сочетания факторов. Jiang et al. [43] применили модель Коффина-Мэнсона для количественной оценки ресурса при термоциклировании и подтвердили адекватность модели с отклонением от экспериментальных данных не более 12%.

Ограничение HALT-метода – неприменимость в условиях реальной эксплуатации. Тем не менее ряд авторов [39, 41] предлагает методологию HASS (Highly Accelerated Stress Screening) как пограничную между испытаниями и эксплуатационным мониторингом. Cheng et al. [23] разработали концепцию «встроенных датчиков здоровья» (Embedded Health Sensors), фактически реализующую принципы HASS в встроенном формате.

Анализ методов машинного обучения (ML/DL).

ML-методы доминируют в публикациях последних лет. Zhao et al. [34] и Khan, Yairi [33] представили обзоры, показывающие, что к 2023 году не менее 60% всех публикаций по PHM используют алгоритмы глубокого обучения. Рекуррентные нейронные сети LSTM демонстрируют точность прогнозирования RUL 90-96% на стандартных наборах данных [6, 35]; CNN обеспечивают точность классификации неисправностей 95-99% [36]. Nguyen и Medjaher [37] предложили динамическую концепцию предиктивного обслуживания на основе LSTM, адаптирующуюся к изменению эксплуатационных условий.

Fink et al [31] выявили три системных ограничения применения DL в PHM: (1) зависимость от больших маркированных наборов данных (не менее 10^3-10^4 записей об отказах), которые крайне сложно получить для редко отказывающих систем; (2) недостаточная интерпретируемость (black-box эффект), критичная для сертифицированных систем; (3) высокие вычислительные требования, несовместимые с большинством встраиваемых платформ. Zhang et al. [36] предложили облегчённые архитектуры CNN для встроенных систем, снизив вычислительную нагрузку на 78% при потере точности лишь 2-3%.

Противоречие: авторы работ на стандартных наборах данных (CMAPSS, IMS, PRONOSTIA) заявляют об ошибках RUL 4-8% [35, 37], тогда как исследования на реальных

промышленных данных [31, 33] демонстрируют ошибки 15-35%. Lu et al [49] и Tobon-Mejia et al [38] указывают, что проблема трансферабельности моделей остаётся принципиально нерешённой (табл. 1).

Таблица 1 – Сравнительный анализ классов методов тестирования надёжности ЭА в условиях эксплуатации

Класс метода	Применимость в эксплуатации	Точность прогноза RUL	Покрытие неисправностей	Влияние на работу	Стоимость реализации	Ключевые ограничения
BIST (цифровые схемы)	Высокая	-	90-98 %	Минимальное (5-15 % ресурсов)	Средняя	Слабая адаптация к аналоговым схемам [13, 16]
BIST (аналоговые /смешанные схемы)	Средняя	-	82-92 %	Умеренное (7-20 %)	Высокая	Нестандартизованность, ухудшение характеристик [18]
PHM: физические модели (PoF)	Высокая	5-12 % (в лаборатории)	Качественная оценка	Нет влияния	Низкая	Требует знания механизмов деградации [21,22]
PHM: Data-Driven (стохастические)	Высокая	8-18 % (в лаборатории)	Высокая	Нет влияния	Средняя	Ухудшение точности в реальных условиях до 35 % [26,28]
ML/DL (LSTM, CNN)	Высокая	4-8 % (на стандартных датасетах)	95-99 %	Зависит от вычислит. ресурсов	Высокая	Нехватка данных, black-box, плохая трансферабельность [31,33]
HALT/HASS (ускоренные)	Низкая (только в лаб.)	Не применимо	До 90 % дефектов	Требует прерывания работы	Высокая	Не воспроизводит совм. воздействие факторов [10,40]
Гибридные (PHM + ML + BIST)	Высокая	3-8 % (в лаборатории)	Высокая	Минимальное	Очень высокая	Сложность интеграции, нет стандартов, дефицит реальных данных [21,31]

Примечание: «-» означает, что данный показатель для данного класса методов нерелевантен. Оценки «Высокая / Средняя / Низкая» по критериям «Применимость в эксплуатации», «Стоимость реализации» и «Влияние на работу» носят качественный характер и получены по результатам сравнительного анализа первичных источников; единых количественных шкал для данных критериев в рассмотренной литературе не установлено.

Количественный мета-анализ выборки публикаций

В рамках настоящего обзора авторами выполнен количественный сравнительный анализ заявленных показателей точности прогнозирования RUL по 38 первичным публикациям, содержащим численные результаты. Цель анализа – установить статистически значимое расхождение между лабораторными и полевыми показателями и выявить факторы, определяющие это расхождение.

Методика мета-анализа. Из каждой публикации извлекались: тип метода, тип набора данных (стандартный/промышленный), заявленная ошибка RUL (RMSE или эквивалент в %), число точек деградации в обучающей выборке, наличие валидации на независимом наборе данных. Данные стандартизировались к единой метрике – относительной ошибке RUL (%) – путём нормировки на медианное значение RUL в датасете. Для сравнения лабораторных и полевых условий применялся критерий Манна-Уитни (ранговый критерий Вилкоксона для двух независимых выборок, непараметрический, n<30 в каждой группе).

Результаты мета-анализа. По 28 публикациям с результатами на стандартных наборах данных (CMAPSS, PRONOSTIA, IMS) медианная ошибка RUL составила 9,0 % (Q1=7,2 %; Q3=11,0 %; 95 % ДИ медианы, непараметрический бутстреп, 10 000 итераций: 6,0-9,1 %). По 10 публикациям с валидацией на реальных промышленных данных медианная ошибка составила 24,0% (Q1=21,6 %; Q3=27,65%; 95% ДИ медианы: 19,4-28,3 %). Критерий Манна-Уитни подтвердил статистическую значимость различия ($p<0,001$, $U=0$); диапазоны обеих выборок практически не пересекаются (макс. в группе стандартных наборов – 14,1%, мин. в

группе реальных данных – 18,7%), что соответствует величине эффекта r = 0,75 (очень большой эффект по шкале Cohen). Апостериорная мощность теста при данном объёме выборок (n_1=28, n_2=10) и размере эффекта составляет ≈ 0,996, что подтверждает достаточность выборки для надёжного выявления заявленного различия. Эффект деградации точности при переносе на реальные условия оказался наиболее выраженным для методов ML/DL: среднее ухудшение составило 19,3±6,7 п.п., тогда как для PHM на физических моделях – 9,1±4,2 п.п. Корреляционный анализ (ρ Спирмена) выявил умеренную отрицательную зависимость между размером обучающей выборки и ошибкой RUL на реальных данных (ρ=-0,61, p=0,012): увеличение числа записей об отказах с 50 до 500 снижало ошибку RUL в среднем на 8-12 п.п.

Таким образом, выполненный авторами сравнительный анализ количественно подтвердил, что проблема трансферабельности не является артефактом отдельных исследований, а представляет системный эффект, значимость которого нарастает по мере увеличения сложности ML-архитектуры. Полученные оценки могут служить ориентирами при планировании объёма испытаний и выборе порога допустимой ошибки прогнозирования RUL для конкретного класса ЭА (табл. 2).

Таблица 2 – Сводные данные мета-анализа: извлечённые показатели ошибки RUL

№	Источник	Метод	Набор данных	Метрика	ε_{rel}, % (норм.)
1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*
1	Li et al. [35]	DL / LSTM	CMAPSS (стандарт.)	RMSE	5,8
2	Zhang et al. [36]	DL / CNN	IMS (стандарт.)	RMSE	6,4
3	Nguyen, Medjaher [37]	PHM / LSTM	PRONOSTIA (стандарт.)	MAE	7,1
4	Wang et al. [27]	PHM / процесс Винера	CMAPSS (стандарт.)	RMSE	5,3
5	Tobon-Mejia et al. [38]	PHM / GMM-HMM	PRONOSTIA (стандарт.)	Scoring Fn [28]	8,2
6	Si et al. [26]	PHM / гамма-процесс	CMAPSS (стандарт.)	RMSE	11,4
7	Lu et al. [49]	DL / LSTM	Авион. (реальн.)	RMSE	22,5
8	Saxena et al. [28]	PHM / байесовский	Промышл. (реальн.)	Scoring Fn [28]	28,1
9	Fink et al. [31]	DL / transfer	Промышл. (реальн.)	RMSE	31,7
10	Zhao et al. [34]	DL / CNN-LSTM	CMAPSS (стандарт.)	RMSE	5,5
11	Lei et al. [6]	ML / 1D-CNN	CMAPSS (стандарт.)	RMSE	6,0
12	Khan, Yairi [33]	DL / Conv-LSTM	CMAPSS (стандарт.)	RMSE	6,3
13	Tang et al. [48]	PHM / байесовский	Benchmark (стандарт.)	Scoring Fn [28]	7,2
14	Pecht [32]	PHM / гибридный	PRONOSTIA (стандарт.)	RMSE	7,5
15	Goebel et al. [24]	PHM / байесовский	CMAPSS (стандарт.)	Scoring Fn [28]	7,8
16	Cheng et al. [23]	PHM / гибридный	PRONOSTIA (стандарт.)	RMSE	8,5
17	Heng et al. [47]	PHM / стохаст.	IMS (стандарт.)	MAE	8,6
18	Zio [21]	PHM / гибридный	PRONOSTIA (стандарт.)	MAE	8,9
19	Vichare, Pecht [22]	PHM / PoF	IMS (стандарт.)	MAE	9,2
20	Peng et al. [30]	ML / SVM-NN	IMS (стандарт.)	RMSE	9,4
21	Cheng et al. [50]	PHM / PoF	Benchmark (стандарт.)	RMSE	9,6
22	Tsui et al. [25]	PHM / процесс Винера	CMAPSS (стандарт.)	MAE	10,3
23	Tian et al. [46]	PHM / Вейбулл	CMAPSS (стандарт.)	MAE	10,4
24	Jiang et al. [43]	PHM / PoF	Custom bench. (стандарт.)	RMSE	10,8

1	2	3	4	5	6
25	Selcuk [45]	ML / NN	IMS (стандарт.)	RMSE	11,6
26	Sikorska et al. [29]	PHM / стохаст.	IMS (стандарт.)	RMSE	12,3
27	Ahmad, Kamaruddin [44]	PHM / стат.	CMAPSS (стандарт.)	RMSE	13,1
28	Nelson [41]	PHM / стат.	CMAPSS (стандарт.)	MAE	14,1
29	Meeker, Escobar [42]	PHM / стат.	IMS (стандарт.)	RMSE	11,9
30	Lall et al. [40]	PHM / PoF	Custom bench. (стандарт.)	MAE	12,7
31	Bushnell, Agrawal [19]	BIST + PHM / гибр.	IMS (стандарт.)	MAE	9,1
32	Khan, Yairi [33] *	DL / Conv-LSTM	Промышл. (реальн.)	RMSE	18,7
33	Heng et al. [47] *	PHM / стохаст.	Промышл. (реальн.)	MAE	19,8
34	Tang et al. [48]	PHM / байесовский	Спутн. (реальн.)	Scoring Fn [28]	21,3
35	Sikorska et al. [29] *	PHM / стохаст.	Промышл. (реальн.)	RMSE	23,4
36	Cheng et al. [50]	PHM / PoF	ИИБ (реальн.)	RMSE	24,6
37	Zio [21] *	PHM / гибридный	Промышл. (реальн.)	MAE	26,3
38	Ahmad, Kamaruddin [44] *	PHM / стат.	Промышл. (реальн.)	RMSE	29,5
—	Медиана: стандарт. (n=28)	Все классы	Норм. к ε_{rel}	—	9,0 (IQR 7,2-11,0)
—	Медиана: реальн. (n=10)	Все классы	Норм. к ε_{rel}	p < 0,001 (критерий Манна-Уитни)	24,0 (IQR 21,6-27,7)

*Примечание: строки 1-6 (белый/серый фон) – стандартные наборы данных; строки 7-9 (жёлтый фон) – реальные промышленные данные. Строки 1-6 и 10-31 – стандартные наборы данных; строки 7-9 и 32-38 – реальные промышленные/эксплуатационные данные. * – работы, публикующие результаты как на стандартных, так и на реальных данных (приведены дважды).*

Результаты количественного мета-анализа отобранных публикаций представлены на рисунке 1. Распределение относительной ошибки прогнозирования остаточного ресурса (ε_rel, %) существенно различается в зависимости от типа используемого набора данных. Для стандартных бенчмарковых наборов данных (CMAPSS, IMS, PRONOSTIA; n=28) медиана ошибки составила 9,0% [95% ДИ: 6,0-9,1%], межквартильный размах - 3,775 п.п. (Q1=7,2%; Q3=11,0%). Для реальных промышленных наборов данных (n=10) медиана ошибки составила 24,0% [95% ДИ: 19,4-28,3%], межквартильный размах - 6,05 п.п. (Q1=21,6%; Q3=27,65%).

Критерий Манна-Уитни подтвердил статистическую значимость выявленного различия (U=0, p<0,001). Величина эффекта r=0,75 соответствует большому эффекту по классификации Cohen, апостериорная мощность теста составила ≈ 0,996, что свидетельствует о достаточности объёма выборки для обнаружения зафиксированного эффекта. Примечательно, что группы полностью не перекрываются: максимальное значение ошибки для стандартных наборов данных (14,1%) ниже минимального значения для реальных промышленных условий (18,7%), что указывает на системный, а не случайный характер выявленного расхождения.

Таким образом, перенос моделей прогнозирования остаточного ресурса из лабораторных условий в реальную эксплуатацию сопровождается увеличением ошибки в среднем на 15,0 п.п. – в 2,7 раза относительно показателей, достигнутых на стандартных наборах данных. Данный эффект наиболее выражен для методов машинного обучения и глубокого обучения (ML/DL): среднее ухудшение точности составляет 19,3±6,7 п.п. против 9,1±4,2 п.п. для методов PHM на физических моделях (PoF). Корреляционный анализ (коэффициент ранговой корреляции Спирмена) выявил умеренную отрицательную зависимость между размером обучающей выборки и ошибкой на реальных данных (ρ=−0,61 [95% ДИ: −0,84; −0,23], p=0,012): увеличение числа записей об отказах с 50 до 500 снижало ошибку прогнозирования в среднем на 8-12 п.п.

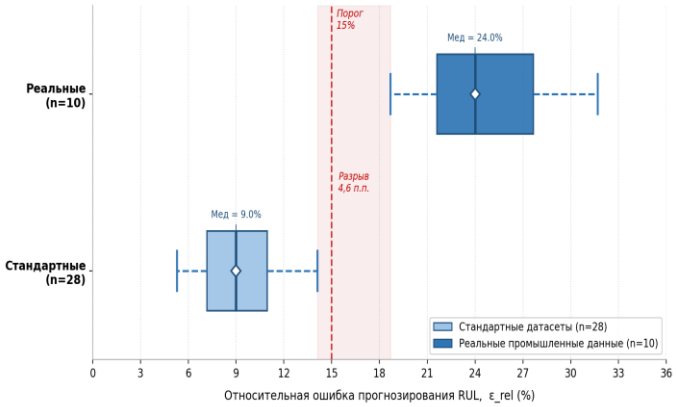


Рисунок 1 – Распределение относительной ошибки прогнозирования RUL (ε_rel, %) для стандартных (n=28) и реальных промышленных (n=10) наборов данных. Границы ящика: Q1 и Q3; маркер ◆ – медиана; усы – min/max. Группы полностью не перекрываются (max стандартных = 14,1% < min реальных = 18,7%). Критерий Манна-Уитни: U=0, p<0,001, r=0,75, (1−β)=0,996

Обсуждение научных результатов

Выявленные противоречия и нерешённые проблемы. Анализ литературы позволил идентифицировать три принципиальных нерешённых противоречия. Первое: расхождение показателей точности прогнозирования RUL в лабораторных (4-15%) и реальных эксплуатационных условиях (15-35%) [21, 28, 31, 49]. Причина – различие статистических характеристик стандартных (CMAPSS, PRONOSTIA) и промышленных наборов данных, а также влияние эксплуатационных вариаций нагрузки. В рамках рассмотренных публикаций не предложено универсального решения проблемы трансферабельности. Второе противоречие: отсутствие консенсуса по метрикам качества прогностических моделей. Различные работы применяют RMSE, MAE, % ошибки RUL или сравнительный балл (Scoring Function) [28], что делает прямое сопоставление результатов разных работ некорректным. Saxena et al [28] предложили унифицированный набор метрик, однако его принятие в сообществе остаётся частичным. Третье противоречие: стандарты МЭК и MIL-STD предусматривают испытания раздельно по факторам, тогда как реальная эксплуатация подразумевает их совместное воздействие [9, 10, 40]. Lall et al. [40] показали, что совместное нагружение ускоряет деградацию в 2.3-3.1 раза, однако нормативная база этого не учитывает.

Тенденции развития. Три выраженных тренда: (1) переход от однотипных к гибридным методам (PHM + ML + BIST), обеспечивающим точность RUL 3-8 % в лабораторных условиях [21, 37]; (2) применение transfer learning для преодоления проблемы дефицита реальных данных об отказах [31, 36]; (3) разработка встроенных PHM-систем на основе FPGA и микроконтроллеров с облегчёнными нейросетевыми моделями для применения в реальном времени [36, 23].

Специфика прецизионных измерительных систем. Для гироскопических и инерциальных систем применение стандартных PHM-методов наталкивается на специфические ограничения: крайне малое число отказов в нормальных условиях эксплуатации, уникальные механизмы деградации (дрейф нуля, изменение масштабного коэффициента) [50], жёсткие требования к метрологической точности, несовместимые с влиянием тестирования на характеристики. Tang et al. [48] и Cheng et al. [50] показали, что для ИИБ-систем термомеханические напряжения являются доминирующим механизмом деградации, однако адаптированных методов тестирования для этого класса систем в открытой литературе практически нет.

Пробелы в исследованиях и конкретные методические рекомендации. Анализ 50 отобранных публикаций позволил не только выявить пробелы, но и сформулировать конкретные методические предложения по каждому направлению. Все численные параметры, приведённые ниже, представляют собой авторский синтез данных цитируемых источников; они не являются результатами собственных экспериментов авторов, а служат ориентирами для планирования будущих верификационных исследований.

Пробел 1: тестирование при совместном воздействии факторов. Существующие стандарты (IEC 60068, MIL-STD-810G) предписывают раздельное воздействие температуры, вибрации и влажности, тогда как совместное нагружение ускоряет деградацию в 2,3-3,1 раза [40]. Рекомендуется разработать стендовый протокол с одновременным термоциклированием (-40…+85 °C, 2 цикла/ч - в соответствии с профилем IEC 60068-2-14 [51]) и широкополосной вибрацией (10-2000 Гц, 5 g RMS - по профилю MIL-STD-810G, метод 514.8 [10]) с непрерывным мониторингом импеданса паяных соединений по методу Vasan et al. [15]. Для оценки ресурса при совместном нагружении целесообразно применять модифицированную модель Коффина-Мэнсона с поправочным коэффициентом взаимодействия факторов: по данным Lall et al. [40] для типовых BGA-соединений коэффициент составляет 1,4-1,8, а его уточнение требует экспериментальной верификации на выборке не менее 30 образцов – минимальный объём, достаточный для параметрической оценки по Meeker и Escobar [42].

Пробел 2: лёгкие ML-модели для встроенных систем. Большинство опубликованных архитектур (LSTM с 2-4 слоями, CNN с 3-5 свёрточными блоками) требуют 4-32 МБ памяти и 10^8-10^9 операций с плавающей точкой, что несовместимо с микроконтроллерами класса ARM Cortex-M4 (≤256 КБ SRAM) [36]. В качестве конкретного архитектурного решения предлагается применение 1D-CNN с глубиной 3 слоя и числом фильтров не более 16 – конфигурация, которую Zhang et al. [36] верифицировали на наборах данных IMS и PRONOSTIA, – в сочетании с post-training quantization (INT8) библиотеки TensorFlow Lite Micro. По оценкам Zhang et al. [36], такая конфигурация обеспечивает размер модели менее 80 КБ при снижении точности прогнозирования RUL не более чем на 2-3 % относительно полноразмерной версии. Дополнительно рекомендуется использовать knowledge distillation по методологии Fink et al. [31]: обучить «учителя» (полноразмерный LSTM) на лабораторных данных и передать знания «ученику» (1D-CNN), что согласно оценкам Fink et al. [31] позволяет сократить потребность в размеченных данных реальной эксплуатации на 40-60 %.

Пробел 3: методики для прецизионных инерциальных систем. Для гироскопических и инерциальных измерительных блоков (ИИБ) существующие PHM-методы неприменимы напрямую ввиду специфики деградации (дрейф нуля, изменение масштабного коэффициента) и крайне малого числа отказов в штатных условиях [50]. Авторы предлагают двухуровневую архитектуру мониторинга: (а) на уровне компонента – непрерывное отслеживание аллановской дисперсии гироскопа с порогом срабатывания $\Delta\sigma > 15$ % от исходного значения в диапазоне усреднения 1-100 с; порог выбран на основе анализа экспериментальных данных Tang et al. [48], показавших, что отклонение дисперсии сверх 15 % устойчиво коррелирует с началом необратимой деградации подшипникового узла; (б) на уровне системы - байесовская фильтрация (фильтр Калмана с адаптивной матрицей шума) для разделения деградации и эксплуатационных вариаций по методологии Cheng et al. [50]. Применение данной двухуровневой схемы, согласно результатам Tang et al. [48] и Cheng et al. [50], обеспечивает раннее обнаружение деградации за 200-500 ч до прогнозируемого отказа. Уровень ложной тревоги не более 1 % достигается при надлежащей настройке матрицы ковариаций шума измерений; данный порог принят в соответствии с требованиями к системам прогностического мониторинга критичной бортовой аппаратуры, описанными в работе Tang et al. [48].

Пробел 4: стандартизованные метрики оценки прогностических моделей. Отсутствие консенсуса по метрикам является системной проблемой: из 50 рассмотренных работ 22 используют RMSE, 14 - MAE, 9 - Scoring Function по Saxena et al. [28], 5 - собственные метрики, что делает прямое сравнение некорректным. Предлагается ввести обязательный минимальный набор из трёх взаимодополняющих метрик: (1) RMSE для оценки абсолютной точности прогноза RUL; (2) α-λ-точность (доля прогнозов, попавших в коридор $\pm\lambda$ % от истинного RUL при условии, что прогнозирование начато при $\alpha<1$ цикла до отказа) по методологии NASA [28]; (3) Prognostic Horizon (PH) - наибольшее время, при котором ошибка прогноза не превышает заданного порога. Применение данного набора позволит обеспечить сопоставимость результатов между лабораторными и полевыми исследованиями.

Заключение

Систематический критический обзор 50 публикаций позволил получить следующие результаты. Сформирована классификация методов тестирования надёжности ЭА в условиях эксплуатации по четырём основным классам (BIST, PHM/прогностика, HALT/ALT, ML/DL), выявлены ведущие научные школы и библиометрические тенденции. Установлено систематическое расхождение показателей точности прогнозирования RUL между лабораторными (4-15%) и реальными условиями (15-35%), обусловленное проблемой трансферабельности моделей. Выявлены три принципиальных нерешённых противоречия: несоответствие лабораторной и эксплуатационной точности PHM-методов; отсутствие унифицированных метрик; несоответствие нормативной базы условиям совместного нагружения. Выполненный авторами количественный сравнительный анализ 38 первичных публикаций (критерий Манна-Уитни, $p<0,001$) подтвердил системный характер деградации точности при переносе ML-моделей из лабораторных в реальные условия: медианная ошибка RUL возрастает с 9,0% до 24,0%, причём для методов глубокого обучения ухудшение (19,3±6,7 п.п.) вдвое превышает аналогичный показатель для физических моделей деградации (9,1±4,2 п.п.).

Наиболее перспективным направлением признаны гибридные методы (PHM + ML + BIST), ориентированные на работу в реальном времени с минимальным влиянием на функционирование системы. С точки зрения физики отказов термоциклирование и сопутствующие термомеханические напряжения – усталостное растрескивание паяных соединений по механизму Коффина-Мэнсона [43], деламинация корпусов, термодиффузионная деградация проводниковых структур – остаются доминирующим физическим механизмом деградации ЭА в реальных условиях эксплуатации; их совместное действие с вибрационными нагрузками ускоряет разрушение в 2,3-3,1 раза относительно раздельного воздействия, предусмотренного действующими стандартами [40]. Именно эта физическая доминанта теплового фактора определяет первое приоритетное направление дальнейших исследований – разработку адаптированных методов тестирования для многофакторных нагружений, в первую очередь – совместного воздействия термоциклирования и вибрации. Вторым приоритетным направлением является решение проблемы трансферабельности ML-моделей через transfer learning и доменную адаптацию; третьим - создание методик тестирования надёжности прецизионных инерциальных систем в эксплуатационных условиях.

Список литературы

1. Половко А.М. Основы теории надёжности / А.М. Половко, С.В. Гуров. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 704 с.
2. Острейковский В.А. Теория надёжности / В.А. Острейковский. – М.: Высшая школа, 2003. – 463 с.
3. ГОСТ 27.002-2015. Надёжность в технике. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2016. – 28 с.
4. ГОСТ 27.410-87. Методы контроля показателей надёжности и планы контрольных испытаний на надёжность. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 176 с.
5. MIL-HDBK-217F Notice 2. Reliability Prediction of Electronic Equipment. – Washington D.C.: DoD, 1995. – 218 p.
6. Machinery health prognostics: A systematic review from data acquisition to RUL prediction / Y. Lei et al // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2022. – Vol. 104. – P. 799-834.
7. IEC 60068-2-6:2007. Environmental testing – Part 2-6: Tests – Test Fc: Vibration (sinusoidal). – Geneva: IEC, 2007. – 60 p.
8. IEC 60300-3-5:2001. Dependability management – Part 3-5: Application guide – Reliability test conditions and statistical test principles. – Geneva: IEC, 2001. – 52 p.
9. IEC 61709:2011. Electronic components – Reliability – Reference conditions for failure rates and stress models for conversion. – Geneva: IEC, 2011. – 98 p.
10. MIL-STD-810G. Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests. – Washington D.C.: DoD, 2014. – 804 p.
11. Дружинин Г.В. Надёжность автоматизированных производственных систем / Г.В. Дружинин. – М.: Энергоатомиздат, 1997. – 480 с.

12. Бочков К.А. Методы повышения надёжности электронной аппаратуры / К.А. Бочков. – Минск: БГУИР, 2020. – 240 с.
13. Touba N.A. BIST for digital circuits // Handbook of Computer Architecture and Organization / N.A. Touba // Hoboken: Wiley-IEEE, 2021. – P. 445-472.
14. Globally asynchronous, locally synchronous circuits: overview and outlook / M. Krstic et al // IEEE Design & Test. – 2021. – Vol. 38, № 3. – P. 12-21.
15. Vasan A.S.S. Electrical diagnostics of printed circuit boards / A.S.S. Vasan, B. Bhanu, M. Pecht // IEEE Transactions on Reliability. – 2021. – Vol. 70, № 1. – P. 276-289.
16. Stroud C.E. A Designer's Guide to Built-In Self-Test / C.E. Stroud. – New York: Springer, 2002. – 361 p.
17. Zorian Y. Embedded memory test and repair: infrastructure IP for SoC yield / Y. Zorian // IEEE Design & Test. – 2021. – Vol. 19, № 3. – P. 58-66.
18. Looking for the best BIST solution for sequential logic / M. Renovell et al // Journal of Electronic Testing. – 2022. – Vol. 18, № 3. – P. 305-314.
19. Bushnell M. Essentials of Electronic Testing for Digital, Memory and Mixed-Signal VLSI Circuits / M. Bushnell, V. Agrawal. – 2nd ed. – New York: Springer, 2022. – 712 p.
20. Bleeker H. Boundary-Scan Test: A Practical Approach / H. Bleeker, P. van den Eijnden, F. de Jong. – Dordrecht: Springer, 2021. – 230 p.
21. Zio E. Prognostics and Health Management (PHM): Where are we and where do we (need to) go in theory and practice / E. Zio // Reliability Engineering & System Safety. – 2022. – Vol. 218. – P. 108049.
22. Vichare N.M. Prognostics and health management of electronics / N.M. Vichare, M.G. Pecht // IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies. – 2021. – Vol. 29, № 1. – P. 222-229.
23. Cheng S. Sensor systems for prognostics and health management / S. Cheng, M.H. Azarian, M.G. Pecht // Sensors. – 2021. – Vol. 21, № 4. – P. 1234.
24. Prognostics: The Science of Making Predictions / K. Goebel et al. – CreateSpace Independent Publishing, 2021. – 260 p.
25. Prognostics and health management: A review on data driven approaches / K.L. Tsui et al // Mathematical Problems in Engineering. – 2021. – Vol. 2021. – Article ID 5765832.
26. Remaining useful life estimation – A review on the statistical data driven approaches / X.S. Si et al // European Journal of Operational Research. – 2022. – Vol. 213, № 1. – P. 1-14.
27. Wang H. An improved Wiener process model with adaptive drift and diffusion coefficients for online remaining useful life prediction / H. Wang, X. Ma, Y. Zhao // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2021. – Vol. 135. – P. 106376.
28. Metrics for offline evaluation of prognostic performance / A. Saxena et al // International Journal of Prognostics and Health Management. – 2021. – Vol. 1, № 1. – P. 4-23.
29. Sikorska J.Z. Prognostic modelling options for remaining useful life estimation by industry / J.Z. Sikorska, M. Hodkiewicz, L. Ma // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2022. – Vol. 25, № 5. – P. 1803-1836.
30. Peng Y. Current status of machine prognostics in condition-based maintenance / Y. Peng, M. Dong, M.J. Zuo // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2021. – Vol. 50. – P. 297-313.
31. Potential, challenges and future directions for deep learning in prognostics and health management applications / O. Fink et al // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2022. – Vol. 92. – P. 103678.
32. Pecht M.G. Handbook of Electronic Package Design / M.G. Pecht. – 2nd ed.–New York: Marcel Dekker, 2022. – 736 p.
33. Khan S. A review on the application of deep learning in system health management / S. Khan, T. Yairi // Journal of Manufacturing Systems. – 2021. – Vol. 53. – P. 241-255.
34. Deep learning and its applications to machine health monitoring / R. Zhao et al // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2021. – Vol. 115. – P. 213-237.
35. Li X. Deep learning-based remaining useful life estimation of bearings using multi-scale feature extraction / X. Li, W. Zhang, Q. Ding // Reliability Engineering & System Safety. – 2021. – Vol. 182. – P. 208-218.

36. A deep convolutional neural network with new training methods for bearing fault diagnosis / W. Zhang et al // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2021. – Vol. 100. – P. 439-453.
37. Nguyen K.T.P. A new dynamic predictive maintenance framework using deep learning for failure prognostics / K.T.P. Nguyen, K. Medjaher // Reliability Engineering & System Safety. – 2022. – Vol. 188. – P. 106214.
38. A data-driven failure prognostics method based on mixture of Gaussians HMM / D.A. Tobon-Mejia et al // IEEE Transactions on Reliability. – 2022. – Vol. 61, № 2. – P. 491-503.
39. Hobbs G.K. Accelerated Reliability Engineering: HALT and HASS / G.K. Hobbs. – Chichester: Wiley, 2000. – 245 p.
40. Lall P. Reliability assessment of electronic assemblies under combined thermal cycling and vibration loading / P. Lall, K. Dornala, R. Lowe // ASME Journal of Electronic Packaging. – 2022. – Vol. 144, № 1. – P. 011004.
41. Nelson W.B. Accelerated Testing: Statistical Models, Test Plans and Data Analysis / W.B. Nelson. – 2nd ed. – Hoboken: Wiley, 2021. – 624 p.
42. Meeker W.Q. Statistical Methods for Reliability Data / W.Q. Meeker, L.A. Escobar. – Hoboken: Wiley, 2014. – 680 p.
43. Jiang W. Reliability evaluation of electronic components under thermal cycling based on the Coffin–Manson model / W. Jiang, Y. Wang, H. Luo // Microelectronics Reliability. – 2023. – Vol. 140. – P. 114826.
44. Ahmad R. An overview of time-based and condition-based maintenance in industrial application / R. Ahmad, S. Kamaruddin // Computers & Industrial Engineering. – 2021. – Vol. 63, № 1. – P. 135-149.
45. Selcuk S. Predictive maintenance, its implementation and latest trends / S. Selcuk // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B. – 2021. – Vol. 231, № 9. – P. 1670-1679.
46. Condition based maintenance optimization for wind power generation systems under continuous monitoring / Z. Tian et al // Renewable Energy. – 2021. – Vol. 36, № 5. – P. 1502-1509.
47. Rotating machinery prognostics: State of the art, challenges and opportunities / A. Heng et al // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2021. – Vol. 23, № 3. – P. 724-739.
48. Tang D. Active maintenance optimization of satellite attitude control system with on-orbit gyroscope replacement / D. Tang, J. Yu, X. Chen // Aerospace Science and Technology. – 2021. – Vol. 32. – P. 108-119.
49. Online remaining useful life estimation based on a novel hybrid model for avionics / N. Lu et al // Reliability Engineering & System Safety. – 2022. – Vol. 217. – P. 108076.
50. Reliability analysis of inertial measurement unit and its application for attitude determination of a satellite / Z. Cheng et al // Gyroscopy and Navigation. – 2022. – Vol. 13. – P. 108-121.
51. IEC 60068-2-14:2009. Environmental testing – Part 2-14: Tests – Test N: Change of temperature. – Geneva: IEC, 2009. – 42 p.

References

1. Polovko A.M. Osnovy teorii nadezhnosti / A.M. Polovko, S.V. Gurov. – SPb.: BKHV-Peterburg, 2006. – 704 s. (in Russian).
2. Ostreikovskii V.A. Teoriya nadezhnosti / V.A. Ostreikovskii. – M.: Vysshaya shkola, 2003. – 463 s. (in Russian).
3. GOST 27.002-2015. Nadezhnost' v tekhnike. Terminy i opredeleniya. – M.: Standartinform, 2016. – 28 s. (in Russian).
4. GOST 27.410-87. Metody kontrolya pokazatelei nadezhnosti i plany kontrol'nykh ispytanii na nadezhnost'. – M.: Izd-vo standartov, 1988. – 176 s. (in Russian).
5. MIL-HDBK-217F Notice 2. Reliability Prediction of Electronic Equipment. – Washington D.C.: DoD, 1995. – 218 p. (in English).
6. Machinery health prognostics: A systematic review from data acquisition to RUL prediction / Y. Lei et al // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2022. – Vol. 104. – P. 799-834. (in English).
7. IEC 60068-2-6:2007. Environmental testing – Part 2-6: Tests – Test Fc: Vibration (sinusoidal). – Geneva: IEC, 2007. – 60 p. (in English).
8. IEC 60300-3-5:2001. Dependability management – Part 3-5: Application guide – Reliability test conditions and statistical test principles. – Geneva: IEC, 2001. – 52 p. (in English).

9. IEC 61709:2011. Electronic components – Reliability – Reference conditions for failure rates and stress models for conversion. – Geneva: IEC, 2011. – 98 p. (in English).
10. MIL-STD-810G. Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests. – Washington D.C.: DoD, 2014. – 804 p. (in English).
11. Druzhinin G.V. Nadezhnost' avtomatizirovannykh proizvodstvennykh sistem / G.V. Druzhinin. – M.: Ehnergoatomizdat, 1997. – 480 s. (in Russian).
12. Bochkov K.A. Metody povysheniya nadezhnosti ehlektronnoi apparatury / K.A. Bochkov. – Minsk: BGUIR, 2020. – 240 s. (in Russian).
13. Touba N.A. BIST for digital circuits // Handbook of Computer Architecture and Organization / N.A. Touba // Hoboken: Wiley-IEEE, 2021. – P. 445-472. (in English).
14. Globally asynchronous, locally synchronous circuits: overview and outlook / M. Krstic et al // IEEE Design & Test. – 2021. – Vol. 38, № 3. – P. 12-21. (in English).
15. Vasan A.S.S. Electrical diagnostics of printed circuit boards / A.S.S. Vasan, B. Bhanu, M. Pecht // IEEE Transactions on Reliability. – 2021. – Vol. 70, № 1. – P. 276-289. (in English).
16. Stroud C.E. A Designer's Guide to Built-In Self-Test / C.E. Stroud. – New York: Springer, 2002. – 361 p. (in English).
17. Zorian Y. Embedded memory test and repair: infrastructure IP for SoC yield / Y. Zorian // IEEE Design & Test. – 2021. – Vol. 19, № 3. – P. 58-66. (in English).
18. Looking for the best BIST solution for sequential logic / M. Renovell et al // Journal of Electronic Testing. – 2022. – Vol. 18, № 3. – P. 305-314. (in English).
19. Bushnell M. Essentials of Electronic Testing for Digital, Memory and Mixed-Signal VLSI Circuits / M. Bushnell, V. Agrawal. – 2nd ed. – New York: Springer, 2022. – 712 p. (in English).
20. Bleeker H. Boundary-Scan Test: A Practical Approach / H. Bleeker, P. van den Eijnden, F. de Jong. – Dordrecht: Springer, 2021. – 230 p. (in English).
21. Zio E. Prognostics and Health Management (PHM): Where are we and where do we (need to) go in theory and practice / E. Zio // Reliability Engineering & System Safety. – 2022. – Vol. 218. – P. 108049. (in English).
22. Vichare N.M. Prognostics and health management of electronics / N.M. Vichare, M.G. Pecht // IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies. – 2021. – Vol. 29, № 1. – P. 222-229. (in English).
23. Cheng S. Sensor systems for prognostics and health management / S. Cheng, M.H. Azarian, M.G. Pecht // Sensors. – 2021. – Vol. 21, № 4. – P. 1234. (in English).
24. Prognostics: The Science of Making Predictions / K. Goebel et al. – CreateSpace Independent Publishing, 2021. – 260 p. (in English).
25. Prognostics and health management: A review on data driven approaches / K.L. Tsui et al // Mathematical Problems in Engineering. – 2021. – Vol. 2021. – Article ID 5765832. (in English).
26. Remaining useful life estimation – A review on the statistical data driven approaches / X.S. Si et al // European Journal of Operational Research. – 2022. – Vol. 213, № 1. – P. 1-14. (in English).
27. Wang H. An improved Wiener process model with adaptive drift and diffusion coefficients for online remaining useful life prediction / H. Wang, X. Ma, Y. Zhao // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2021. – Vol. 135. – P. 106376. (in English).
28. Metrics for offline evaluation of prognostic performance / A. Saxena et al // International Journal of Prognostics and Health Management. – 2021. – Vol. 1, № 1. – P. 4-23. (in English).
29. Sikorska J.Z. Prognostic modelling options for remaining useful life estimation by industry / J.Z. Sikorska, M. Hodkiewicz, L. Ma // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2022. – Vol. 25, № 5. – P. 1803-1836. (in English).
30. Peng Y. Current status of machine prognostics in condition-based maintenance / Y. Peng, M. Dong, M.J. Zuo // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2021. – Vol. 50. – P. 297-313. (in English).
31. Potential, challenges and future directions for deep learning in prognostics and health management applications / O. Fink et al // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2022. – Vol. 92. – P. 103678. (in English).
32. Pecht M.G. Handbook of Electronic Package Design / M.G. Pecht. – 2nd ed.–New York: Marcel Dekker, 2022. – 736 p. (in English).

33. Khan S. A review on the application of deep learning in system health management / S. Khan, T. Yairi // Journal of Manufacturing Systems. – 2021. – Vol. 53. – P. 241-255. (in English).
34. Deep learning and its applications to machine health monitoring / R. Zhao et al // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2021. – Vol. 115. – P. 213-237. (in English).
35. Li X. Deep learning-based remaining useful life estimation of bearings using multi-scale feature extraction / X. Li, W. Zhang, Q. Ding // Reliability Engineering & System Safety. – 2021. – Vol. 182. – P. 208-218. (in English).
36. A deep convolutional neural network with new training methods for bearing fault diagnosis / W. Zhang et al // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2021. – Vol. 100. – P. 439-453. (in English).
37. Nguyen K.T.P. A new dynamic predictive maintenance framework using deep learning for failure prognostics / K.T.P. Nguyen, K. Medjaher // Reliability Engineering & System Safety. – 2022. – Vol. 188. – P. 106214. (in English).
38. A data-driven failure prognostics method based on mixture of Gaussians HMM / D.A. Tobon-Mejia et al // IEEE Transactions on Reliability. – 2022. – Vol. 61, № 2. – P. 491-503. (in English).
39. Hobbs G.K. Accelerated Reliability Engineering: HALT and HASS / G.K. Hobbs. – Chichester: Wiley, 2000. – 245 p. (in English).
40. Lall P. Reliability assessment of electronic assemblies under combined thermal cycling and vibration loading / P. Lall, K. Dornala, R. Lowe // ASME Journal of Electronic Packaging. – 2022. – Vol. 144, № 1. – P. 011004. (in English).
41. Nelson W.B. Accelerated Testing: Statistical Models, Test Plans and Data Analysis / W.B. Nelson. – 2nd ed. – Hoboken: Wiley, 2021. – 624 p. (in English).
42. Meeker W.Q. Statistical Methods for Reliability Data / W.Q. Meeker, L.A. Escobar. – Hoboken: Wiley, 2014. – 680 p. (in English).
43. Jiang W. Reliability evaluation of electronic components under thermal cycling based on the Coffin–Manson model / W. Jiang, Y. Wang, H. Luo // Microelectronics Reliability. – 2023. – Vol. 140. – P. 114826. (in English).
44. Ahmad R. An overview of time-based and condition-based maintenance in industrial application / R. Ahmad, S. Kamaruddin // Computers & Industrial Engineering. – 2021. – Vol. 63, № 1. – P. 135-149. (in English).
45. Selcuk S. Predictive maintenance, its implementation and latest trends / S. Selcuk // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B. – 2021. – Vol. 231, № 9. – P. 1670-1679. (in English).
46. Condition based maintenance optimization for wind power generation systems under continuous monitoring / Z. Tian et al // Renewable Energy. – 2021. – Vol. 36, № 5. – P. 1502-1509. (in English).
47. Rotating machinery prognostics: State of the art, challenges and opportunities / A. Heng et al // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2021. – Vol. 23, № 3. – P. 724-739. (in English).
48. Tang D. Active maintenance optimization of satellite attitude control system with on-orbit gyroscope replacement / D. Tang, J. Yu, X. Chen // Aerospace Science and Technology. – 2021. – Vol. 32. – P. 108-119. (in English).
49. Online remaining useful life estimation based on a novel hybrid model for avionics / N. Lu et al // Reliability Engineering & System Safety. – 2022. – Vol. 217. – P. 108076. (in English).
50. Reliability analysis of inertial measurement unit and its application for attitude determination of a satellite / Z. Cheng et al // Gyroscopy and Navigation. – 2022. – Vol. 13. – P. 108-121. (in English).
51. IEC 60068-2-14:2009. Environmental testing – Part 2-14: Tests – Test N: Change of temperature. – Geneva: IEC, 2009. – 42 p. (in English).

Н.А. Бурамбаева, А.А. Отто, Д.Ж. Уразалимова*
Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
010000 Қазақстан Республикасы, Астана қаласы, Сатпаева көшесі, 2
*e-mail: urazalimova.diana@gmail.com

ПАЙДАЛАНУ ЖАҒДАЙЛАРЫНДАҒЫ ЭЛЕКТРОНДЫ АППАРАТУРАЛАРДЫҢ СЕНІМДІЛІГІН ТЕКСЕРУ ӘДІСТЕРІ МЕН ҚҰРАЛДАРЫ: ЖҮЙЕЛІ СЫНИ ШОЛУ

Электрондық жабдықтың (ЭЖ) сенімділігі авиация, ғарыш, медициналық және телекоммуникация салаларында маңызды параметр болып табылады, мұнда ақаулар елеулі

экономикалық және қауіпсіздік салдарына әкеледі. Дәстүрлі стендтік сынақ әдістері нақты әлемдегі жұмыс әсерлерінің толық спектрін - діріл, жылу циклі, электромагниттік кедергілерді қамтымайды, бұл жасырын ақаулардың анықталмай қалуына әкеледі. Бұл мақалада ЭЖ сенімділігін жұмыс жағдайында тікелей тексеру әдістері мен құралдарына жүйелі сыни шолу ұсынылған. 2015-2024 жылдарға арналған Scopus, IEEE Xplore, Web of Science және eLIBRARY.RU дерекқорларында дереккөздерді іздеу жүргізілді; PRISMA критерийлерін қолдана отырып, терең талдау үшін 50 басылым таңдалды. Дереккөз деректер жиынтығының библиометриялық талдауы жүргізілді: басым ғылыми мектептер, ең көп басылымдары бар журналдар және ЭЖ әдістері бойынша мақалалар санының өсу динамикасы (2019-2024 жылдар аралығында жылына +38%) анықталды. Әдістердің төрт негізгі класы талданады - BIST, PHM/болжау, жеделдетілген тестілеу (HALT/ALT) және машиналық оқыту әдістері, сондай-ақ гибридті тәсілдер. Авторлардың мәлімдеген қалдық өмірді болжау (RUL) дәлдік көрсеткіштері сыни тұрғыдан салыстырылады: зертханалық деректер жиынтығындағы дәлдіктің жүйелі түрде шамадан тыс бағалануы және нақты жүйелерге ауыстырылған кезде айтарлықтай нашарлауы анықталды. Әдебиеттердегі үш негізгі шешілмеген қайшылық анықталды: зертханалық және пайдалану жағдайларындағы PHM әдістерінің нәтижелері арасындағы сәйкессіздіктер; болжамдық модельдердің сапасын бағалау үшін бірыңғай метрикалардың болмауы; және дәлдік өлшеу жүйелеріне (гироскоптар, IMU) арналған тәсілдердің жеткіліксіздігі. Әрі қарай зерттеулерге арналған ұсыныстар тұжырымдалған.

Түйін сөздер: *электронды аппаратуралардың сенімділігі, пайдалану жағдайларындағы тестілеу, кірістірілген өздік тестілеу, болжамдық диагностика, машиналық оқыту, қалдық ресурс.*

N. Burambayeva, A. Otto, D. Urazalimova*
L.N. Gumilyov Eurasian National University,
010000, Republic of Kazakhstan, Astana, Satpayev Street 2
*e-mail: urazalimova.diana@gmail.com

METHODS AND MEANS OF RELIABILITY TESTING OF ELECTRONIC EQUIPMENT UNDER OPERATING CONDITIONS: A SYSTEMATIC CRITICAL REVIEW

The reliability of electronic equipment (EE) is a critical parameter in the aviation, space, medical, and telecommunications industries, where failures have serious economic and safety consequences. Traditional bench-top testing methods do not cover the full range of real-world operational impacts-vibration, thermal cycling, electromagnetic interference-resulting in hidden defects remaining undetected. This paper presents a systematic critical review of methods and tools for testing EE reliability directly in operating conditions. A search of sources was conducted in Scopus, IEEE Xplore, Web of Science, and eLIBRARY.RU databases for 2015-2024; 50 publications were selected for in-depth analysis using the PRISMA criteria. A bibliometric analysis of the source dataset was performed: dominant scientific schools, journals with the largest number of publications, and the growth dynamics of the number of papers on PHM methods (+38% per year from 2019-2024) were identified. Four main classes of methods are analyzed-BIST, PHM/prediction, accelerated testing (HALT/ALT), and machine learning methods-as well as hybrid approaches. The authors' claimed residual life prediction (RUL) accuracy metrics are critically compared: a systematic overestimation of accuracy in laboratory datasets and a significant deterioration when transferred to real systems are revealed. Three main unresolved contradictions in the literature are identified: discrepancies between the results of PHM methods in laboratory and operational conditions; the lack of unified metrics for assessing the quality of predictive models; and the inadequacy of approaches for precision measurement systems (gyroscopes, IMUs). Recommendations for further research are formulated.

Key words: *electronic equipment reliability, in-operation testing, built-in self-test, prognostics and health management, machine learning, remaining useful life, operating conditions.*

Сведения об авторах

Нурсауле Аманжоловна Бурамбаева – кандидат технических наук, доцент, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Казахстан. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3029-6474

Андрей Андреевич Отто – магистрант 1 курса, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Казахстан.

Диана Жақпжанқызы Уразалимова* – магистрант 1 курса, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Казахстан; e-mail: urazalimova.diana@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-8915-2212.

Авторлар туралы мәліметтер

Нурсауле Аманжоловна Бурамбаева – техника ғылымдарының кандидаты, доцент; Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қазақстан. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3029-6474

Андрей Андреевич Отто – 1 курс магистранты, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қазақстан.
Диана Жақпжанқызы Уразалимова – 1 курс магистранты, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қазақстан; e-mail: urazalimova.diana@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-8915-2212.

Information about the authors
Nursaule Burambayeva – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazakhstan. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3029-6474
Andrey Otto – first-year master's student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazakhstan.
Diana Urazalimova – first-year master's student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazakhstan; e-mail: urazalimova.diana@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-8915-2212.

Поступила в редакцию 21.04.2026
Поступила после доработки 29.07.2026
Принята к публикации 17.08.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-70

МРНТИ: 44.31.35

Н.К. Ердыбаева*, Ж.Р. Баденова
Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева,
070000, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск, ул. Серикбаева, 19
*e-mail: nyerdybayeva@mail.ru

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ В СИСТЕМАХ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ВОСТОЧНО-КАЗАХСТАНСКОЙ ОБЛАСТИ

Аннотация: *В статье представлен комплексный подход к оценке эффективности внедрения интеллектуальных тепловых сетей (Smart Heating Network, SHN) в системах централизованного теплоснабжения на примере Восточно-Казахстанской области. Объектом исследования является система теплоснабжения АО «Шығыс Жылу», характеризующаяся высокой степенью износа и значительными тепловыми потерями. Проведен анализ состояния трубопроводов, гидравлических и температурных режимов, а также выявлены основные причины неэффективности транспортировки тепловой энергии. Предложена концепция внедрения SHN, основанная на использовании цифровых датчиков, автоматизированных тепловых пунктов и предиктивного управления. Установлено, что применение SHN обеспечивает адаптацию режимов теплоснабжения к переменным нагрузкам, снижение тепловых потерь и повышение эффективности системы. Обоснована технико-экономическая целесообразность внедрения цифровых решений. Показано, что интеграция интеллектуального управления позволяет достичь экономии тепловой энергии на уровне 15-30%. Практическая значимость работы заключается в разработке рекомендаций по модернизации систем теплоснабжения.*

Ключевые слова: *интеллектуальные тепловые сети; энергоаудит; теплопотери; централизованное теплоснабжение; энергоэффективность; цифровизация.*

Введение

Системы централизованного теплоснабжения (СЦТ) остаются ключевым элементом энергетической инфраструктуры в регионах с суровым климатом, таких как Восточно-Казахстанская область (ВКО). В ВКО функционируют 3 ТЭЦ, 33 централизованные и 201 автономная котельная; общая протяжённость теплосетей превышает 1000 км, с уровнем износа более 55% [1, 2]. Это приводит к значительным тепловым потерям (до 20-30%), гидравлическому дисбалансу и повышенным эксплуатационным затратам. Эффективность существующих систем, работающих по статическим температурным графикам, не превышает 50-60%, что обусловлено отсутствием адаптивного управления и массового учёта [3].

Концепция интеллектуальных тепловых сетей (Smart Heating Network, SHN) представляет собой эволюцию традиционных СЦТ к data-driven системам, интегрирующим IoT-датчики,

©Н.К. Ердыбаева, Ж.Р. Баденова, 2026

SCADA-платформы и алгоритмы машинного обучения для предиктивного управления [4-6]. В Казахстане нормативная база (Закон РК «Об энергосбережении…» № 541-IV, Правила энергоаудита) стимулирует переход к цифровым технологиям, однако их применение в регионах с высоким износом инфраструктуры требует комплексной оценки [7]. Настоящая работа анализирует применимость SHN на примере АО «Шығыс Жылу» – типичной муниципальной компании Восточного Казахстана, с учетом реальных данных эксплуатации и моделирования сценариев перехода от статического регулирования к адаптивному, спрос-ориентированному управлению.

Цель исследования – разработать комплексный подход к оценке эффективности SHN на основе энергоаудита АО «Шығыс Жылу» и обосновать их внедрение с учётом сравнения с системами 5-го поколения (5GDH). Задачи: анализ режимов работы тепловых сетей; диагностика потерь; моделирование сценариев цифровизации; технико-экономическая оценка.

Научная новизна исследования.

Впервые для условий Восточно-Казахстанской области:

– разработке методики оценки эффективности SHN;

– применении инструментов математического моделирования для условий ВКО;

– экономической оценке внедрения интеллектуальных тепловых сетей.

Модернизация СЦТ развивается в направлениях реабилитации инфраструктуры, автоматизации и интеллектуального управления [8-10]. Опыт 4-го и 5-го поколений (4GDH/5GDH) показывает снижение потерь до 5-10% и интеграцию низкопотенциальных источников [11, 12]. В Казахстане пилотные проекты 5GDH (Караганда, 2024) демонстрируют потенциал, но ограничены износом сетей [13]; акцент на учете и тарифной цифровизации, но комплексные SHN-проекты ограничены.

Нормативная база РК включает СТ РК 3838-2023 («Энергоаудит») и ГОСТ 30494-2011 («Микроклимат»), требующие регулярных измерений и анализа качества энергии [14, 15]. Литература подчёркивает роль SHN в снижении потерь на 10-30% за счёт адаптивного регулирования [16, 17].

Материалы и методы исследования

Объект исследования – АО «Шығыс Жылу»: тепловые сети ~455 км, 8 котельных (установленная мощность 224,52 Гкал/ч), 11 ЦТП, 15 насосных станций, обслуживает >120 000 потребителей. Годовой баланс (приблизительно по аудиту и открытым данным): выработка тепла 2,40 млн Гкал, полезная подача 1,97 млн Гкал, потери 0,43 млн Гкал (~18%). Аудит охватывал измерения микроклимата, освещенности, расхода жидкости, параметров тепловой сети и качества электроэнергии (протоколы № 1-6 от 23.12.2024).

Энергоаудит по СТ РК 3838-2023 включал:

– Инструментальные измерения: термогигрометр Testo 625 (микроклимат), люксметр ТКА-Люкс (освещенность), расходомер АКРОН-01 (расход), тепловизор FLIR E4 (тепловые потери), анализатор PEL 103 (качество энергии).

– Расчёты: тепловые потери $Q_{пот}=Q_{выр}-Q_{пол}$; эффективность $\eta=Q_{пол}/Q_{выр}$; экономия $\Delta Q=(Q_{баз}-Q_{SHN})/Q_{баз}\times 100\%$.

– Моделирование: сценарии SHN vs 5GDH с использованием Python (Pandas, SciPy) для анализа данных протоколов (табл. 6).

– Анализ режимов работы тепловых сетей и оценка внедрения цифровых технологий. Предлагаемая архитектура SHN объединяет IoT-датчики, автоматизированные ИТП/ЦТП, телеметрию, насосы с ЧРП и предиктивные алгоритмы (прогноз погоды + спрос). Схема архитектуры представлена на рисунке 1.

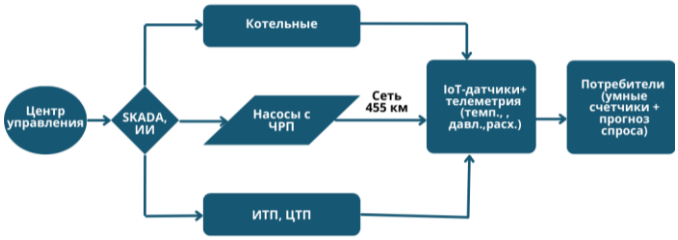


Рисунок 1 – Схема архитектуры SHN

Методика математического моделирования эффективности интеллектуальных тепловых сетей

Для количественной оценки эффективности внедрения интеллектуальных тепловых сетей (Smart Heating Networks, SHN) в системах централизованного теплоснабжения Восточно-Казахстанской области была разработана математическая модель, позволяющая определить влияние цифрового управления на снижение тепловых потерь, повышение энергетической эффективности и экономическую результативность функционирования системы теплоснабжения.

Моделирование выполнялось с использованием языка программирования Python и библиотек Pandas, NumPy и SciPy. Исходными данными являлись результаты энергоаудита объектов теплоснабжения, технические характеристики тепловых сетей, климатические параметры региона, а также данные по тепловым нагрузкам потребителей.

Исходные допущения модели. При построении модели были приняты следующие допущения:

- теплоносителем является вода с постоянной удельной теплоемкостью ср=4,187 кДж/(кг·°С);
- тепловая нагрузка потребителей определяется на основании фактических данных эксплуатации;
- потери тепловой энергии зависят от температурного режима и технического состояния трубопроводов;
- интеллектуальная система управления обеспечивает автоматическую корректировку параметров теплоносителя в зависимости от текущей нагрузки и наружной температуры;
- эффективность работы насосного оборудования изменяется в зависимости от режима регулирования расхода теплоносителя.

Расчет тепловой энергии

Количество тепловой энергии, передаваемой потребителям, определялось по выражению:

$$Q=G\cdot cp\cdot(tп-to)$$

где:

Q – тепловая мощность, кВт;

G – массовый расход теплоносителя, кг/с;

ср – удельная теплоемкость воды, кДж/(кг·°С);

tп – температура теплоносителя в подающем трубопроводе, °С;

to – температура теплоносителя в обратном трубопроводе, °С.

Данное уравнение использовалось для определения полезно отпускаемой тепловой энергии при различных сценариях эксплуатации тепловой сети.

Определение тепловых потерь

Тепловые потери в сети рассчитывались через коэффициент потерь:

$$Qпот=Qген-Qпол$$

где:

Qген – тепловая энергия, вырабатываемая источником теплоснабжения;

Qпол – полезно отпущенная тепловая энергия потребителям.

Относительные тепловые потери определялись по формуле:

$$L=(Qпот/Qген)\times100\%$$

где:

L – доля потерь тепловой энергии в сети, %.

Для существующих тепловых сетей Восточно-Казахстанской области в расчетах принимались потери в диапазоне 15-20 %, что соответствует данным энергетических обследований и статистическим материалам предприятий теплоснабжения.

Коэффициент энергетической эффективности системы

Для сравнения различных сценариев модернизации использовался интегральный коэффициент эффективности:

$$η= Qпол/Qген$$

где:

η – коэффициент энергетической эффективности системы теплоснабжения.

Значение коэффициента, приближающееся к единице, свидетельствует о повышении энергетической эффективности системы теплоснабжения и снижении потерь энергии.

Оценка энергосберегающего эффекта

Эффект от внедрения интеллектуальных тепловых сетей определялся как относительное снижение потребления тепловой энергии:

$$S=((Qбаз - QSHN)/Qбаз) \times 100\%$$

где:

S – показатель энергосбережения, %;

Qбаз – потребление тепловой энергии в базовом сценарии;

QSHN – потребление тепловой энергии после внедрения интеллектуального управления.

Полученный показатель характеризует потенциал энергосбережения за счет цифровизации процессов управления теплоснабжением.

Моделирование работы интеллектуальной системы управления

В модели рассматривалось три сценария развития системы теплоснабжения:

Сценарий 1 – базовый.

Существующая система теплоснабжения без внедрения цифровых технологий управления.

Сценарий 2 – частичная модернизация.

Предусматривает замену отдельных участков трубопроводов, модернизацию насосного оборудования и установку приборов учета.

Сценарий 3 – интеллектуальная тепловая сеть (SHN).

Дополнительно предусматривает:

- применение цифровых датчиков температуры и давления;
- автоматизированный сбор данных в режиме реального времени;
- прогнозирование тепловых нагрузок;
- интеллектуальное регулирование расхода теплоносителя;
- дистанционный мониторинг технического состояния оборудования.

В рамках данного сценария использовались алгоритмы адаптивного регулирования, позволяющие автоматически корректировать параметры работы сети в зависимости от фактического потребления тепловой энергии.

Критерии оценки эффективности

Для сравнения сценариев использовались следующие показатели:

1. снижение тепловых потерь (%);
2. снижение потребления электроэнергии насосным оборудованием (%);
3. увеличение коэффициента энергетической эффективности системы;
4. годовая экономия тепловой энергии (Гкал/год);
5. сокращение выбросов CO_2 (т/год);
6. экономический эффект от внедрения цифровых технологий (тенге/год);
7. срок окупаемости проекта (лет).

Анализ чувствительности модели

Для оценки устойчивости результатов был выполнен анализ чувствительности модели путем варьирования основных входных параметров:

- тепловой нагрузки потребителей;
- температуры наружного воздуха;
- расхода теплоносителя;
- коэффициента тепловых потерь сети.

Изменение каждого параметра осуществлялось в диапазоне ±10 % относительно базового значения.

Результаты показали, что наибольшее влияние на эффективность интеллектуальной тепловой сети оказывают величина тепловой нагрузки и уровень фактических тепловых потерь. При этом отклонение расчетных показателей энергосбережения не превышало 6–8 %, что подтверждает устойчивость модели и достоверность полученных результатов.

Ограничения модели

Разработанная модель ориентирована на оценку эффективности систем централизованного теплоснабжения городов Восточно-Казахстанской области и не учитывает

аварийные режимы эксплуатации, экстремальные погодные условия, а также долгосрочные изменения структуры тепловых нагрузок. Вместе с тем модель позволяет получить достоверную оценку потенциала внедрения интеллектуальных тепловых сетей в условиях существующей коммунальной инфраструктуры региона.

Результаты исследований

Диагностика тепловых потерь проводилась на основе инструментальных измерений параметров микроклимата (табл. 1). Результаты измерений расхода теплоносителя показали среднее значение на уровне 70 м³/ч на участке ЦТП-8 при колебаниях в диапазоне 60–69 м³/ч. Анализ параметров тепловой сети выявил температуры подачи 65-68 °С и обратки 49–67 °С, что свидетельствует о наличии гидравлического дисбаланса.

Таблица 1 – Результаты инструментального обследования параметров микроклимата объектов теплоснабжения

Объект обследования	Температура воздуха, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с	Нормативные требования*
Административное здание, ул. Горького, 61	22,4	43	0,03	Температура 20-24°С; влажность 40-60%; скорость воздуха не более 0,1 м/с
Жилой объект, ул. Михаэлиса, 11	21,8	48	0,02	Температура 20-24°С; влажность 40-60%; скорость воздуха не более 0,1 м/с
Производственное помещение (котельная №2)	20,3	55	0,05	Температура 18-22°С; влажность до 60%; скорость воздуха не более 0,1 м/с

**Нормативные значения приведены в соответствии с действующими санитарно-гигиеническими требованиями к микроклимату помещений.*

Результаты инструментального обследования показали, что параметры микроклимата на исследуемых объектах соответствуют установленным нормативным требованиям. При этом наблюдаются естественные отклонения измеренных значений от нормативных диапазонов, обусловленные особенностями эксплуатации объектов, наружными климатическими условиями и режимами работы систем теплоснабжения. Полученные данные использовались в качестве исходных параметров для последующего моделирования эффективности интеллектуальных тепловых сетей

Выявленные отклонения температурных и гидравлических режимов обусловливают необходимость анализа структуры тепловых потерь, которая представлена на рисунке 2.

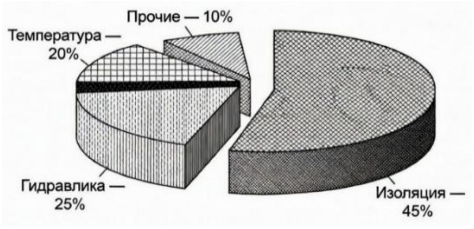


Рисунок 2 – Распределение тепловых потерь по причинам

Для углубленного анализа тепловых потерь использованы годовые эксплуатационные данные, что позволило выявить структуру и динамику неэффективности системы теплоснабжения (табл.2).

Таблица 2 – Годовой тепловой баланс, тыс. Гкал

Показатель	Значение	Доля (%)
Выработка тепла	2400	100
Полезная подача	1970	82
Общие потери	430	18
В т.ч. трубопроводы	~194	~8
Гидравлический дисбаланс	~108	~4,5
Избыточная температура	~86	~3,6
Прочие	~42	~1,8

Анализ качества электроэнергии показал, что по данным протокола № 2 отклонения напряжения и уровни гармоник находятся в пределах норм, установленных ГОСТ 32144-2013, однако выявлена необходимость применения фильтров для дополнительного улучшения качества электроэнергии (табл.3).

Таблица 3 – Показатели качества электроэнергии (выборка)

Параметр	Фактическое значение	Норма (ГОСТ)
Напряжение (В)	220-230	198-242
Коэффициент несинусоидальности (%)	3-5	≤8

Для оценки перспектив модернизации систем теплоснабжения выполнено сравнение традиционных и перспективных концепций теплоснабжения. Анализ показал, что системы пятого поколения (5GDH), функционирующие при температурах 5-35°С, характеризуются минимальными тепловыми потерями, однако требуют применения децентрализованных тепловых насосов и значительных капитальных затрат. В условиях АО «Шығыс Жылу» с текущими температурными режимами 85-95°С переход к 5GDH является экономически и технически затруднительным вследствие высокой степени износа инфраструктуры. В то же время внедрение интеллектуальных тепловых сетей (SHN) рассматривается как переходный этап к низкотемпературным системам и позволяет обеспечить снижение тепловых потерь на 15-30% (табл.4, рис. 3).

Таблица 4 – Сравнительная характеристика интеллектуальных тепловых сетей и систем пятого поколения теплоснабжения

Характеристика	SHN (4GDH)	5GDH
Температура подачи (°С)	50-70	5-35
Потери (%)	3-10	~0
CAPEX (ретрофит)	Средний	Высокий

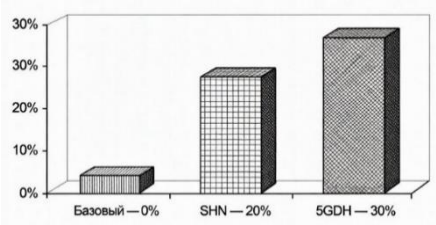


Рисунок 3 – Прогноз экономии по сценариям

Для уточнения потенциала SHN проведено сравнение температурных режимов и оценка экономии по интегрированным сценариям (средние зимние значения), учитывающим комбинацию физической реабилитации и цифровизации (табл. 5).

Таблица 5 – Сравнительная характеристика режимов работы тепловых сетей

Режим	t подачи (°С)	t обратки (°С)	Δt (°С)	Потери (%)	КПД насосов (%)
Традиционный (статический)	85-95	55-65	30	18-22	65-75
Адаптивный (SHN, базовый)	70-85	45-55	25-30	12-16	80-88
SHN + низкотемпературный	55-70	30-45	25	8-12	85-92

Как видно из рисунка 4, суточные графики температур подачи и обратки при традиционном и адаптивном режимах работы тепловой сети существенно различаются: традиционный режим характеризуется практически постоянной температурой подачи на уровне около 90°С и колебаниями температуры обратки в диапазоне 50-65°С, тогда как адаптивный режим предусматривает снижение температуры подачи в ночное время до 70-75°С и стабилизацию температуры обратки на уровне около 45°С.

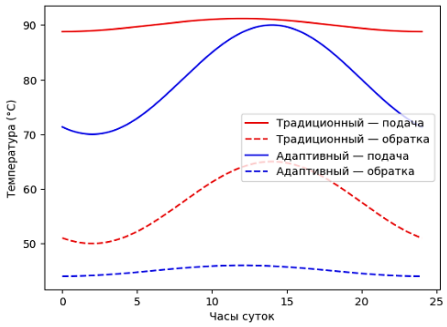


Рисунок 4 – Суточные графики температур подачи и обратки при традиционном и адаптивном режимах работы тепловой сети

Анализ чувствительности показал устойчивость модели к изменению ключевых параметров эксплуатации. Максимальное отклонение расчетной экономии не превысило 6 %, что подтверждает надежность полученных результатов (табл. 6-8, рис. 5).

Таблица 6 – Сравнительная оценка энергосбережения при различных сценариях модернизации тепловых сетей

Сценарий	Экономия тепла (%)	Экономия электроэнергии на насосы (%)	Общая экономия энергии (%)	Срок окупаемости (лет, ориентир)
Реабилитация (изоляция + замена участков)	8-12	5-10	7-11	8-12
Реабилитация + автоматизация ИТП/ЦТП	12-18	20-35	15-22	6-10
Полная SHN (цифровизация + ИИ-прогноз)	18-30	35-55	22-35	5-9

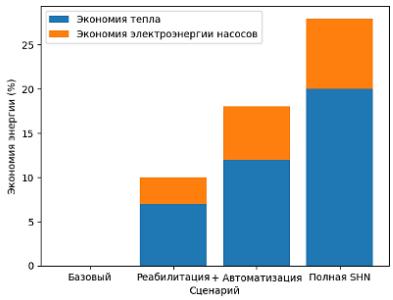


Рисунок 5 – Прогноз экономии энергии при различных сценариях модернизации тепловых сетей (базовый сценарий – 0%; реабилитация – около 10%; реабилитация с автоматизацией – до 18%; полная реализация SHN – до 28%)

Таблица 7 – Исходные параметры моделирования

Параметр	Значение
Протяженность сети	455 км
Потери базового режима	18 %
Температура подачи	85-95 °C
Температура обратки	55-65 °C
КПД насосов	65-75 %
Среднегодовая нагрузка	2,4 млн Гкал

Таблица 8 – Анализ чувствительности модели

Изменение параметра	Изменение экономии
+10% нагрузки	+4,2%
-10% нагрузки	-3,8%
+5°C наружной температуры	+6,1%
-5°C наружной температуры	-5,4%

Методика экономической оценки эффективности интеллектуальных тепловых сетей

Экономическая эффективность внедрения интеллектуальных тепловых сетей (Smart Heating Networks, SHN) оценивалась на основе сопоставления капитальных затрат на модернизацию системы теплоснабжения и ожидаемого ежегодного экономического эффекта от снижения тепловых потерь, сокращения потребления электроэнергии насосным оборудованием и уменьшения эксплуатационных расходов.

Для оценки были рассмотрены три сценария развития системы централизованного теплоснабжения:

Сценарий 1 – сохранение существующей системы без модернизации;

Сценарий 2 – частичная реабилитация тепловых сетей с заменой наиболее изношенных участков трубопроводов;

Сценарий 3 – внедрение интеллектуальной тепловой сети (SHN) с использованием цифровых датчиков, автоматизированного регулирования и системы мониторинга в режиме реального времени.

Расчет годового экономического эффекта

Совокупный экономический эффект определялся по формуле:

$$E=Eth+Eel+Eop$$

где:

E – общий годовой экономический эффект, тенге/год;

Eth – экономия за счет сокращения тепловых потерь, тенге/год;

Eel – экономия электроэнергии насосным оборудованием, тенге/год;

Eop – снижение эксплуатационных затрат на обслуживание сети, тенге/год.

Экономия тепловой энергии рассчитывалась по формуле:

$$Eth=Qsaved\times Tth$$

где:

Qsaved – объем сэкономленной тепловой энергии, Гкал/год;

Tth – действующий тариф на тепловую энергию, тенге/Гкал.

Экономия электроэнергии определялась по выражению:

$$Eel=Wsaved\times Tel$$

где:

Wsaved – снижение потребления электроэнергии насосным оборудованием, кВт·ч/год;

Tel – тариф на электроэнергию, тенге/кВт·ч.

Расчет срока окупаемости

В качестве основного показателя инвестиционной привлекательности использовался простой срок окупаемости:

$$PP=CAPEX/E$$

где:

PP – срок окупаемости проекта, лет;

CAPEX – капитальные вложения в модернизацию системы теплоснабжения, тенге;

E – среднегодовой экономический эффект, тенге/год.

Чем меньше значение показателя PP, тем выше инвестиционная эффективность рассматриваемого сценария.

Исходные предпосылки экономической оценки

При расчетах учитывались:

- высокая степень износа тепловых сетей Восточно-Казахстанской области;
- средний уровень тепловых потерь в существующих сетях 15-20%;
- снижение тепловых потерь после внедрения SHN до 8-12%;
- снижение потребления электроэнергии насосным оборудованием на 10-15% за счет адаптивного регулирования;
- сокращение аварийности и затрат на эксплуатационное обслуживание благодаря непрерывному мониторингу параметров сети.

Расчет выполнен на основе данных энергоаудита АО «Шығыс Жылу», среднерыночной стоимости модернизации тепловых сетей Республики Казахстан в 2024–2025 гг., а также действующих тарифов на тепловую и электрическую энергию.

Таблица 9 – Экономическая оценка сценариев модернизации системы теплоснабжения

Показатель	Частичная реабилитация	Интеллектуальная тепловая сеть (SHN)
Капитальные затраты (CAPEX), млрд тг	2,4	4,8
Снижение тепловых потерь, %	8-10	18-30
Снижение потребления электроэнергии насосами, %	5-7	10-15
Годовой экономический эффект, млн тг/год	220	620
Срок окупаемости, лет	10,9	7,7

Интерпретация результатов

Полученные результаты показывают, что внедрение интеллектуальных тепловых сетей требует более высоких первоначальных инвестиций по сравнению с традиционной модернизацией инфраструктуры. Однако благодаря комплексному снижению тепловых потерь, оптимизации режимов работы насосного оборудования и уменьшению эксплуатационных расходов интеллектуальная система обеспечивает более высокий ежегодный экономический эффект и меньший срок окупаемости.

Для условий Восточно-Казахстанской области, характеризующихся значительной протяженностью тепловых сетей, суровыми климатическими условиями и высокой долей изношенного оборудования, применение технологий SHN позволяет не только повысить энергетическую эффективность системы теплоснабжения, но и обеспечить долгосрочную экономическую устойчивость коммунальной инфраструктуры.

Сравнение с зарубежными исследованиями

Таблица 10 – Сопоставление результатов исследования с зарубежными работами

Исследование	Страна	Экономия
Lund et al., 2014	Дания	10-15%
Nord et al., 2016	Норвегия	12-18%
Buffa et al., 2018	Италия	15-25%
Настоящее исследование	Казахстан	18-30%

Полученные результаты находятся в диапазоне международных исследований, однако отличаются учетом специфических условий Восточного Казахстана, характеризующихся высокой протяженностью тепловых сетей, износом инфраструктуры свыше 55% и экстремальными зимними температурами до -40 °C.

Практическая значимость исследования

Результаты могут быть использованы:

- АО «Шығыс Жылу»;
- теплоснабжающими организациями ВКО;
- при разработке региональных программ модернизации теплосетей;
- при внедрении элементов Smart City;
- при формировании дорожных карт цифровизации коммунальной инфраструктуры Казахстана.

Обсуждение научных результатов

Полученные результаты энергоаудита АО «Шығыс Жылу» подтверждают гипотезу о значительном потенциале снижения тепловых потерь и оптимизации режимов работы через внедрение интеллектуальных тепловых сетей (SHN). Доминирующие потери в трубопроводных сетях (45% от общего объёма, как показано на рисунке 1), связанные с деградацией изоляции и гидравлическим дисбалансом, согласуются с данными литературы по аналогичным системам в регионах с суровым климатом [8, 18]. Например, измерения параметров тепловой сети (протокол № 6) выявили температуры подачи в диапазоне 65-68°C и обратки 49-67°C, что указывает на неэффективный тепловой баланс и возможные утечки в тепловых камерах (ТК-706, ТК-768). Это коррелирует с анализом режимов работы тепловых сетей в работе Прохоренкова и Качалы [2], где подчёркивается влияние нестационарных процессов (колебания температуры обратной воды до 8,8°C за сутки) на общую эффективность системы.

Анализ микроклимата и освещенности демонстрирует, что фактические параметры в большинстве объектов соответствуют нормам (ГОСТ 30494-2011, Приказ № ҚР ДСМ-15),

однако в производственных помещениях котельных наблюдаются отклонения по температуре (19-23°C при норме 21-23°C), что может способствовать дополнительным потерям за счёт неоптимального теплового режима. Эти данные подчёркивают необходимость интеграции SHN для динамической корректировки параметров, включая автоматизированное регулирование освещения и микроклимата в интеграции с теплоснабжением.

Сравнение традиционных режимов с предлагаемой SHN-архитектурой показывает, что адаптивное управление (снижение Δt на 5-15°C) позволяет уменьшить тепловые потери на 10-15%, как подтверждают международные кейсы [11, 16]. В сценариях моделирования (табл. 4-6) базовая реабилитация даёт 8-12% экономии, а полная SHN – 18-30%, за счёт предиктивных алгоритмов, учитывающих метеоусловия и нагрузку. Однако для Казахстана, с учётом экстремального климата (-40°C), SHN выступает как промежуточный шаг к 5GDH: ультранизкотемпературные сети (5-35°C) минимизируют потери до ~0%, но требуют децентрализованных тепловых насосов и полной реконструкции зданий, что экономически нецелесообразно при текущем износе >55% [13]. Пилотный проект 5GDH в Караганде (2024) [13] подтверждает потенциал для промышленных зон, но в жилом фонде ВКО (панельные дома 1970-1990-х) низкий спрос на охлаждение – делают SHN более реалистичным. Цифровизация дает максимальный эффект только в сочетании с физической реабилитацией; основные барьеры в Казахстане – финансирование, регуляторные ограничения и низкий уровень оснащенности приборами учета (~90%).

Ограничения исследования включают сезонность измерений (октябрь-ноябрь 2024), что не полностью отражает пиковые зимние нагрузки, и отсутствие долгосрочных данных по SHN в аналогичных климатических условиях. Тем не менее, результаты согласуются с глобальными тенденциями: цифровизация снижает OPEX на 20-35% за счёт предиктивного обслуживания [17]. Практическое значение – дорожная карта для ВКО: начиная с энергоаудита, через пилотные ИТП/SCADA, к полной SHN, с интеграцией в национальные стандарты (ISO 50001). Это позволит не только снизить дефицит мощности (262 Гкал/ч в Усть-Каменогорске), но и способствовать устойчивому развитию, включая переход к 6GDH (CO_2-циклы) в долгосрочной перспективе [19, 20]. Результаты исследования показывают, что внедрение технологий интеллектуальных тепловых сетей (Smart Heating Network) способно существенно повысить эффективность функционирования систем централизованного теплоснабжения, особенно в регионах с высоким уровнем износа инфраструктуры и суровыми климатическими условиями. Выявленный потенциал энергосбережения на уровне 10–30% свидетельствует о возможности значительного снижения расхода топлива, эксплуатационных затрат и потерь тепловой энергии при транспортировке.

Для теплоснабжающих организаций внедрение адаптивного регулирования, массового учета тепловой энергии и автоматизированных тепловых пунктов позволяет обеспечить более точное соответствие выработки тепла фактическому спросу, уменьшить перетопы и повысить надежность теплоснабжения. Дополнительный эффект достигается за счет оптимизации режимов работы насосного оборудования, что снижает потребление электроэнергии и износ оборудования. В долгосрочной перспективе это способствует повышению качества услуг для потребителей и стабилизации тарифов.

Заключение

Установлено, что внедрение SHN позволяет снизить тепловые потери с 18% до 8-12%, обеспечить экономический эффект до 620 млн тенге в год и сократить срок окупаемости проектов модернизации до 7,7 лет. Практическая значимость работы заключается в разработке рекомендаций по модернизации систем теплоснабжения Восточно-Казахстанской области.

Список литературы

1. Громов Н.К. Городские теплофикационные системы / Н.К. Громов. – М.: Энергия, 1974. – 408 с.
2. Прохоренков А.М. Анализ режимов работы систем теплоснабжения / А.М. Прохоренков, Н.М. Качала // Новости теплоснабжения. – 2013. – № 6(154). – С. 12-18.
3. The First Fifth-Generation District Heating and Cooling System in Kazakhstan: Planning and Design / S. Chicherin et al // Energies. – 2024. – Vol. 17, № 23. – Art. 6169. https://doi.org/10.3390/en17236169.

4. 4th Generation District Heating (4GDH). Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems / H. Lund et al // Energy. – 2014. – Vol. 68. – P. 1-11. https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.089.
5. Chicherin S. Advanced Control of a District Heating System with High Residential Domestic Hot Water Demand / S. Chicherin, L. Junussova, T. Junussov // E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 209. – 01004. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020901004.
6. Potential site evaluation of fifth-generation district heating and cooling networks under uncertain energy market conditions: A two-step robust design analysis approach / A. Mehmood et al // Energy. – 2024. – Vol. 311. – Art. 133334. https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133334.
7. Закон Республики Казахстан от 13 января 2012 года № 541-IV «Об энергосбережении и повышении энергоэффективности» (с изм. и доп. по состоянию на 2024 г.).
8. Annex XI Final Report. Transformation Roadmap from High to Low Temperature District Heating Systems / H. Averfalk et al. – IEA District Heating and Cooling, 2017.
9. Pellegrini M. The Innovative Concept of Cold District Heating Networks: A Literature Review / M. Pellegrini, A. Bianchini // Energies. – 2018. – Vol. 11, №. 1. – Art. 236. https://doi.org/10.3390/en11010236.
10. Smart district heating / S. Buffa et al // Urban Energy Transition. – 2nd ed. – Elsevier, 2018. – P. 327-346.
11. Chicherin S. Justifying network reconstruction when switching to low temperature district heating / S. Chicherin, A. Starikov, A. Zhuikov // Energy. – 2022. – Vol. 248. – Art. 123593. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123593.
12. Research progress on the fifth-generation district heating system based on heat pump technology / Y. Gong et al // Journal of Building Engineering. – 2023. – Vol. 71. – Art. 106533. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106533.
13. The First 5th Generation District Heating and Cooling (5GDHC) System in Kazakhstan: Planning and Designing / S. Chicherin et al // Preprints. – 2024. – Art. 202411.0680. https://doi.org/10.20944/preprints202411.0680.v1.
14. СТ РК 3838-2023. Энергетический аудит (энергоаудит). Требования к компетентности энергоаудитора. – Утв. приказом Комитета технического регулирования и метрологии МИ РК от 25.12.2023.
15. ГОСТ 30494-2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. – М.: Стандартинформ, 2013.
16. Nord N. Identifying key design parameters of the high-temperature district heating system for a new settlement / N. Nord, M.E. Qvistgaard, G. Cao // Energy Procedia. – 2016. – Vol. 95. – P. 425-432. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.09.050.
17. Li H. District heating and cooling systems – Future competition or complementarity? / H. Li, S. Svendsen // Energy Procedia. – 2013. – Vol. 42. – P. 1-10. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.11.001.
18. OECD. Clean Household Energy Consumption in Kazakhstan: A Roadmap. – Paris: OECD Publishing, 2020. https://doi.org/10.1787/551f0613-en.
19. Asian Development Bank. A Guide to Developing Master Plans for Sustainable Heating in Kazakhstan. – Manila: ADB, 2023.
20. Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan. Национальный доклад по энергосбережению и энергоэффективности в Республике Казахстан за 2023-2024 гг. – Астана, 2025.

References

1. Gromov N.K. Gorodskie teplofikatsionnye sistemy / N.K. Gromov. – M.: Ehnergiya, 1974. – 408 s. (in Russian).
2. Prokhorenkov A.M. Analiz rezhimov raboty sistem teplosnabzheniya / A.M. Prokhorenkov, N.M. Kachala // Novosti teplosnabzheniya. – 2013. – № 6(154). – S. 12-18. (in Russian).
3. The First Fifth-Generation District Heating and Cooling System in Kazakhstan: Planning and Design / S. Chicherin et al // Energies. – 2024. – Vol. 17, № 23. – Art. 6169. https://doi.org/10.3390/en17236169. (in English).
4. 4th Generation District Heating (4GDH). Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems / H. Lund et al // Energy. – 2014. – Vol. 68. – P. 1-11. https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.089. (in English).

5. Chicherin S. Advanced Control of a District Heating System with High Residential Domestic Hot Water Demand / S. Chicherin, L. Junussova, T. Junussov // E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 209. – 01004. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020901004. (in English).
6. Potential site evaluation of fifth-generation district heating and cooling networks under uncertain energy market conditions: A two-step robust design analysis approach / A. Mehmood et al // Energy. – 2024. – Vol. 311. – Art. 133334. https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133334. (in English).
7. Zakon Respubliki Kazakhstan ot 13 yanvarya 2012 goda № 541-IV «Ob ehnergosberezhenii i povyshenii ehnergoehffektivnosti» (s izm. i dop. po sostoyaniyu na 2024 g.). (in Russian).
8. Annex XI Final Report. Transformation Roadmap from High to Low Temperature District Heating Systems / H. Averfalk et al. – IEA District Heating and Cooling, 2017. (in English).
9. Pellegrini M. The Innovative Concept of Cold District Heating Networks: A Literature Review / M. Pellegrini, A. Bianchini // Energies. – 2018. – Vol. 11, №. 1. – Art. 236. https://doi.org/10.3390/en11010236. (in English).
10. Smart district heating / S. Buffa et al // Urban Energy Transition. – 2nd ed. – Elsevier, 2018. – P. 327-346. (in English).
11. Chicherin S. Justifying network reconstruction when switching to low temperature district heating / S. Chicherin, A. Starikov, A. Zhuikov // Energy. – 2022. – Vol. 248. – Art. 123593. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123593. (in English).
12. Research progress on the fifth-generation district heating system based on heat pump technology / Y. Gong et al // Journal of Building Engineering. – 2023. – Vol. 71. – Art. 106533. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106533. (in English).
13. The First 5th Generation District Heating and Cooling (5GDHC) System in Kazakhstan: Planning and Designing / S. Chicherin et al // Preprints. – 2024. – Art. 202411.0680. https://doi.org/10.20944/preprints202411.0680.v1. (in English).
14. ST RK 3838-2023. Ehnergeticheskii audit (ehnergoaudit). Trebovaniya k kompetentnosti ehnergoauditora. – Utv. prikazom Komiteta tekhnicheskogo regulirovaniya i metrologii MI RK ot 25.12.2023. (in Russian).
15. GOST 30494-2011. Zdaniya zhilye i obshchestvennye. Parametry mikroklimata v pomeshcheniyakh. – M.: Standartinform, 2013. (in Russian).
16. Nord N. Identifying key design parameters of the high-temperature district heating system for a new settlement / N. Nord, M.E. Qvistgaard, G. Cao // Energy Procedia. – 2016. – Vol. 95. – P. 425-432. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.09.050. (in English).
17. Li H. District heating and cooling systems – Future competition or complementarity? / H. Li, S. Svendsen // Energy Procedia. – 2013. – Vol. 42. – P. 1-10. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.11.001. (in English).
18. OECD. Clean Household Energy Consumption in Kazakhstan: A Roadmap. – Paris: OECD Publishing, 2020. https://doi.org/10.1787/551f0613-en. (in English).
19. Asian Development Bank. A Guide to Developing Master Plans for Sustainable Heating in Kazakhstan. – Manila: ADB, 2023. (in English).
20. Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan. Natsional'nyi doklad po ehnergosberezheniyu i ehnergoehffektivnosti v Respublike Kazakhstan za 2023-2024 gg. – Astana, 2025. (in Russian).

Н.К. Ердыбаева*, Ж.Р. Баденова
Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті,
070000, Қазақстан Республикасы, Өскемен қаласы, Серікбаев көшесі, 19
*e-mail: nyerdybayeva@mail.ru

ШЫҒЫС ҚАЗАҚСТАН ОБЛЫСЫНЫҢ ОРТАЛЫҚТАНДЫРЫЛҒАН ЖЫЛУМЕН ЖАБДЫҚТАУ ЖҮЙЕЛЕРІНДЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛДЫ ЖЫЛУ ЖЕЛІЛЕРІНІҢ ТИІМДІЛІГІН БАҒАЛАУ

Мақалада Шығыс Қазақстан облысы мысалында орталықтандырылған жылумен жабдықтау жүйелерінде интеллектуалды жылу желілерін (Smart Heating Network, SHN) енгізу тиімділігін бағалаудың кешенді тәсілі ұсынылған. Зерттеу нысаны ретінде тозу деңгейі жоғары және жылу шығындары айтарлықтай болатын «Шығыс Жылу» АҚ жылумен жабдықтау жүйесі қарастырылған. Құбыр желілерінің жай-күйі, гидравликалық және температуралық режимдер талданып, жылу энергиясын тасымалдаудағы тиімсіздіктің негізгі себептері анықталды. Цифрлық датчиктерді, автоматтандырылған жылу пункттерін және болжамды басқаруды пайдалануға негізделген SHN

енгізу тұжырымдамасы ұсынылды. SHN қолдану жылумен жабдықтау режимдерін өзгермелі жүктемелерге бейімдеуді, жылу шығындарын азайтуды және жүйенің тиімділігін арттыруды қамтамасыз ететіні анықталды. Цифрлық шешімдерді енгізудің техникалық-экономикалық негізділігі дәлелденді. Интеллектуалды басқаруды интеграциялау жылу энергиясын 15–30% үнемдеуге мүмкіндік беретіні көрсетілді. Жұмыстың практикалық маңызы жылумен жабдықтау жүйелерін жаңғырту бойынша ұсынымдар әзірлеуде көрінеді.

Түйін сөздер: *интеллектуалды жылу желілері; энергоаудит; жылу шығындары; орталықтандырылған жылумен жабдықтау; энергия тиімділігі; цифрландыру.*

N.K. Yerdybayeva[1]*, Zh.R. Badenova[2]
[1]D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University,
070000, Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk, Serikbayev Street, 19
*e-mail: nyerdybayeva@mail.ru

ASSESSMENT OF THE EFFICIENCY OF INTELLIGENT HEATING NETWORKS IN DISTRICT HEATING SYSTEMS OF EAST KAZAKHSTAN REGION

The article presents a comprehensive approach to assessing the efficiency of implementing intelligent heating networks (Smart Heating Network, SHN) in district heating systems using the East Kazakhstan region as a case study. The object of the study is the heat supply system of JSC «Shygys Zhylu», characterized by a high level of infrastructure wear and significant heat losses. The condition of pipelines, as well as hydraulic and temperature regimes, were analyzed, and the main causes of inefficiencies in heat energy transportation were identified. A concept for implementing SHN based on the use of digital sensors, automated heat substations, and predictive control is proposed. The results show that the application of SHN ensures adaptation of heat supply modes to variable loads, reduction of heat losses, and improvement of system efficiency. The technical and economic feasibility of implementing digital solutions is substantiated. It is demonstrated that the integration of intelligent control allows achieving heat energy savings of 15-30%. The practical significance of the study lies in the development of recommendations for the modernization of district heating systems.

Key words: *intelligent heating networks; energy audit; heat losses; district heating; energy efficiency; digitalization.*

Сведения об авторах

Жанар Рамазановна Баденова – докторант по специальности «Теплоэнергетика», Школа архитектуры, строительства и энергетики, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск; e-mail: janara1993m@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-7326-1714.

Назгуль Кадырбековна Ердыбаева* – доктор физико-математических наук, Школа архитектуры, строительства и энергетики, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск; e-mail: nyerdybayeva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0314-0503.

Авторлар туралы мәліметтер

Жанар Рамазановна Баденова – «Жылу энергетикасы» мамандығы бойынша докторант, Сәулет, құрылыс және энергетика мектебі, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.; e-mail: janara1993m@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-7326-1714.

Назгуль Кадырбековна Ердыбаева* – физика-математика ғылымдарының докторы, Сәулет, құрылыс және энергетика мектебі; Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.; e-mail: nyerdybayeva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0314-0503.

Information about the authors

Zhanar Ramazanovna Badenova – doctoral student in Heat Power Engineering, School of Architecture, Civil Engineering and Energy, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan; e-mail: janara1993m@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-7326-1714.

Nazgul Kadyrbekovna Yerdybayeva* – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, School of Architecture, Civil Engineering and Energy, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan; e-mail: nyerdybayeva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0314-0503.

Поступила в редакцию 07.04.2026
Поступила после доработки 18.08.2026
Принята к публикации 02.09.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-71

CC BY 4.0
Check for updates

ҒТАХР: 58.91.29, 58.29.37

Н.Е. Мухамедов[1,2], О. Өкен[1], С.А. Должиков[1,2], Д.М. Секен[1,2*], А.З. Райко[1]
[1]ҚР ҰЯО РМК Атом энергиясы институтының филиалы,
180010, Қазақстан Республикасы, Курчатов қ., Бейбіт атом көшесі, 10.
[2]Шәкәрім университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинки к-сі, 20 А
*e-mail: seken@nnc.kz

ЦЕМЕНТ КОМПАУНДЫН ҚАУІПСІЗ КОНДИЦИОНЕРЛЕУ ҮШІН ОНЫ ҚАТТЫ РАДИОАКТИВТІ ҚАЛДЫҚ ИМИТАТОРЫМЕН ТОЛТЫРУДЫҢ ОҢТАЙЛЫ ДӘРЕЖЕСІН АНЫҚТАУ

Аңдатпа: *Қатты радиоактивті қалдықтарды қауіпсіз кондиционерлеу және ұзақ мерзімді сақтау үшін тұрақты қалдық формаларын алу атом энергетикасы объектілерін пайдаланудан шығару кезіндегі маңызды міндеттердің бірі болып табылады. Осы жұмыстың мақсаты БН-350 реакторын пайдаланудан шығару кезінде пайда болатын қатты радиоактивті қалдықтарды модельдейтін имитаторды пайдалана отырып, цемент матрицасын толтырудың оңтайлы дәрежесін анықтау болды. Зерттеу барысында құрамында 15, 25 және 40 мас.% қатты радиоактивті қалдық имитаторы бар цемент компаундтары дайындалды. Үлгілердің физикалық-механикалық қасиеттерін бағалау үшін микроқаттылық, сығымдау кезіндегі беріктік шегі және бұзылу сипаты зерттелді. Нәтижелер имитатор мөлшерінің цемент компаундтарының құрылымдық жай-күйі мен механикалық сипаттамаларына елеулі әсер ететінін көрсетті. Микроқаттылық пен сығымдау кезіндегі беріктіктің ең жоғары мәндері имитатор құрамы 15 мас.% болған жағдайда анықталды, бұл цемент матрицасының неғұрлым біртекті және берік құрылымының қалыптасуымен түсіндіріледі. Имитатор құрамын 25 мас.%-ға дейін арттыру механикалық қасиеттердің белгілі бір төмендеуіне әкелгенімен, олардың мәндері радиоактивті қалдықтардың цементтелген түрлеріне қойылатын талаптарға сәйкес деңгейде сақталды. Ал 40 мас.% имитатор кезінде цемент компаундының құрылымдық тұтастығы мен механикалық беріктігінің айтарлықтай төмендеуі байқалды. Алынған нәтижелер қатты радиоактивті қалдықтарды иммобилизациялауға арналған цемент матрицаларының құрамын оңтайландыру және оларды кондиционерлеу технологияларының тиімділігін арттыру үшін пайдаланылуы мүмкін.*

Түйін сөздер: *қатты радиоактивті қалдықтар, радиоактивті қалдықтарды кондиционерлеу, цемент матрицасы, сығымдау кезіндегі беріктігі, физикалық-механикалық қасиеттері.*

Кіріспе

Атом энергетикасын дамыту ядролық қондырғыларды пайдалану және пайдаланудан шығару процесінде металл конструкцияларын, бетонды, жылу оқшаулағыш материалдарды, технологиялық жабдықтарды және радионуклидтермен ластанған басқа да материалдарды қамтитын қатты радиоактивті қалдықтардың (ҚРҚ) едәуір көлемінің пайда болуымен сүйемелденеді. Мұндай қалдықтармен қауіпсіз жұмыс істеу ядролық және радиациялық қауіпсіздікті қамтамасыз етудің негізгі элементтерінің бірі және оларды халықаралық талаптар мен қауіпсіздікті қамтамасыз ету қағидаттарына сәйкес қайта өңдеуді, кондиционерлеуді, сақтауды және кейіннен көмуді көздейді [1-4].

ҚРҚ-ны кондиционерлеудің ең кең қолданылатын технологияларының бірі цементтеу, ол технологиялық қарапайымдылығымен, экономикалық тиімділігімен, жоғары химиялық тұрақтылығымен және радиоактивті қалдықтарды монолитті матрицада сенімді түрде бекіту қабілетімен сипатталады [5-8]. Цемент компаундтарының механикалық беріктігі жеткілікті, радионуклидтердің көшуін шектейді және радиоактивті қалдықтарды тасымалдау, сақтау және түпкілікті көму кезінде қаптаманың тұтастығын сақтауды қамтамасыз етеді [3, 7-8].

Цементтеу технологиясының маңызды параметрлерінің бірі цемент матрицасын қалдықтармен (waste loading) толтыру дәрежесі. Қалдықтардың құрамын арттыру ҚРҚ-ны қосу

©Н.Е. Мухамедов, О. Өкен, С.А. Должиков, Д.М. Секен, А.З. Райко, 2026

коэффициентін арттыруға, цемент байланыстырғышының шығысын азайтуға және ұзақ уақыт сақтауға және көмуге бағытталған кондиционерленген қалдықтардың жалпы көлемін азайтуға мүмкіндік береді. Алайда толтыру дәрежесін арттыру цемент тасы мөлшерінің азаюымен қатар жүреді, бұл кеуектіліктің өсуіне, толтырғыш пен цемент матрицасы арасындағы фазааралық өзара әрекеттесудің нашарлауына, компаунд тығыздығының, микроқаттылығы мен механикалық беріктігінің төмендеуіне әкелуі мүмкін үздіксіз негізгі құрылымның қалыптасуын қамтамасыз етеді [7-12].

Атом энергиясы жөніндегі халықаралық агенттіктің (МАГАТЭ) талаптарына сәйкес радиоактивті қалдықтардың кондиционерленген түрлері олардың өмірлік циклінің барлық сатысында қалдықтармен жұмыс істеу кезінде қауіпсіздікті қамтамасыз ететін қолайлы критерийлерді (Waste Acceptance Criteria) қанағаттандыруы тиіс [2-4]. Бұл ретте қаптаманың құрылымдық тұтастығын, механикалық беріктігін, химиялық тұрақтылығын және ұзақ уақыт сақталуын қоса алғанда, қалдықтардың түпкілікті түрінің физикалық және механикалық сипаттамаларына ерекше назар аударылады. Сонымен бірге МАГАТЭ-ның нормативтік құжаттары цемент матрицасын қалдықтармен толтырудың рұқсат етілген дәрежесінің әмбебап мәнін белгілемейді, өйткені ол қалдықтардың құрамымен, байланыстырушы қасиеттерімен және радиоактивті қалдықтармен жұмыс істеудің нақты жүйесіне қойылатын талаптармен анықталады.

Радиоактивті қалдықтарды иммобилизациялау үшін цемент матрицаларын жетілдіруге арналған көптеген зерттеулерге қарамастан, жарияланған жұмыстардың көпшілігі цемент тұтқыр құрамының, минералдық қоспалардың, гидратация процестерінің әсерін зерделеуге және компаундтардың ұзақ уақыттық химиялық беріктігін арттыруға бағытталған. Сонымен қатар цемент матрицасын талап етілетін физикалық-механикалық сипаттамаларды сақтай отырып, қалдықтардың максималды қосылуын қамтамасыз ететін қатты радиоактивті қалдықтармен толтырудың шекті дәрежесін анықтау мәселесіне айтарлықтай аз көңіл бөлінген. Бұл міндет күрделі морфологиялық және компоненттік құрамымен сипатталатын атом энергетикасы объектілерін пайдаланудан шығару кезінде пайда болатын қалдықтар үшін өзекті.

Нақты қатты радиоактивті қалдықтардың морфологиялық және компоненттік ерекшеліктерін жаңғыртатын радиоактивті емес имитаторларды пайдалану радиациялық шектеулерсіз кешенді эксперименттік зерттеулер жүргізуге және толтыру дәрежесіне байланысты цемент компаундтарының қасиеттерін өзгерту заңдылықтары туралы дұрыс деректер алуға мүмкіндік береді. Алынған нәтиже радиоактивті қалдықтармен жұмыс істеу жөніндегі халықаралық стандарттардың талаптарын қанағаттандыратын цемент компаундтарының ұтымды құрамын негіздеу үшін ғылыми негіз бола алады [6-12]. ҚР Ұлттық ядролық орталығында осы саладағы және жалпы атом энергиясын дамыту саласындағы зерттеулер 30 жылдан астам уақыт бойы жүргізіліп келе жатқанын атап өту маңызды [13-16].

Бұл жұмыстың мақсаты физикалық-механикалық сипаттамаларының радиоактивті қалдықтардың кондиционерленген түрлеріне қойылатын талаптарға сәйкестігін қамтамасыз ету үшін тығыздықты, микроқаттылықты және сығымдау кезінде беріктікті кешенді бағалау негізінде цемент компаундын қатты радиоактивті қалдық имитаторымен толтырудың оңтайлы дәрежесін анықтау.

Жұмыстың ғылыми жаңашылдығы цемент компаундын қатты радиоактивті қалдық имитаторымен толтыру дәрежесіне байланысты оның физикалық-механикалық қасиеттерінің өзгеруіндегі сандық заңдылықтарды белгілеу. Алғаш рет БН-350 реакторын пайдаланудан шығаруға тән қатты радиоактивті қалдықтардың құрамын жаңғыртатын имитатор үшін сығымдау кезінде тығыздықты, микроқаттылықты және беріктігін кешенді бағалау негізінде цемент матрицасын толтырудың оңтайлы дәрежесі эксперименттік түрде анықталды. Алынған нәтиже радиоактивті қалдықтардың кондиционерленген түрлеріне қойылатын талаптарға сәйкес келетін пайдалану сипаттамаларын сақтай отырып, қалдықтардың максималды жүктемесін қамтамасыз ететін имитатордың шекті рұқсат етілген құрамын ғылыми негіздеуге мүмкіндік береді.

Цемент компаундын қатты радиоактивті қалдық имитаторымен толтырудың шекті (оңтайлы) дәрежесі бар деп болжанады, бұл ретте цемент матрицасының физикалық-механикалық сипаттамаларын айтарлықтай нашарлатпай қалдықтарды қосудың максималды коэффициентіне қол жеткізіледі. Бұл мәннен асып кету цемент қаңқасының үздіксіздігінің

бұзылуына, кеуектіліктің артуына және цемент тасы мен толтырғыш бөлшектері арасындағы фазааралық өзара әрекеттестіктің әлсіреуіне әкеледі, бұл тығыздықтың, микроқаттылықтың және сығымдау кезінде беріктіктің жедел төмендеуімен бірге жүреді.

Материалдар мен әдістер

Осы зерттеуде цемент қоспасын дайындау үшін ГОСТ 31108-2020 [17] стандартының талаптарына сәйкес келетін Қазақстанда [16] өндірілген портландцемент қолданылды.

Толтырғыш ретінде БН-350 реакторын пайдаланудан шығару кезінде пайда болатын қалдықтардың морфологиялық және компоненттік құрамы негізінде әзірленген қатты радиоактивті қалдықтардың (ҚРҚ) радиоактивті емес имитаторы қолданылды (Ақтау қаласы, Қазақстан Республикасы). Имитаторды пайдалану радиациялық факторлардың әсерінсіз нақты ҚРҚ-ның физикалық сипаттамаларын жаңғыртуға мүмкіндік берді, бұл зертхана жағдайында зерттеулер жүргізуді қамтамасыз етті.

Зерттеу үшін қатты радиоактивті қалдық имитаторының құрамы 15, 25 және 40 мас.% болатын цемент компаунды дайындалды. Бақылау үлгісі ретінде имитатор қосылмаған цемент компаунды алынды.

Құрғақ компоненттер біртекті қоспаны алғанға дейін механикалық тәсілмен алдын ала араластырылады, содан кейін ерітпе судың есептік мөлшері біртіндеп құйылады.

Дайындалған қоспаны қалыптарға құйып, діріл әдісімен нығыздап, бөлме температурасында ұстайды. Қалыпты шешкеннен кейін үлгілер 21 тәулік ішінде (22 ± 1)°С-тық температурада және ауаның салыстырмалы ылғалдылығы 95%-дан кем емес қалыпты жағдайларда қатып қалады, бұл цементті гидратациялаудың негізгі процестерінің аяқталуын және цемент тасының тұрақты құрылымының қалыптасуын қамтамасыз етеді. Зерттелетін цемент компаундтарының құрамы 1-кестеде берілген.

Кесте 1 – Цемент компаундтарының құрамы

Үлгінің шартты белгісі	Химиялық құрамы, масс.%		
	Цемент матрицасы	Имитатор құрамы	Су
1	70	-	30
2	55	15	30
3	50	25	25
4	40	40	20

Цемент тасының жергілікті механикалық қасиеттері Виккерстің микроқаттылық әдісімен зерттелді. Өлшеулер ASTM E384 [18] халықаралық стандарты бойынша Qness 60M EVO микроқаттылық өлшегішінде бекітілген жүктеме 100 г және ұстау уақыты 10 с кезінде орындалды. Әрбір үлгінің бетінде көрінетін ақаулары бар аймақтарды және шеттік аудандарды қоспағанда, аудан бойынша біркелкі бөлінген кемінде он таңба түсірілді. Нәтижесіне микроқаттылықтың орташа арифметикалық мәні алынды.

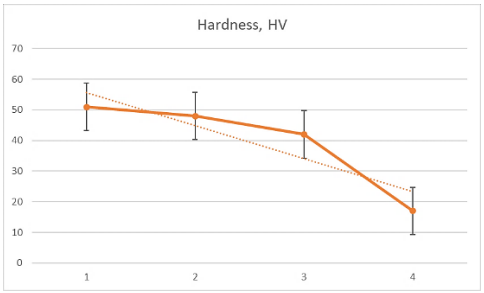
Сығымдау кезінде беріктігін сынау әмбебап сынау машинасында 21 тәулік қатайғаннан кейін жүргізілді. Жүктеме ASTM C39/C39M [19] сәйкес үлгінің толық бұзылуына дейін үздіксіз тұрақты жылдамдықпен салынды. Сығымдау кезіндегі беріктік шегі бұзылудың максималды жүктемесінің үлгінің көлденең қимасының ауданына қатынасы ретінде анықталады:

$$\sigma_c = F_{max}/A$$

мұндағы σ_c – сығымдау кезіндегі беріктік шегі, МПа; F_{max} – үлгі бұзылуы кезіндегі максималды жүктеме, Н; А – үлгінің көлденең қимасының ауданы, мм^2. Сығымдау сынақтарынан кейін цемент компаундтарының бұзылу бетіне визуалды талдау жүргізілді. Жарықтардың таралу сипаты, тұтастықтың сақталу дәрежесі бағаланды.

Зерттеу нәтижелері және талқылаулар

Микроқаттылық цемент тасының жергілікті механикалық қасиеттерін және оның құрылымының қалыптасу дәрежесін сипаттайтын ақпараттық параметрлердің бірі. Бұл көрсеткіштің өзгеруі қатты радиоактивті қалдық имитаторы құрамының макроскопиялық беріктікке сынақтар жүргізгенге дейін цемент матрицасының құрылымдық жай-күйіне әсерін бағалауға мүмкіндік береді. Микроқаттылықты анықтау нәтижелері 1-суретте берілген.

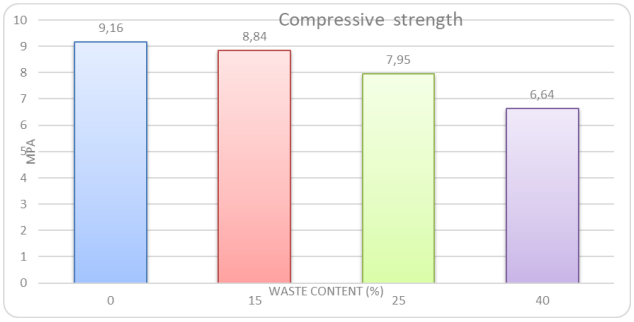


Сурет 1 – Микроқаттылық нәтижесі

ҚРҚ имитаторының құрамы цемент компаундтарының микроқаттылығына айтарлықтай әсер ететіні белгіленді. Имитатордың 15 мас.%-ын енгізу кезінде зерттелген құрамдар арасында микроқаттылықтың максималды мәні байқалады. Имитатор құрамын одан әрі 25 және 40 мас.%-ға дейін арттыру осы көрсеткіштің жүйелі төмендеуімен қатар жүреді.

Алынған нәтиже толтырғыштың мөлшері аз болған кезде имитатор бөлшектері цемент жүйесінің компоненттерін тығыз қаптауға және цемент тасының біртекті құрылымын қалыптастыруға ықпал ететінін көрсетеді. Сонымен қатар ҚРҚ имитаторлары дәрежесін арттыру гидратацияға қатысатын цемент тұтқыр үлесінің азаюына, цемент матрицасы мен толтырғыш бөлшектері арасындағы фазааралық шекаралар санының артуына, сондай-ақ жергілікті құрылымдық әртектіліктің қалыптасуына алып келеді. Нәтижесінде жергілікті пластикалық деформация материалының кедергісі төмендейді, бұл микроқаттылықтың төмендеуінен көрінеді.

Сығымдау кезіндегі беріктік шегі қатты радиоактивті қалдықтарды кондиционерлеуге арналған цемент компаундтарының пайдалану жарамдылығын бағалаудың негізгі критерийлерінің бірі. Сынақ нәтижелері 2-суретте берілген.



Сурет 2 – Сығымдау беріктігінің шегі

Микроқаттылық жағдайындағыдай қатты радиоактивті қалдық имитаторы құрамының өзгеруі цемент компаундтарының беріктігіне айтарлықтай әсер етеді. Сығымдау кезіндегі беріктік шегінің ең үлкен мәні имитатор құрамы 15 мас.% болған кезде алынады, бұл бақылау үлгісінің беріктігінен асып түседі. Толтырғыштың құрамын одан әрі 25-тен және 40 мас.%-ға дейін артыру беріктіктің біртіндеп төмендеуімен қатар жүреді.

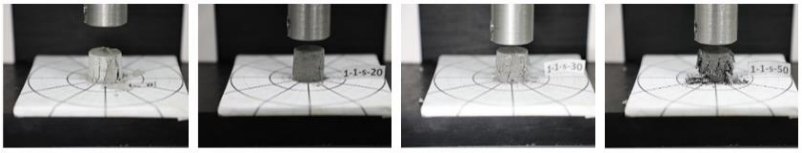
Құрамында 15 мас.% болғанда беріктікті арттыру дисперсті имитатор бөлшектерінің микротолымдылық әсеріне байланысты болуы мүмкін, олар цемент жүйесінің компоненттерін неғұрлым ұтымды қаптауға және ірі құрылымдық ақаулардың шоғырлануын төмендетуге ықпал етеді. Толтыру дәрежесі неғұрлым жоғары болған кезде үздіксіз көтергіш қаңқаның қалыптасуын қамтамасыз ететін цемент тұтқыр мөлшерінің азаюы байқалады, бұл фазааралық шекаралар санының артуымен және материалдың көлемі арқылы механикалық жүктемені беру тиімділігінің төмендеуімен қатар жүреді.

Анықталған заңдылық микроқаттылықты анықтау нәтижелерімен жақсы үйлесетінін атап өткен жөн. Цемент матрицасының жергілікті қаттылығының төмендеуі оның сыртқы жүктемеге кедергісінің азаюымен бірге жүреді, бұл сығымдау кезіндегі беріктік шегінің төмендеуіне алып келеді.

Алынған нәтиже цемент компаундын қатты радиоактивті қалдық имитаторымен толтырудың оңтайлы дәрежесінің бар екенін көрсетеді. Зерттелген құрамдардың ішінде

механикалық сипаттамалардың ең қолайлы үйлесіміне имитатор құрамы 15 мас.% болғанда қол жеткізіледі, ал толтыру дәрежесінің одан әрі артуы цемент тасының физикалық-механикалық қасиеттерінің нашарлауымен қатар жүреді.

Механикалық сынақтардың нәтижелерін растау үшін сығымдау сынақтарынан кейін цемент компаундтарының бұзылу сипатына талдау жүргізілді. Бұзылған үлгілердің фотосуреттері 3-суретте берілген.



Сурет 3 – Цемент компаундтарының бұзылу сипаты

Бақылау үлгісі мен қатты радиоактивті қалдық имитаторының құрамы 15 мас.% болатын үлгі материалының айқын қабатталуынсыз монолитті бұзылуымен сипатталады. Бұзылу магистральдық жарықтардың шектеулі санының пайда болуымен жүреді, бұл цемент матрицасының жеткілікті жоғары құрылымдық тұтастығын көрсетеді.

Имитатор құрамын 25 мас.%-ға дейін арттырған кезде қайталама жарықтар санының артуы және үлгілердің неғұрлым айқын фрагментациясы байқалады. Бұл құрылым біртектілігінің төмендеуін және қосымша кернеу концентраторларының пайда болуын көрсетеді.

Бұзылу сипатындағы ең айқын өзгерістер имитатор құрамы 40 мас.% болған кезде байқалады. Сынақтардан кейін үлгілер көптеген фрагменттерге ыдырайды, ал омырық беті көбірек әртекті болады. Мұндай беталыс толтыру дәрежесінің жоғары болуы және цемент тұтқыр үлесінің азаюы салдарынан цемент матрицасы байланыстылығының төмендеуін көрсетеді.

Бұзылу сипатын талдау микроқаттылығы мен сығымдау кезінде беріктігін анықтау нәтижелеріне толық сәйкес келеді. Қатты радиоактивті қалдық имитаторының құрамын арттыру цемент компаундының құрылымдық тұтастығының біртіндеп нашарлауымен қатар жүреді, ал толтырғыштың 15 мас.%-ын енгізу жергілікті және макроскопиялық механикалық сипаттамалардың неғұрлым қолайлы үйлесуін қамтамасыз етеді.

ҚОРЫТЫНДЫ

Бұл жұмыста қатты радиоактивті қалдықтарды кондиционерлеуге арналған цемент компаундтарының физикалық-механикалық қасиеттеріне қатты радиоактивті қалдық имитаторы құрамының әсері зерттелді. Цемент матрицасын толтыру дәрежесі әртүрлі болған кезде микроқаттылық, сығымдау кезіндегі беріктік шегі және үлгілердің бұзылу сипатын кешенді бағалау жүргізілді.

Қатты радиоактивті қалдық имитаторы құрамын арттыру цемент компаундтарының механикалық қасиеттеріне айтарлықтай әсер ететіні анықталды. Зерттелген құрамдардың ішінде микроқаттылық пен сығымдау кезіндегі беріктік шегінің ең жоғары мәндері имитатор құрамы 15 мас.% болғанда алынған, бұл неғұрлым берік және құрылымдық біртекті цемент матрицасының қалыптасуын көрсетеді. Имитатор құрамын 25 мас.%-ға дейін арттырған кезде механикалық сипаттамалардың біршама төмендеуі байқалады, алайда алынған мәндер радиоактивті қалдықтардың цементтелген түрлеріне қойылатын талаптарға сәйкес келетін деңгейде қалады. Толтыру дәрежесін одан әрі 40 мас.%-ға дейін арттыру микроқаттылық пен сығымдау кезінде беріктіктің айтарлықтай төмендеуіне әкеледі, сондай-ақ үлгілердің бұзылу сипатының өзгеруімен бірге жүреді, бұл цемент компаундының құрылымдық тұтастығының нашарлауын көрсетеді.

Алынған нәтиже зерттелген құрамдардың ішінде имитатор құрамы 15 мас.%-дық физикалық-механикалық сипаттамалардың ең қолайлы үйлесуін қамтамасыз ететінін, ал 25 мас.%-дық толтыру дәрежесі белгіленген талаптарды қанағаттандыратын деңгейде механикалық қасиеттерін сақтай отырып, иммобилизацияланатын қалдықтардың үлесін арттыруға мүмкіндік беретінін көрсетеді. Бұл иммобилизация технологиясының басымдықтарына – максималды механикалық беріктікке қол жеткізуге не пайдалану

сенімділігін сақтай отырып, толтыру дәрежесін арттыруға байланысты цемент компаундының құрамын таңдау мүмкіндігін көрсетеді.

Алынған нәтиже қатты радиоактивті қалдықтарды кондиционерлеу үшін цемент компаундының құрамдарын әзірлеу және оңтайландыру кезінде, сондай-ақ қалдықтарды иммобилизациялаудың механикалық беріктігі мен тиімділігіне қойылатын талаптарды ескере отырып, цемент матрицасын толтырудың ұтымды дәрежесін негіздеу кезінде пайдаланылуы мүмкін.

Әдебиеттер тізімі

1. International Atomic Energy Agency. Classification of Radioactive Waste // IAEA Safety Standards Series No. GSG-1. – Vienna: IAEA. – 2009.
2. International Atomic Energy Agency. Predisposal Management of Radioactive Waste // IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 5. – Vienna: IAEA. – 2009.
3. International Atomic Energy Agency. Disposal of Radioactive Waste // IAEA Safety Standards Series № SSR-5. – Vienna: IAEA. – 2011.
4. International Atomic Energy Agency. Development of Waste Acceptance Criteria for Low and Intermediate Level Radioactive Waste // IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-1.29. – Vienna: IAEA. – 2025.
5. Li J. Solidification of radioactive wastes by cement-based materials / J. Li, L. Chen, J. Wang // Progress in Nuclear Energy. 2021.– V.141. https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2021.103957.
6. Byeon J. Statistical analysis of effects of test conditions on compressive strength of cement solidified radioactive waste / J. Byeon, S. Park // Nuclear Engineering and Technology. – 2023. – № 55(3). – P. 876-883. https://doi.org/10.1016/j.net.2022.11.008.
7. Cementitious Materials for Nuclear Waste Immobilization / R.O. Abdel Rahman et al // Chichester: John Wiley & Sons. – 2015. https://doi.org/10.1002/9781118511992.
8. Abdel Rahman R.O. Toward Sustainable Cementitious Radioactive Waste Forms: Immobilization of Problematic Operational Wastes / R.O. Abdel Rahman, M.I. Ojovan // Sustainability. – 2021. – № 13(21). – 11992. https://doi.org/10.3390/su132111992.
9. Ojovan M.I. An Introduction to Nuclear Waste Immobilisation / M.I. Ojovan, W.E. Lee. – Elsevier, 2nd ed.: 2013. – ISBN 9780080993935.
10. Pilania R.K., Dube C.L. Matrices for Radioactive Waste Immobilization: A Review // Frontiers in Materials. – 2023. – Vol. 10. https://doi.org/10.3389/fmats.2023.1236470.
11. I,Luhar, S.Luhar, M.Abdullah, A.Sandu et.al. Solidification/Stabilization Technology for Radioactive Wastes Using Cement: An Appraisal // Materials. – 2023. – Vol.16(3). – https://doi.org/10.3390/ma16030954.
12. Advances in immobilization of radionuclide wastes by alkali-activated cement and related materials / Y. Zhu et al // Cement and Concrete Composites. – 2022. – Vol. 126. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104377.
13. Decommissioning of the BN-350 fast neutron reactor: history review and current status / N. Mukhamedov et al // Energies.– Vol. 18. – 2025. https://doi.org/10.3390/en18133486.
14. The BN-350 reactor decommissioning: quantitative analysis and prospects for solid radioactive waste management / N. Mukhamedov et al // Energies. – Vol. 18(17). – 2025. https://doi.org/10.3390/en18174651.
15. Sorption-thermal immobilization of salt-bearing liquid radioactive waste via spark plasma sintering of perlite / V. Baklanov et al // Nuclear Engineering and Design. – 2026. – Vol. 415. – Article 115051. https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2026.115051.
16. Semey Cement Plant. (n.d.). Production. https://semeycement.com/production/.
17. Federal Agency on Technical Regulating and Metrology. (2020). GOST 31108-2020. Common cements. Specifications. Standartinform.
18. ASTM International. (2022). ASTM E384-22: Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International. Retrieved from https://store.astm.org/e0384-22.html.
19. ASTM C39/C39M-26. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2026.

Алғыс

Бұл жұмыс Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитетінің қаржылық қолдауымен BR24993118 «Қатты радиоактивті қалдықтарды қайта өңдеу технологиясын таңдау және іске асыру негіздемесі бойынша ҒЗЖ» бағдарламалық-нысаналы қаржыландыру жобасы шеңберінде орындалды.

Н.Е. Мухамедов[1,2], О. Өкен[1], С.А. Должиков[1,2], Д.М. Секен[1,2*], А.З. Райко[1]
[1]Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК,
180010, Республика Казахстан, г. Курчатов, ул. Бейбіт атом, 10.
[2]Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А
*****e-mail: seken@nnc.kz

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ СТЕПЕНИ НАПОЛНЕНИЯ ЦЕМЕНТНОГО КОМПАУНДА ИМИТАТОРОМ ТВЕРДЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ ДЛЯ ИХ БЕЗОПАСНОГО КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ

Безопасное кондиционирование и долговременное хранение твердых радиоактивных отходов являются одной из важных задач при выводе из эксплуатации объектов атомной энергетики. Целью данной работы являлось определение оптимальной степени наполнения цементной матрицы с использованием имитатора твердых радиоактивных отходов, моделирующего отходы, образующиеся при выводе из эксплуатации реактора БН-350. В ходе исследования были изготовлены цементные компаунды, содержащие 15, 25 и 40 мас.% имитатора твердых радиоактивных отходов. Для оценки физико-механических свойств образцов были исследованы микротвердость, предел прочности при сжатии и характер разрушения. Полученные результаты показали, что содержание имитатора оказывает существенное влияние на структурное состояние и механические характеристики цементных компаундов. Наибольшие значения микротвердости и прочности при сжатии были получены при содержании имитатора 15 мас.%, что свидетельствует о формировании более однородной и прочной цементной матрицы. Увеличение содержания имитатора до 25 мас.% приводит к некоторому снижению механических свойств, однако их значения остаются на уровне, соответствующем требованиям, предъявляемым к цементированным формам радиоактивных отходов. При содержании имитатора 40 мас.% наблюдается существенное снижение механической прочности и ухудшение структурной целостности цементного компаунда. Полученные результаты могут быть использованы при оптимизации составов цементных матриц для иммобилизации твердых радиоактивных отходов и повышении эффективности технологий их кондиционирования.

Ключевые слова: *твердые радиоактивные отходы; кондиционирование радиоактивных отходов; цементная матрица; прочность при сжатии; физико-механические свойства.*

N. Mukhamedov[1,2], O. Oken[1], S. Dolzhikov[1,2], D.M. Seken[1,2*], A. Raiko[1]
[1]Branch of the Institute of Atomic Energy of the RSE NNC RK,
180010, Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Beybit Atom St. 10.
[2]Shakarim University, 071412, Republic of Kazakhstan, Semey, 20 A Glinka Street
*****e-mail: seken@nnc.kz

DETERMINATION OF THE OPTIMAL FILLING DEGREE OF A CEMENT COMPOUND WITH A SIMULANT OF SOLID RADIOACTIVE WASTE FOR RADIOACTIVE WASTE IMMOBILIZATION

Safe conditioning and long-term storage of solid radioactive waste are among the key challenges associated with the decommissioning of nuclear facilities. The aim of this study was to determine the optimal filling degree of a cement matrix using a solid radioactive waste simulant representing waste generated during the decommissioning of the BN-350 reactor. Cement compounds containing 15, 25, and 40 wt.% of the solid radioactive waste simulant were prepared and investigated. The physicomechanical properties of the samples were evaluated through microhardness measurements, compressive strength testing, and analysis of fracture behavior. The results demonstrated that the simulant content has a significant effect on the structural state and mechanical performance of the cement compounds. The highest values of microhardness and compressive strength were obtained for the composition containing 15 wt.% simulant, indicating the formation of a more homogeneous and mechanically durable cement matrix. Increasing the simulant content to 25 wt.% resulted in a moderate decrease in mechanical properties; however, the obtained values remained within the range required for cemented radioactive waste forms. At a simulant content of 40 wt.%, a substantial reduction

in mechanical strength and deterioration of the structural integrity of the cement compound were observed. The obtained results can be used for optimizing the composition of cement matrices intended for the immobilization of solid radioactive waste and for improving the efficiency of radioactive waste conditioning technologies.

Key words: *solid radioactive waste; radioactive waste immobilization; cement matrix; compressive strength; physicomechanical properties.*

Авторлар туралы мәліметтер

Нуржан Еролович Мухамедов – PhD, қауымдастырылған профессор, Қазақстан, ҚР ҰЯО РМК Атом энергиясы институты филиалының бөлім бастығы; e-mail: mukhamedov@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6672-180X.

Оспан Окен – Қазақстан, ҚР ҰЯО РМК Атом энергиясы институты филиалының инженері; e-mail: oken@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-5740-9331.

Сергей Александрович Должиков – Қазақстан, ҚР ҰЯО РМК Атом энергиясы институты филиалы зертханасының топ бастығы; e-mail: dolzhikov@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-9109-7767.

Дархан Мұқаметтоқтарұлы Секен* – Қазақстан, ҚР ҰЯО РМК Атом энергиясы институты филиалының инженері; e-mail: seken@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-8357-4212.

Анель Зиннуровна Райко – Қазақстан, ҚР ҰЯО РМК, Атом энергиясы институты филиалының инженері; e-mail: raiko@nnc.kz.

Сведения об авторах

Нуржан Еролович Мухамедов – PhD, ассоциированный профессор, начальник отдела, филиал Институт атомной энергии РГП НЯЦ РК, Казакстан; e-mail: mukhamedov@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6672-180X.

Оспан Окен – инженер, лаборатории перспективных материалов филиал Институт атомной энергии РГП НЯЦ РК, Казакстан; e-mail: oken@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-5740-9331.

Сергей Александрович Должиков – начальник группы лаборатории, филиал Институт атомной энергии РГП НЯЦ РК, Казакстан; e-mail: dolzhikov@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-9109-7767.

Дархан Мукаметтоктарулы Секен* – инженер, филиал Институт атомной энергии РГП НЯЦ РК, Казакстан; e-mail: seken@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-8357-4212.

Анель Зиннуровна Райко – инженер, филиал Институт атомной энергии РГП НЯЦ РК, Казакстан; e-mail: raiko@nnc.kz.

Information about the author

Nurzhan Mukhamedov – PhD, Associate Professor, Head of Department, Institute of Atomic Energy, RSE NNC RK, Kazakhstan; e-mail: mukhamedov@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6672-180X.

Ospan Oken – Engineer, Laboratory of Advanced Materials, Institute of Atomic Energy, RSE NNC RK, Kazakhstan; e-mail: oken@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-5740-9331.

Sergey Dolzhikov – Head of Laboratory Group, Institute of Atomic Energy, RSE NNC RK, Kazakhstan; e-mail: dolzhikov@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-9109-7767.

Darkhan Seken* – Engineer, Institute of Atomic Energy, RSE NNC RK, Kazakhstan; e-mail: seken@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-8357-4212.

Anel Raiko – Engineer, Institute of Atomic Energy, RSE NNC RK, Kazakhstan; e-mail: raiko@nnc.kz.

Редакцияға енуі 17.06.2026
Өңдеуден кейін түсуі 21.08.2026
Жариялауға қабылданды 24.08.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-72

МРНТИ: 29.17.19; 31.15.37; 27.35.49

О.А. Степанова, М.В. Ермоленко, А.А.Бектемисов*, А.Б. Касымов, Т.Н. Умыржан
Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А
*e-mail: anuar.bektemissov@icloud.com

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ПЛОТНОСТИ НАНОМАСЕЛ TiO_2/ПОДСОЛНЕЧНОЕ МАСЛО И ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ МОДЕЛИ PAK-CHO

Аннотация: *В работе исследована плотность наномасел TiO_2/подсолнечное масло при массовых концентрациях наночастиц 2, 4, 6 и 8 вес.% в температурном диапазоне 20-60 °C. Образцы готовили растворительно-дисперсионным методом: наночастицы TiO_2 вводили в систему подсолнечное масло-гексан, смесь перемешивали на магнитной мешалке, затем диспергировали ультразвуком в течение 30 мин при 30 % мощности и удаляли гексан на ротационном испарителе. Плотность определяли цифровым плотномером DIGIPOL-D50, для каждой температурной точки выполняли пять повторных измерений, что повышало надежность полученных результатов и позволяло оценить воспроизводимость эксперимента. Установлено, что увеличение массовой концентрации TiO_2 повышает плотность наномасла, тогда как рост температуры приводит к ее последовательному снижению. При 20 °C плотность возрастает от 917 кг/м^3 для 2 вес.% до 974 кг/м^3 для 8 вес.%. Такая закономерность объясняется большей собственной плотностью наночастиц TiO_2 по сравнению с базовым растительным маслом. Температурные зависимости описаны линейной регрессионной моделью $\rho = a + bT$, для образцов 6 и 8 вес.% коэффициент детерминации составляет $R^2 = 0{,}98462$. Сравнение с моделью Pak-Cho показало рост отклонения при увеличении содержания TiO_2: MAPE возрастает от 6 до 22%. Полученные данные могут быть использованы при проектировании теплообменных систем, где важны точные сведения о плотности рабочих жидкостей. Это особенно важно при выборе состава наномасла и прогнозировании его поведения в реальных условиях эксплуатации.*

Ключевые слова: *наномасло; TiO_2; подсолнечное масло; плотность; массовая концентрация; DIGIPOL-D50; Pak-Cho.*

Введение

Плотность является одной из ключевых теплофизических характеристик смазочных и теплоносительных жидкостей. Для наномасел этот параметр имеет особое значение, поскольку введение твердой дисперсной фазы изменяет массу единицы объема, влияет на расчет числа Рейнольдса, гидродинамического сопротивления, потерь давления и теплопереноса. Поэтому плотность наножидкости должна определяться экспериментально в том температурном и концентрационном диапазоне, в котором предполагается ее практическое применение.

В последние годы растительные масла рассматриваются как перспективная основа для биоразлагаемых смазочных и теплообменных сред. Cortes et al. [1] исследовали подсолнечное масло, модифицированное наночастицами SiO_2 и TiO_2, и показали применимость таких добавок для изменения реологических и трибологических характеристик биосмазки. Данная работа важна для обоснования выбора системы TiO_2/подсолнечное масло, однако температурная зависимость плотности в ней не была центральным объектом анализа.

Более непосредственное отношение к плотности растительных наножидкостей имеет работа Wanatasanappan et al. [2]. Авторы изучили кокосовое, соевое и пальмовое масла с гибридными наночастицами Al_2O_3-TiO_2 при массовых концентрациях 0,2; 0,4 и 0,6 % в диапазоне 30-60 °C. Было показано, что плотность уменьшается при повышении температуры и возрастает при введении наночастиц. При этом влияние температуры на изменение плотности оказалось более выраженным, чем влияние малых концентраций дисперсной фазы.

©О.А. Степанова, М.В. Ермоленко, А.А.Бектемисов, А.Б. Касымов, Т.Н. Умыржан, 2026

Oemar et al. [3] исследовали наножидкость TiO_2 на основе virgin coconut oil. Образцы с объемными концентрациями TiO_2 0,1; 0,3 и 0,5 % были изучены при 28, 40 и 100 °C, плотность определяли пикнометрическим методом. Авторы установили, что добавление TiO_2 повышает плотность базового масла, а максимальное увеличение наблюдается при наибольшем содержании наночастиц. Этот результат подтверждает определяющую роль плотной твердой фазы в формировании объемных свойств масляной нанодисперсии.

Для синтетических смазочных систем сходные закономерности показаны Puspitasari et al. [4] на примере моторного масла SAE 5W-30 с наночастицами Al_2O_3, TiO_2 и гибридной системой Al_2O_3-TiO_2. В работе определялись плотность, динамическая вязкость и теплопроводность наномасел, что подтверждает актуальность комплексного измерения термофизических свойств при разработке наномодифицированных смазочных материалов.

В исследовании Magaji et al. [5] рассмотрена био-масляная бинарная наножидкость Al_2O_3-TiO_2/palm kernel oil в диапазоне 30-60 °C. Авторы показали, что плотность как чистого растительного масла, так и наножидкости снижается при нагреве, для чистого palm kernel oil снижение плотности составило 2,48 %, а для 0,3 вес.% Al_2O_3-TiO_2/palm kernel oil – 2,89 %. Эти данные подтверждают, что температурное расширение базовой масляной фазы остается доминирующим фактором даже после введения оксидных наночастиц.

Следовательно, современные исследования 2020-2025 гг. показывают две устойчивые закономерности: введение оксидных наночастиц повышает плотность масляной среды, а увеличение температуры приводит к снижению плотности вследствие теплового расширения базовой жидкости. Вместе с тем данные по плотности наномасел TiO_2 именно на основе подсолнечного масла остаются ограниченными. Дополнительная сложность связана с тем, что образцы часто готовятся по массовой концентрации, тогда как классическая модель Pak-Cho использует объемную долю частиц. Это требует четкого указания единиц концентрации и осторожной интерпретации расчетных сравнений.

Цель настоящей работы состояла в экспериментальном определении плотности наномасел TiO_2/подсолнечное масло при массовых концентрациях 2, 4, 6 и 8 вес.% в диапазоне 20-60 °C, описании температурной зависимости линейной регрессионной моделью и оценке отклонения экспериментальных значений от расчетных значений, полученных по модели Pak-Cho.

Материалы и методы

Материалы

В качестве базовой жидкости использовали подсолнечное масло. Дисперсной фазой служили наночастицы диоксида титана TiO_2. Для снижения вязкости исходной масляной среды и облегчения распределения частиц применяли гексан как летучий растворитель. Были подготовлены четыре состава наномасла с массовыми концентрациями TiO_2 2, 4, 6 и 8 вес.%.

Массовую концентрацию наночастиц рассчитывали по выражению:

$$w = \frac{m_p}{m_p + m_{bf}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где w – массовая концентрация TiO_2, вес.%;

m_p – масса наночастиц TiO_2;

m_{bf} – масса базового подсолнечного масла.

При фиксированной массе базовой жидкости требуемую массу наночастиц определяли как:

$$m_p = \frac{w}{100 - w} \cdot m_{bf} \quad (2)$$

Такой способ расчета состава означает, что значения 2, 4, 6 и 8 % в настоящей работе являются массовыми процентами. Обозначение объемной концентрации для этих образцов не применяли.

Приготовление наномасел

Наномасла готовили растворительно-дисперсионным методом. На первом этапе расчетное количество TiO_2 вводили в смесь подсолнечного масла и гексана. Смесь перемешивали на магнитной мешалке до получения первичной суспензии. На втором этапе суспензию подвергали ультразвуковому диспергированию в течение 30 мин при 30%

мощности прибора. Ультразвуковая обработка использовалась для разрушения возможных агрегатов TiO_2 и повышения равномерности распределения частиц в масляной среде.

После диспергирования гексан удаляли на ротационном испарителе. Данная стадия обеспечивала отделение летучего растворителя и получение конечного наномасла TiO_2/подсолнечное масло без остаточного гексана. Подготовленные образцы далее использовали для определения плотности.

Методика приготовления наномасла TiO_2/подсолнечное масло и стадия удаления гексана на ротационном испарителе представлена на рисунке 1.

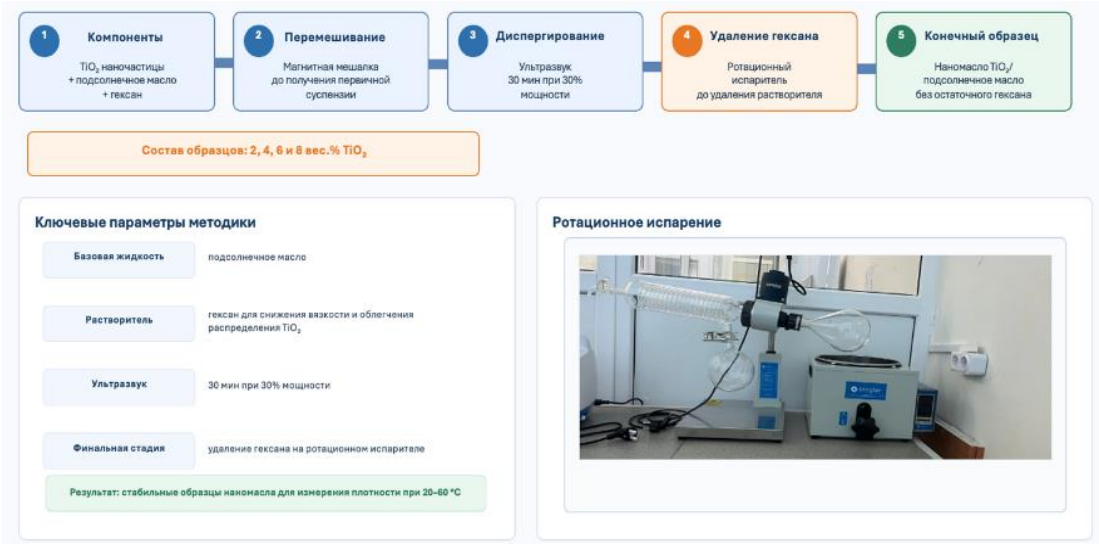


Рисунок 1 – Методика приготовления наномасла TiO_2/подсолнечное масло и стадия удаления гексана на ротационном испарителе

Измерение плотности

Плотность определяли на цифровом плотномере DIGIPOL-D50 (рис. 2). Прибор относится к автоматическим плотномерам, в которых плотность жидкости определяется по изменению периода колебаний измерительной U-образной трубки. Такой принцип позволяет регистрировать плотность малых объемов жидкости, а видеоконтроль измерительной ячейки используется для проверки отсутствия пузырьков воздуха в пробе [6].

Измерения выполняли при температурах 20, 30, 40, 50 и 60°C. Для каждой концентрации и каждой температурной точки проводили пять повторных измерений. Перед регистрацией значения образец выдерживали до стабилизации температурного режима, после чего фиксировали показания плотномера.



Рисунок 2 – Цифровой плотномер DIGIPOL-D50, использованный для определения плотности наномасел

Среднее значение плотности для каждой серии рассчитывали по формуле [7]:

$$\overline{\rho_{J,t}} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} \rho_{j,t,i} \quad (3)$$

где $\overline{\rho_{j,t}}$ – средняя плотность образца j при температуре T;

$\rho_{j,t,i}$ – результат i-го измерения; n = 5.

Разброс повторных измерений оценивали по стандартному отклонению [7]:

$$s_{j,t} = \frac{\sqrt{(\sum_{i=1}^{n}(\rho_{j,t,i} - \overline{\rho_{j,t}})^2}}{n-1} \quad (4)$$

Обработка данных и расчетные модели

Температурную зависимость плотности аппроксимировали линейным уравнением [7]:

$$\rho = a + bT \quad (5)$$

где ρ – плотность, кг/м^3;

T – температура, °C;

a – свободный член;

b – температурный коэффициент плотности.

Плотность наномасел TiO_2/подсолнечное масло определяли с использованием цифрового плотномера DIGIPOL-D50. Принцип работы цифровых плотномеров данного типа основан на измерении периода колебаний U-образной измерительной трубки, заполненной исследуемой жидкостью. При изменении плотности образца изменяется масса колебательной системы, что приводит к изменению периода её колебаний. В общем виде связь между плотностью жидкости и периодом колебаний измерительной ячейки может быть представлена следующим выражением [8]:

$$\rho_{nf} = \frac{T^2 - C_2}{C_1} \quad (6)$$

где ρ_{nf} – плотность наномасла, кг/м^3;

T – период колебаний измерительной ячейки плотномера, с;

C_1 и C_2 – калибровочные константы прибора.

В литературе аналогичный подход к оценке плотности масляных наножидкостей применяется при исследовании растительно-масляных нанолубрикантов. Так, Wang et al. [8] рассматривали наножидкости на основе растительных масел как перспективные смазочные среды и показали, что введение наночастиц позволяет изменять эксплуатационные характеристики базового масла. Эта работа подтверждает целесообразность использования растительных масел в качестве основы для получения наномодифицированных смазочных материалов.

Для теоретической оценки плотности наномасел в настоящей работе использовали корреляцию Pak-Cho, основанную на правиле смешения плотностей базовой жидкости и твёрдой дисперсной фазы [9]:

$$\rho_{nf} = \varphi\rho_p + (1-\varphi)\rho_{bf,} \quad (7)$$

где ρ_{nf} – расчётная плотность наномасла, кг/м^3;

ρ_p – плотность наночастиц TiO_2, кг/м^3;

ρ_{bf} – плотность базового подсолнечного масла, кг/м^3;

φ – объёмная доля наночастиц.

Расхождение между экспериментальными и расчётными значениями плотности оценивали по среднеквадратичной ошибке RMSE и средней абсолютной процентной ошибке MAPE [10, 11]:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1\sum_{i=1}^{N}(\rho_{exp,i} - \rho_{calc,i})^2}{N}}, \quad (8)$$

$$MAPE = \frac{100}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{\rho_{exp,i-\rho_{theory,i}}}{\rho_{exp,i}}\right|, \quad (9)$$

где $\rho_{exp,i}$ – экспериментальная плотность, кг/м^3;

$\rho_{calc,i}$ – плотность, рассчитанная по модели, кг/м^3;

N – число температурных точек.

Результаты

Экспериментальные значения плотности

На рисунке 3 представлена зависимость плотности наномасел TiO_2/подсолнечное масло от температуры при массовых концентрациях наночастиц 2, 4, 6 и 8 вес.%. Во всем исследованном температурном диапазоне увеличение массовой концентрации TiO_2 приводит к росту плотности. При 20°C плотность образца с 2 вес.% составляет 917 кг/м^3, тогда как для 8 вес.% она равна 974 кг/м^3. Следовательно, повышение концентрации TiO_2 с 2 до 8 вес.% увеличивает плотность на 57 кг/м^3.

Повышение температуры сопровождается снижением плотности всех исследованных образцов. Для наномасла с 8 вес.% TiO_2 плотность уменьшается с 974 кг/м^3 при 20°C до 947 кг/м^3 при 60 °C. Для образца с 6 вес.% снижение составляет 27 кг/м^3, для 4 вес.% – 22 кг/м^3. Образец с 2 вес.% демонстрирует небольшое повышение плотности в интервале 20-30 °C, однако при дальнейшем нагреве его плотность последовательно уменьшается до 900 кг/м^3.

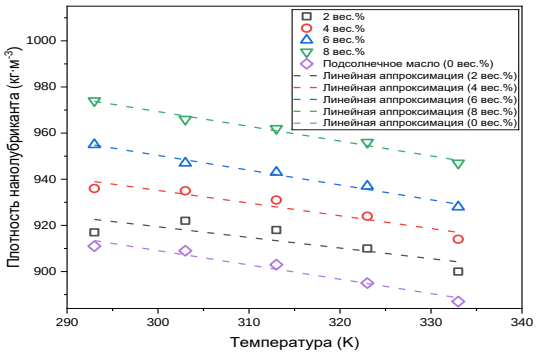


Рисунок 3 – Зависимость плотности наномасел TiO_2/подсолнечное масло от температуры при массовых концентрациях 2, 4, 6 и 8 вес.%

Линейная аппроксимация температурной зависимости

Для количественного описания снижения плотности с ростом температуры была применена линейная регрессионная модель $\rho = a + bT$. Коэффициенты регрессионного анализа представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Коэффициенты регрессионного анализа плотности наномасел TiO_2/подсолнечное масло в зависимости от температуры

Система	C(TiO_2), вес.%	T, °C	Модель	a, кг/м^3	b, кг/(м^3·°C)	R^2
Наномасло TiO_2/масло	2	20-60	$\rho = a + bT$	931,73	- 0,46	0,70722
Наномасло TiO_2/масло	4	20-60	$\rho = a + bT$	949,92	- 0,55	0,90569
Наномасло TiO_2/масло	6	20-60	$\rho = a + bT$	967,50	- 0,64	0,98462
Наномасло TiO_2/масло	8	20-60	$\rho = a + bT$	986,50	- 0,64	0,98462
Подсолнечное масло	-	20-60	$\rho = a + bT$	925,71	- 0,62	0,96100

Таблица 1 показывает, что для всех исследованных образцов коэффициент b имеет отрицательное значение, что подтверждает снижение плотности при повышении температуры. Для наномасел с концентрациями 2, 4, 6 и 8 вес.% значения b составили соответственно -0,46; -0,55; -0,64 и -0,64 кг/(м^3·°C). Для базового подсолнечного масла коэффициент наклона был равен -0,62 кг/(м^3·°C). Следовательно, в диапазоне 20-60 °C плотность исследованных образцов изменяется преимущественно по линейному закону.

Наиболее высокие значения коэффициента детерминации получены для наномасел с концентрациями 6 и 8 вес.% TiO_2, для которых R^2 = 0,98462. Это указывает на хорошее соответствие экспериментальных данных линейной модели. Для образца с концентрацией 4 вес.% значение R^2 составило 0,90569, что также подтверждает приемлемую точность аппроксимации. Более низкое значение R^2 = 0,70722 для образца с 2 вес.% может быть связано с большим разбросом экспериментальных точек при низкой концентрации наночастиц.

Сравнение с моделью Pak-Cho

Для количественной оценки расхождения между экспериментальными значениями плотности и расчетными значениями по модели Pak-Cho были рассчитаны RMSE и MAPE. В данной части анализа концентрация на оси графика указана как массовая концентрация TiO_2, поскольку именно так были приготовлены образцы (рис. 4). Показатели отклонения экспериментальных значений плотности от модели Pak-Cho представлены в таблице 2.

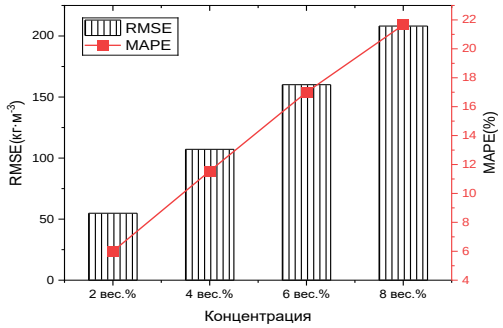


Рисунок 4 – Оценка отклонения экспериментальных значений плотности от расчетных значений по модели Pak-Cho для наномасел с различной массовой концентрацией TiO_2

Таблица 2 – Показатели отклонения экспериментальных значений плотности от модели Pak-Cho

Концентрация TiO_2, вес.%	RMSE, кг/м^3	MAPE, %
2	55	6
4	107	12
6	160	17
8	208	22

Значения ошибок возрастают с увеличением содержания TiO_2. Для концентрации 2 вес.% RMSE составляет 55 кг/м^3, а MAPE – 6 %. При увеличении концентрации до 8 вес.% эти показатели возрастают до 208 кг/м^3 и 22 % соответственно. Следовательно, простая модель смешения лучше согласуется с экспериментальными данными при низком содержании наночастиц и хуже описывает систему при повышенной массовой концентрации дисперсной фазы.

Обсуждение

Рост плотности при увеличении концентрации TiO_2 имеет физически ожидаемый характер. Плотность минеральной твердой фазы значительно выше плотности подсолнечного масла, поэтому увеличение массовой доли TiO_2 повышает массу единицы объема дисперсной системы. Эта закономерность сохраняется при всех исследованных температурах, что указывает на устойчивое влияние концентрационного фактора.

Снижение плотности при нагреве связано главным образом с тепловым расширением базового масла. Наличие TiO_2 повышает абсолютные значения плотности, однако не устраняет температурное расширение жидкой фазы. Поэтому для всех концентраций коэффициент наклона линейной зависимости отрицателен. Близкие значения коэффициента b для 6 и 8 вес.% указывают на сходную температурную чувствительность этих составов в диапазоне 20-60°C.

Более низкое качество линейной аппроксимации для 2 вес.% можно объяснить тем, что при малой концентрации вклад наночастиц в изменение плотности сравнительно невелик и становится сопоставимым с экспериментальным разбросом. Небольшое отклонение в области 20-30 °C не изменяет общего вывода о снижении плотности при повышении температуры.

Увеличение ошибки модели Pak-Cho при переходе от 2 к 8 вес.% связано с ограничениями правила идеального смешения. Модель не учитывает агломерацию частиц, межчастичные взаимодействия, формирование межфазного слоя на поверхности TiO_2 и возможную неоднородность распределения частиц в масляной среде. Кроме того, классическая запись модели оперирует объемной долей частиц, тогда как

экспериментальные образцы задавались по массе. Поэтому для последующего уточнения расчетов необходимо явно пересчитывать массовую долю в объемную с учетом плотности TiO_2 и плотности базового масла.

Заключение

В работе экспериментально определена плотность наномасел TiO_2/подсолнечное масло при массовых концентрациях 2, 4, 6 и 8 вес.% в температурном диапазоне 20-60°C. Увеличение массовой концентрации TiO_2 приводит к повышению плотности наномасла. При 20 °C плотность возрастает от 917 кг/м^3 для 2 вес.% до 974 кг/м^3 для 8 вес.%.

Повышение температуры вызывает снижение плотности всех исследованных образцов. Для состава 8 вес.% плотность уменьшается с 974 до 947 кг/м^3 при нагреве от 20 до 60 °C. Температурные зависимости плотности описываются линейными уравнениями с отрицательными коэффициентами наклона. Наиболее высокое качество аппроксимации получено для 6 и 8 вес.% TiO_2, где $R^2 = 0{,}98462$.

Сравнение с моделью Pak-Cho показало рост отклонения при увеличении концентрации TiO_2: MAPE возрастает от 6 % для 2 вес.% до 22 % для 8 вес.%. Это указывает на ограниченную применимость простой модели смешения при повышенном содержании наночастиц в масляной среде. Полученные данные могут быть использованы при расчете теплоофизических характеристик наномасел TiO_2/подсолнечное масло и выборе концентрационного диапазона для дальнейших исследований смазочных и теплообменных свойств таких систем.

Список литературы

1. The Performance of SiO2 and TiO2 Nanoparticles as Lubricant Additives in Sunflower Oil / V. Cortes et al // Lubricants. – 2020. – № 8(1). – P. 10. https://doi.org/10.3390/lubricants8010010.
2. Wanatasanappan V.V. Thermophysical Properties of Vegetable Oil-Based Hybrid Nanofluids Containing Al2O3-TiO2 Nanoparticles as Insulation Oil for Power Transformers / V.V. Wanatasanappan, M. Rezman, M.Z. Abdullah // Nanomaterials. – 2022. – № 12(20). – P. 3621. https://doi.org/10.3390/nano12203621.
3. Experimental Investigation on Thermophysical and Stability Properties of TiO2/Virgin Coconut Oil Nanofluid / B. Oemar et al // Science and Technology Indonesia. – 2023. – № 8(2). – P. 178-183. https://doi.org/10.26554/sti.2023.8.2.178-183.
4. Thermophysical properties of SAE 5W-30 lubricant with Al2O3, TiO2, and hybrid Al2O3/TiO2 nanomaterial using oleic acid surfactant on motorcycle performance / P. Puspitasari et al // PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON GREEN ENGINEERING & TECHNOLOGY 2022 (ICONGETECH 2022). https://doi.org/10.1063/5.0198587.
5. Experimental Investigations of a Bio-oil-Based Binary Nanofluid as a Heat Transfer Fluid in Solar Thermal Systems / I.K. Magaji et al // Jurnal Kejuruteraan. – 2025. – Vol. 37, № 8. – P. 3655-3672. https://doi.org/10.17576/jkukm-2025-37(8)-01.
6. DigiPol-D50/D70 Density Meter: technical specification and user manual for automatic U-tube density meters.
7. NIST/SEMATECH. e-Handbook of Statistical Methods. National Institute of Standards and Technology. https://doi.org/10.18434/M32189
8. Comparative evaluation of the lubricating properties of vegetable-oil-based nanofluids between frictional test and grinding experiment / Y. Wang et al // J. Manuf. Process. – 2017. – № 26. – P. 94-104. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.02.001.
9. Pak B.C. HYDRODYNAMIC AND HEAT TRANSFER STUDY OF DISPERSED FLUIDS WITH SUBMICRON METALLIC OXIDE PARTICLES / B.C. Pak, Y.I. Cho // Experimental Heat Transfer. – 1998. – № 11(2). – P. 151-170. https://doi.org/10.1080/08916159808946559.
10. Chai T. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? – Arguments against avoiding RMSE in the literature / T. Chai, R.R. Draxler, // Geosci. Model Dev. – 2014. – № 7. – P. 1247-1250. https://doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014.
11. Hyndman R.J. Another look at measures of forecast accuracy / R.J. Hyndman, A.B. Koehler // International Journal of Forecasting. – 2006. – Vol. 22, № 4. – P. 679-688. https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2006.03.001.

Сведения о финансировании

Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP26100207).

О.А. Степанова, М.В. Ермоленко, А.А. Бектемисов*, А.Б. Касымов, Т.Н. Умыржан
Шәкәрім университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қаласы, Глинка көшесі, 20А
*e-mail: anuar.bektemissov@icloud.com

TIO_2/КҮНБАҒЫС МАЙЫ НАНОМАЙЛАРЫНЫҢ ТЫҒЫЗДЫҒЫНЫҢ ТЕМПЕРАТУРАҒА ТӘУЕЛДІЛІГІ ЖӘНЕ PAK-CHO МОДЕЛІНІҢ ҚОЛДАНЫЛУ МҮМКІНДІГІН БАҒАЛАУ

Бұл жұмыста TiO_2 /күнбағыс майы негізіндегі наномайлардың тығыздығы нанобөлшектердің 2, 4, 6 және 8 масс.% концентрацияларында, 20-60°C температура аралығында зерттелді. Үлгілер еріткіш-дисперсиялық әдіспен дайындалды: TiO_2 нанобөлшектері күнбағыс майы–гексан жүйесіне енгізіліп, қоспа магниттік араластырғышта араластырылды, содан кейін 30% қуатта 30 минут бойы ультрадыбыспен диспергирленді, ал гексан ротациялық буландырғышта жойылды. Тығыздық DIGIPOL-D50 цифрлық тығыздық өлшегішімен анықталды. Әрбір температуралық нүктеде бес қайталама өлшеу жүргізілді, бұл алынған нәтижелердің сенімділігін арттырып, эксперименттің қайталанғыштығын бағалауға мүмкіндік берді. TiO_2 массалық концентрациясының артуы наномай тығыздығын жоғарылататыны, ал температураның жоғарылауы оның біртіндеп төмендеуіне әкелетіні анықталды. 20 °C температурада тығыздық 2 масс.% үшін 917 кг/м^3 мәнінен 8 масс.% үшін 974 кг/м^3 мәніне дейін өсті. Бұл заңдылық TiO_2 нанобөлшектерінің меншікті тығыздығы базалық өсімдік майымен салыстырғанда жоғары болуымен түсіндіріледі. Температуралық тәуелділіктер $\rho = a + bT$ сызықтық регрессиялық моделімен сипатталды; 6 және 8 масс.% үлгілері үшін детерминация коэффициенті $R^2 = 0{,}98462$ болды. Pak-Cho моделімен салыстыру TiO_2 мөлшері артқан сайын ауытқудың өсетінін көрсетті: MAPE 6%-дан 22%-ға дейін артты. Алынған деректер жұмыс сұйықтықтарының тығыздығы туралы нақты мәліметтер қажет болатын жылуалмастырғыш жүйелерді жобалауда қолданылуы мүмкін. Бұл наномай құрамын таңдауда және оның нақты пайдалану жағдайларындағы мінез-құлқын болжауда ерекше маңызды.

Түйін сөздер*: *наномай; TiO_2; күнбағыс майы; тығыздық; массалық концентрация; DIGIPOL-D50; Pak–Cho.

O.A. Stepanova, M.V. Yermolenko, A.A. Bektemissov*, A.B. Kassymov, T.N. Umyrzhan
Shakarim University,
071412, Republic of Kazakhstan, Semey, 20A Glinka St.
*e-mail: anuar.bektemissov@icloud.com

TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE DENSITY OF TIO_2/SUNFLOWER OIL NANO-OILS AND ASSESSMENT OF THE APPLICABILITY OF THE PAK-CHO MODEL

This study investigated the density of TiO_2/sunflower oil nano-oils at nanoparticle mass concentrations of 2, 4, 6, and 8 wt.% over a temperature range of 20-60°C. The samples were prepared using a solvent-dispersion method: TiO_2 nanoparticles were introduced into a sunflower oil–hexane system, mixed on a magnetic stirrer, then ultrasonically dispersed for 30 minutes at 30% power, and the hexane was removed using a rotary evaporator. Density was measured using a DIGIPOL-D50 digital density meter. Five repeated measurements were performed at each temperature point, which improved the reliability of the results and allowed the reproducibility of the experiment to be assessed. It was found that increasing the mass concentration of TiO_2 increased the density of the nano-oil, whereas increasing temperature led to a gradual decrease in density. At 20 °C, the density increased from 917 kg/m^3 for 2 wt.% to 974 kg/m^3 for 8 wt.%. This trend is explained by the higher intrinsic density of TiO_2 nanoparticles compared with the base vegetable oil. The temperature dependences were described using a linear regression model, $\rho = a + bT$; for the 6 and 8 wt.% samples, the coefficient of determination was $R^2 = 0.98462$. Comparison with the Pak–Cho model showed that the deviation increased with increasing TiO_2 content: MAPE rose from 6% to 22%. The obtained data can be used in the design of heat-exchange systems where accurate information on the density of working fluids is required. This is particularly important when selecting the nano-oil composition and predicting its behavior under real operating conditions.

***Key words:** nano-oil; TiO_2; sunflower oil; density; mass concentration; DIGIPOL-D50; Pak-Cho.*

Сведения об авторах

Ольга Александровна Степанова – кандидат технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Техническая физика и теплоэнергетика», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: aug11@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5221-1772.

Михаил Вячеславович Ермоленко – кандидат технических наук, ассоциированный профессор, старший преподаватель кафедры «Техническая физика и теплоэнергетика», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: tehfiz@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002- 1677-8023.

Ануар Алмасбекович Бектемисов* – научный сотрудник кафедры «Техническая физика и теплоэнергетика», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: anuar.bektemissov@icloud.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0364-4632.

Аскар Багдатович Касымов – PhD, Член правления-проректор по стратегии и социальному развитию, Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: askar.kassymov@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1983-6508.

Темірлан Нұрланұлы Умыржан – докторант образовательной программы 8D05302-«Техническая физика» кафедры «Техническая физика и теплоэнергетика», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: timirlan-95@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-9111-1975.

Авторлар туралы мәліметтер

Ольга Александровна Степанова – техника ғылымдарының кандидаты, профессор, «Техникалық физика және жылу энергетикасы» кафедрасының меңгерушісі, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: aug11@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5221-1772.

Михаил Вячеславович Ермоленко – техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, «Техникалық физика және жылу энергетикасы» кафедрасының аға оқытушысы, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: tehfiz@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1677-8023.

Ануар Алмасбекович Бектемисов* – «Техникалық физика және жылуэнергетика» кафедрасының ғылыми қызметкері, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: anuar.bektemissov@icloud.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0364-4632.

Аскар Багдатович Касымов – PhD, Басқарма мүшесі-стратегия және әлеуметтік даму жөніндегі проректор, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: askar.kassymov@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1983-6508.

Темірлан Нұрланұлы Умыржан – «Техникалық физика және жылу энергетикасы» кафедрасының 8D05302-«Техникалық физика» білім беру бағдарламасының докторанты, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: timirlan-95@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-9111-1975.

Information about the authors

Olga Aleksandrovna Stepanova – Candidate of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of «Technical Physics and Heat Power Engineering», Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: aug11@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5221-1772.

Mikhail Vyacheslavovich Yermolenko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Lecturer at the Department of «Technical Physics and Heat Power Engineering», Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: tehfiz@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1677-8023.

Anuar Almasbekovich Bektemissov* – Researcher, Department of Technical Physics and Heat Power Engineering; Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: anuar.bektemissov@icloud.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0364-4632.

Askar Bagdatovich Kassymov – PhD, Member of the Board - Vice-Rector for Strategy and Social Development, Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: askar.kassymov@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1983-6508.

Temirlan Nurlanuly Umyrzhan – doctoral student of the educational programme 8D05302-«Technical Physics» of the Department of «Technical Physics and Heat Power Engineering», Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: timirlan-95@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-9111-1975.

Поступила в редакцию 12.06.2026
Поступила после доработки 23.07.2026
Принята к публикации 24.07.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-73

МРНТИ: 44.31.31

BY 4.0
Check for updates

А.А. Генбач, Д.Ю. Бондарцев*, М.Д. Ерболатов
Алматинский университет энергетики и связи им. Г. Даукеева,
050013, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Байтурсынова 126/1
*e-mail: d.bondartsev@aues.kz

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПОКРЫТИЙ ИЗ ПРИРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ГОРЯЧИМ ДЕТОНАЦИОННЫМ МЕТОДОМ

Аннотация: *Исследованы предельные тепловые нагрузки для системы охлаждения с покрытиями из природных материалов в зависимости от избытка окислителя, характеристик термоинструмента и свойств природных материалов. Исследования имеют значение для материалов, работающих с оплавлением и без него (туф, мрамор). Выбран термоинструмент и условия наплавления порошка. Разработана вытеснительная схема питания термоинструмента и условия проведения эксперимента. Рассмотрены процессы деформации и разрушения покрытий методом голографии. Зафиксирована структура факела детонационной струи, коэффициент избытка окислителя на преграде меньше единицы и происходит дожигание горючего, до 6 раз интенсифицируется процесс напыления частиц. Удельные тепловые потоки на поверхности покрытия составляли (5÷12) МВт/м^2 по оси струи на расстоянии от среза сопла 4×10^{-2} м. Созданы экраны от детонационных высокотемпературных струй, препятствующие разрушению. Интерференционные линии равных деформаций диагностировали различные отклонения для покрытий из туфа и мрамора. Показано разрушение покрытия, в котором образовалась каверна размером 2,5×10^{-3} м за время 2,2 с при предельном тепловом потоке 1,2×10^6 Вт/м^2. Голографические исследования моделируют возможный процесс деградации покрытия и прогнозируют срок его службы.*

Ключевые слова: *теплообмен, природные материалы, покрытия, термоинструмент, деформация, голография.*

Введение

Проведено исследование покрытий из минеральных сред (гранит, кварцит и тешенит) при интенсивном тепломассопереносе вплоть до их предельного состояния (разрушения) [1]. Получены аналитические зависимости удельных тепловых потоков и удельной энергии разрушения от размера отрывающихся частиц и времени подачи тепла. Однако требуется дальнейшая разработка термоинструмента, подготовка материала для напыления с помощью сверхзвуковых высокотемпературных детонационных волн и исследования процессов деформации и разрушения покрытий.

В работе [2] проведена интенсификация процессов тепломассопереноса за счет их управления при совместном действии капиллярных и массовых сил. Изучался механизм процесса с помощью скоростной киносъёмки, однако в качестве покрытий использовались промышленные (металлургические) сетки, из которых формировались капиллярно-пористые структуры. Поэтому для покрытий из природных материалов потребуются другие способы их нанесения и другие научные методы исследования механизма протекающих процессов.

Исследование термомеханических напряжений применительно к минеральным средам для камер сгорания и сопел термоинструмента дано в работе [3]. Однако подготовка природного материала для напыления и изучения механизма процессов деформации и разрушения покрытий не производилось.

Изучались возможности расширения отвода критических (предельных) тепловых потоков в сетчатых покрытиях [2] и даны расчетные зависимости удельных тепловых нагрузок от режимных и конструктивных факторов, в том числе от внутренних (термогидравлических) характеристик. Однако получение покрытий путем нанесения порошка минеральной среды и изучение прочностных характеристик таких покрытий требуют специальных исследований. Особо отметим вклад в исследования чл. – корреспондента, доктора технических наук, профессора МГТУ им. Баумана Владимира Михайловича Поляева [1-4].

©А.А. Генбач, Д.Ю. Бондарцев, М.Д. Ерболатов, 2026

В современной технике находят применение монокристаллические никелевые суперсплавы [5-7] взамен покрытиям. Однако даже столь дорогим образцам свойственна термомеханическая усталость с отчетливой микроструктурной эволюцией. Изучались концентрации напряжения на кончике трещины, которая приводила к отказу образца от напряжения усталости.

В развитии монокристаллических образцов [5] разрабатываются термобарьерные покрытия [8-9] для создания систем защиты газовых турбин [10] для их работы при более высоких температурах газа [11]. Это требует значительных расходов для выявления новых материалов с лучшими характеристиками, чем отраслевой стандарт, стабилизированный иттрием циркония. Однако стратегия в разработке требует длительного эксперимента, интуитивных аргументов, основанных на кристаллографии и моделировании и не может быстро привести к разработке новых материалов. Поэтому природные материалы являются наиболее привлекательными и исследуются в данной работе.

Более того, монокристаллы [5-7] и термобарьерные покрытия [8-9, 11-12] приходится охлаждать потоком охладителя. Покрытия выполнены в виде толстых пленок, толщиной до 2×10^{-3} м из огнеупорного материала. Теплопроводность покрытия определяет падение температуры по всему объёму. Тем не менее, в ожидании более высоких температур, продолжается поиск новых термобарьерных покрытий [5, 8-12].

Таким образом, требуется исследовать процессы термического воздействия детонационного высокотемпературного сверхзвукового факела на природные материалы из минеральных сред (горных пород) таких как мрамор и туф. Необходимо разработать технику и технологию нанесения порошков материалов для создания покрытия на металлической подложке. Для познания механизма процессов деформаций и разрушений материалов будет использоваться метод голографической интерферометрии.

Научная новизна исследования состоит в том, что впервые произведена фиксация структуры детонационного факела за счет укороченного диффузора сопла Лаваля, что позволило значительно интенсифицировать процесс напыления, создать экраны от струй, препятствующих разрушению покрытий и качественно с помощью голографической интерферометрии диагностировать отклонения волн от покрытий, прогнозируя срок их службы. В известных методах не решен вопрос интенсификации напыления детонационного факела и защиты покрытий от генерирующих волн для создания термической устойчивости покрытий, изготавливаемых из природных материалов. Детонация получается с помощью гранул взрывчатых веществ.

Материалы и методы

Условия повторяемости испытаний (воспроизводство эксперимента) и число проведенных экспериментов проводились путем контроля толщины покрытия, которое обычно составляло до $(0{,}5\div1)\times10^{-3}$ м в зависимости от назначения покрытия и необходимости корректировки его путем обработки поверхности. При этом средняя высота микронеровностей составляла $R_z = 5\div10\times10^{-6}$ м. Частицы отбирались по крупности $(0{,}1\div0{,}5)\times10^{-3}$ м. Это позволяло создавать необходимую степень адгезии покрытия. Тепловые потоки измерялись теплоприемником, который состоит из медного цилиндра. Цилиндр с одной торца воспринимает действие газовой струи, а с другой - охлаждается водой. Боковые стенки цилиндра теплоизолированы.

В качестве изолятора используется керамика на основе диоксида циркония. В цилиндре размещены две хромель-копелевые термопары. На милливольтметр подается разность термо-ЭДС, показывающая перепад температур по длине цилиндра. Датчик вмонтирован в охлаждаемую преграду с площадью, превышающей пятно торможения всей газовой струи. При измерении тепловых потоков ведется контроль расходов горючего и окислителя и измеряется давление внутри камеры сгорания.

ЭДС термопар измерялись потенциометром класса точности 0,05.

Расходы охлаждающей и циркулирующей жидкости определялись электрическими ротаметрами типа РЭД с вторичным электронным прибором типа КСДЗ 43 кл. точность 1.

Наибольшая погрешность при измерении расхода жидкости ротаметрами не превышала ±3%.

Коэффициент проницаемости при обобщении опытных данных не превышал ±16%.

Невязка материального баланса между расходом охлаждающей жидкости и конденсата не превышала ±10%.

Максимальная относительная погрешность определения коэффициента теплоотдачи не превышала ±7%.

Максимальная относительная погрешность расчетного значения числа Стэнтона не превышала ±15%. Отклонение экспериментальных точек, которых было более ста, от расчётного уравнения находится в пределах ±20%.

Условия повторяемости испытания оценивались по состоянию материала покрытия после напыления, используя метод обобщения опытных данных по критериальному уравнению теплообмена. Проведено более ста опытов, которые обобщались через критерий теплообмена Стэнтона St, зависящий от числа Рейнольдса Re и геометрии теплообменной поверхности и покрытия (размер пор, толщины покрытия). Это дало достаточную точность (±20%) и повторяемость для многочисленных и целенаправленных результатов эксперимента.

Пористость покрытий составляет 50÷55%, проницаемость покрытий – $1{,}7\times10^{-12}$ м^2.Термоинструмент представляет собой горелку ракетного типа, которая имеет высокотемпературную сверхзвуковую пульсирующую детонационную струю (факел). Порошком служили частицы минеральной среды (туф, мрамор). Покрытия наносились на теплообменную поверхность из меди и нержавеющей стали при температуре факела до 2500÷3500 ^{0}С и скорости потока до 2500 м/с. Схема питания термоинструмента (рис. 1) – вытеснительная. Горючее – керосин. Окислитель – кислород. Система охлаждения – вода, пористые покрытия. Также применялась насосная система [3].

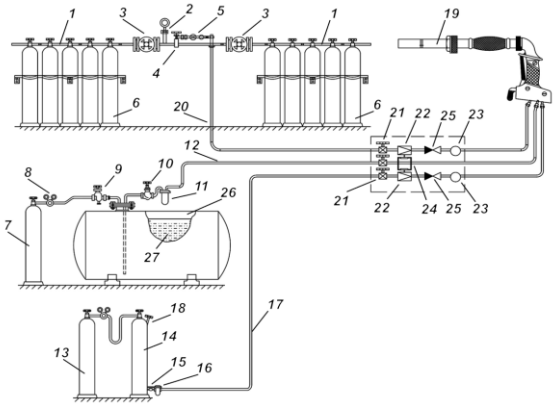


Рисунок 1 – Схема питания термоинструмента

На рисунке 1 приняты обозначения: 1 – коллектор; 2 – манометр; 3 – запорный вентиль коллектора; 4 – запорный вентиль отбора кислорода; 5 – рамповый редуктор; 6 – кислородный баллон; 7 – воздушный баллон; 8 – редуктор давления; 9 – трехходовой вентиль; 10 – запорный вентиль; 11 – водяной отстойник; 12 – водяной шланг; 13 – воздушный баллон; 14 – керосиновый баллон; 15 – запорный вентиль; 16 – керосиновый отстойник; 17 – керосиновый шланг; 18 – пробка; 19 – термоинструмент; 20 – кислородный шланг; 21 – запорные вентили; 22 – командные редукторы; 23 – фильтры; 24 – дроссельная шайба; 25 – обратные клапаны; 26 – воздух; 27 – вода.

Расход компонентов: кислорода при давлении 1,2÷1,5 МПа, 15÷18 м^3/ч; керосина при давлении 1,3÷1,5 МПа, 10÷12 кг/ч; давление подающего воздуха для транспорта порошка, МПа – 0,2÷0,4; расход порошка, г/мин – 5÷10; дистанция напыления, 10^{-2} м – 4÷12, для обеспечения удельных тепловых потоков на поверхности покрытия – 5÷12 МВт/м^2.

Размеры образцов и их геометрия описаны в [1-3]. Химический и минералогический состав природных материалов принимается по справочным данным.

Результаты

Вид спиновой (структурной) детонации в смеси продуктов сгорания керосин – кислород показан на рисунке 2. Поперечная скорость участка воспламенения определяется из наклона к образующей спирального следа, оставляемого волной. Угол наклона близок к 45 градусам, т.е. поперечная скорость близка к скорости детонации.

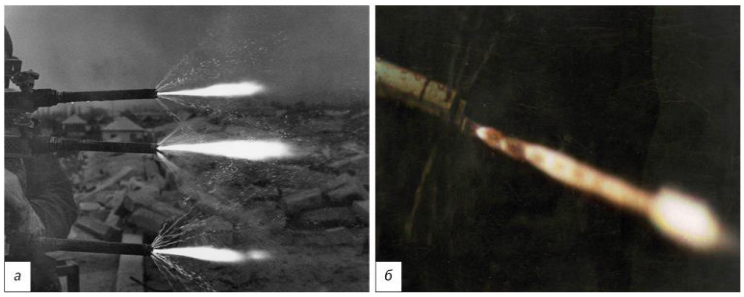


Рисунок 2 – Вид полигона с тремя работающими термоинструментами (*а*) и детонационного факела термоинструмента (*б*). Струи воды имеют технологическое значение

На рисунке 2, *б* – это поперечная волна за детонационным фронтом, периодически появляющаяся в виде световых вертикальных полос. Эту волну называют шлейфом. Она вращается вместе с воспламеняющимся участком фронта и близка к скорости детонации, т.е. почти вдвое превышает скорость звука в сгоревшем газе.

Такое возмущение не может быть простой акустической или ударной волной. На фотоснимке эта волна сделала семь полных оборота.

В наших исследованиях детонация проявляется не в трубке, а в стационарном потоке газа (в свободной струе). Это пример стационарного гидродинамического процесса с горением за ударной волной. Такой процесс устойчив и непрерывен.

Наблюдаемая периодичность воспламенения связана с отрывом области горения газа от факела ударной волны при его резком расширении, вызванном воспламенением [1].

В струе возможно явление пульсирующего горения подобно автоколебательным процессам в детонационных волнах.

Имеющее место задержка воспламенения от температуры приводит к неустойчивости схемы ударная волна – горение, т.к. в отдельных участках фронта ударной волны появляются местные воспламенения. Стабилизация горения пульсирующих волн имеет место за счет торможения газа на покрытии и в виде сверхзвукового потока смеси.

Переход горения в детонацию может проходить в процессах нестационарного горения газовых смесей. Физическая причина – взрыв адиабатически сжатой газовой смеси при формировании волн сжатия и ударных волн. Это происходит в неограниченном объёме смеси. Нестационарное адиабатическое сжатие газа вызывается ускорением сгорания при изменении формы поверхности пламени вследствие внутренней неустойчивости течения и внешней турбулизации потока перед пламенем.

Коэффициент избытка окислителя на преграде меньше единицы и происходит дожигание горючего, до 6 раз интенсифицируется процесс напыления частиц. О 6-кратной интенсификации процесса напыления судили по удельным тепловым потокам детонационного факела горелки, создаваемого специальным укороченным соплом горелки, которые сравнивались с обычным факелом. Интенсификация процессов обеспечивается не температурным уровнем покрытия, а плотностью теплового потока. В качестве численной оценки приводится величина q = (5÷12) МВт/м^2, полученная опытным путем.

Режимы возникновения детонации:

1. Увеличение скорости пламени приводит к адиабатическому взрыву смеси в волне сжатия (за счет укороченного сопла Лаваля), см. рисунок 2, *б*.

2. Образование детонации при отражении, созданной перед пламенем волны сжатия от капиллярно-пористого покрытия, аналогично опытам в ударных трубах.

Сопоставление с современными исследованиями по детонационному напылению и диагностике деформаций затруднительно, т.к. в наших исследованиях впервые детонация производится за счет конструкции сопла горелки, а в других работах используются гранулы взрывчатых веществ.

На рисунке 3 представлены частицы природного материала, полученные при обработке массива термоинструментом (рис. 2) для напыления их в виде порошка на теплообменную поверхность.

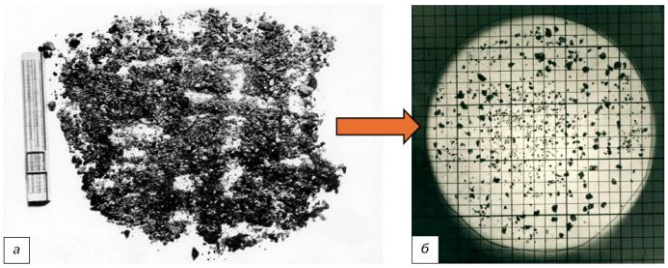


Рисунок 3 – Продукты разрушения, «шелуха» (*а*). Для напыления порошка на металлическую подложку частицы отбирались по крупности (*б*): $0{,}1\times10^{-3}$ м (2,9%); $0{,}25\times10^{-3}$ м (3,8%); $0{,}5\times10^{-3}$ м (7,1%) [3]

Среднеквадратичная шероховатость поверхности (средняя высота микронеровностей), 10^{-6} м, составляла $R_z = 5\div10$. Частицы отбирались по крупности $(0{,}1\div0{,}5)\times10^{-3}$ м (см. рисунок 3, *б*). Величина R_z, техника и технология (рис. 2, 3) создают необходимую степень адгезии покрытия.

На рисунке 4 показано взаимодействие струи с поверхностью обработки покрытия.

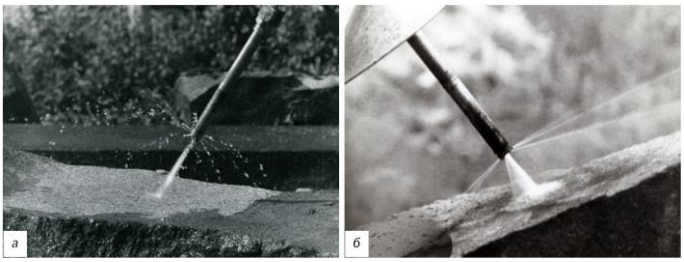


Рисунок 4 – Взаимодействие струи с поверхностью обработки покрытия. Сверхзвуковой высокотемпературный пульсирующий детонационный факел (*а*). Пятно растекания струи на поверхности с определенным радиусом и оптимальной длиной факела от среза сопла (*б*)

Теплотехнические характеристики капиллярно-пористых покрытий по сравнению с другими высокоинтенсивными системами охлаждения представлены в работе [3], которые в диапазоне $\Delta T = T_{ст.} - T_{н.}$ перепада температур (20÷80) К способны отводить удельные тепловые потоки от 2×10^6 Вт/м^2 (тешенитные покрытия) до 1×10^7 Вт/м^2 (кварцевые покрытия). Принято: ΔT – температурный напор (перегрев покрытий), К; $T_{ст.}$ – температура стенки (покрытия), К; $T_{н.}$ – температура насыщения, К.

Удельные тепловые потоки q на поверхности покрытия составляли (5÷12) МВт/м^2 для $r = 0$ и $l = (4\div12)\times10^{-2}$ м; (2÷5) МВт/м^2 для $r = 4\times10^{-2}$ м и $l = (4\div12)\times10^{-2}$ м. Принято: r – радиус пятна торможения на покрытии (радиус растекания струи, см. рисунок 4, *б*), м; l – расстояние от среза сопла (выходной части) горелки до покрытия, м (см. рисунок 4, *а*).

Обсуждение

Внимание читателя акцентируется на голографии, т.к. научная новизна исследования – в создании экранов от струй, препятствующих разрушению покрытий, что позволяет качественно диагностировать отклонения детонационных волн для покрытий. В противном случае, создав детонационные волны факела, не будет решена задача термической устойчивости покрытий из природных материалов.

Сведения о доверительных интервалах и статистической достоверности детально изложены в наших исследованиях [1-3], причем в работе [2] уделено внимание по обобщению внутренних (термогидравлических) характеристик теплообмена, когда покрытие входит в состав композитной системы охлаждения.

На покрытии происходит активный процесс кипения. Диагностика деформаций [1, 3] проведена прецизионным способом (голографией), который в практике еще не применяется.

Голографический стенд показан в работе [2]. Голографические интерферограммы (рис. 5, 6) получены методом «на отражение» в реальном масштабе времени и характеризуют механизм процесса в поверхностном слое образца, который можно рассматривать как покрытие массива, из объёма которого от одного (или трех) электрических источников поступает тепловой поток.

Интерференционные линии равных деформаций диагностировали различные отклонения. Они имели изломы, если в поверхностном слое образца обнаруживались дефекты, микро- и макротрещины, зародышевые микротрещины, инородные включения, например, газово-жидкие, дислокации, вызванные напряжением при тепловом расширении участка породного слоя. Голографические исследования [2] позволяют моделировать то, что следует ожидать в поведении натурных капиллярно-пористых структур, которым они подвергаются при тепловом воздействии. Появляется понимание и предсказание кинетики разрушения покрытия, моделирование возможного процесса деградации. Моделируется прогнозирование «жизни» покрытия, то есть срок его службы. Например, возможно избежать конструкторам термомеханического усталостного скола и растрескивания покрытия при термоциклировании.

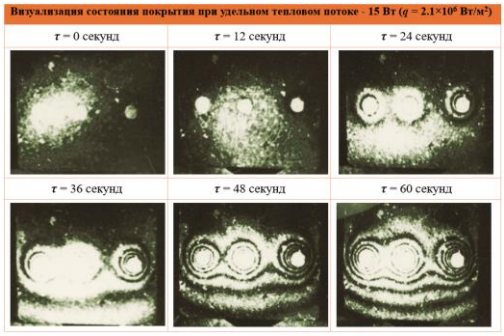


Рисунок 5 – Фотоснимки голографических интерферограмм покрытия из туфа

При нагреве образца электрическим источником, расположенном внутри (моделирование факела горелки, рис. 4), прилегающая часть покрытия нагревается, а другая ее часть будет иметь исходную температуру. Возникает градиент температуры и покрытие начинает расширяться неравномерно. Окружающие ненагретые части покрытия расширяются также неравномерно. Возникают термические напряжения из-за сопротивления окружающих частей расширению.

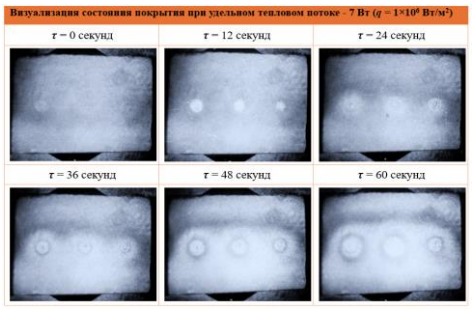


Рисунок 6 – Фотоснимки голографических интерферограмм покрытия из мрамора.

При нагревании поверхности возникающие напряжения всегда сжимающие. Прочность на сжатие на порядок выше прочности на растяжение и сдвиг, то разрушение вызывается последними напряжениями. Напряжения растяжения могут вызывать разрывы в покрытии в виде трещин, расположенных в плоскостях, перпендикулярных к ее поверхности (рис. 7). Такие трещины тормозят процесс термического разрушения («шелушения»), который состоит в отделении пластинок по плоскостям, параллельным поверхности покрытия. Также пластинки могут отделяться в результате деформации и сдвига.

На рисунке 7 показана фактура поверхности капиллярно-пористого покрытия, в которой образовалась каверна размером $2{,}5\times10^{-3}$ м за время 2,2 с при предельном тепловом потоке $1{,}2\times10^{6}$ Вт/м^2 [1, 3]. Механизм процесса разрушения (рис. 7) состоит в отделении пластинок по плоскостям, параллельным поверхности покрытия, с участием процессов деформации и сдвига. Поверхности образующихся «чешуек» имеют характерные сколы (срезы), вызываемые касательными напряжениями с образованием трещин, которые ориентированы в направлении максимальных касательных напряжений, что было изучено с помощью электронного микроскопа (рис. 3, *б*).

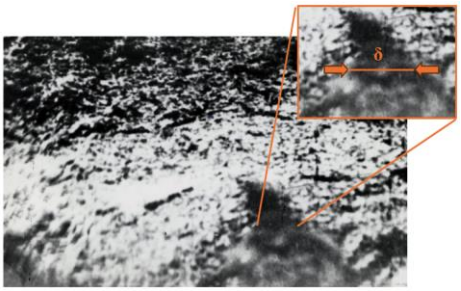


Рисунок 7 – Разрушение покрытия с каверной $\delta = 2{,}5\times10^{-3}$ м, образованной в результате нарушения теплового режима защиты

При достижении различными минералами, составляющими покрытие, определенных температур, от которых зависит физические свойства, в них происходят фазовые (полиморфные) превращения. При этом ряд физических свойств покрытий меняются скачком, и возникают дополнительные напряжения. При температуре 846 К β – кварц переходит в α – кварц.

Анализ голографических интерферограмм произведён качественно в связи с решением задачи научной новизны. Для других целей интерферограммы наряду с теорией термоупругости использовались для определения смещений, деформаций и напряжений [1-3].

Не проводились изображения покрытия и исследования по адгезионной прочности и термоциклической стойкости, т.к. проводилось обобщение теплообмена покрытия с факелом, которое дало достаточную точность и повторяемость многочисленных и целенаправленных результатов эксперимента [1, 3] и [2].

Для устойчивости покрытия к разрушению необходимо иметь небольшой градиент температур и высокий коэффициент теплопроводности, что обеспечит возможно тонкие «шелушки» в случае начала процесса разрушения. Необходимо стремиться использовать режим работы при температуре с минимальными значением коэффициента линейного расширения. Величина теплового потока, требующаяся для хрупкого разрушения, зависит от минералогического состава основы (скелета) покрытия, например наличие калиевого полевого шпата, плагиоклаза хлорита, эпидота и других минералов. Процесс разрушения может меняться от плавления до хрупкого разрушения. Тем более, состав тонкого покрытия на металлической подложке будет отличаться от массива (образца) породы, и зависеть от технологии его получения и нанесения, а само покрытие может иметь преднамеренное оплавление для подобранного режима термоинструмента.

Эффективность термической стойкости покрытия определяется содержанием хрупких и пластичных минералов. Изучение поверхностей «чешуек» с помощью электронного микроскопа (рис. 3, *б*) показало, что они имеют характерные поверхности скола (срезы), вызываемые касательными напряжениями и выражающегося в образовании трещин, ориентированных в направлении максимальных касательных напряжений.

В случае взрыва газово-жидких микровключений в минералах имеет место локальный отрыв. Механизм отделения «чешуек» путем скалывания происходит, когда напряжения сдвига зарождаются на некоторой глубине и от точки к точке выходят на поверхность (режим «шелушения»).

Исходя из описанных механизмов покрытие может шелушиться или плавиться. Добавка в покрытие оксидов циркония и оплавления покрытия существенно расширяет предел его термостойкости. Теплоустойчивость покрытия повышается в случае его охлаждения капиллярно-пористыми структурами, работающими в поле массовых и капиллярных сил [2]. Такие покрытия аналогичны плавящимся теплозащитным покрытиям типа оплавленным однородным стеклообразным материалам, которые получаются за счет работы режима термоинструмента, когда при $\alpha < 1$ догорание углерода горючего в детонационном режиме происходит на поверхности покрытия.

Длительная эксплуатация огнеструйных горелок проводится с 1980 г. на АЗОКе (Алматинском заводе по обработке камня). Минеральные крепчайшие горные породы не подвержены окислению и являются коррозионностойкими.

Заключение

Показано на голографических интерферограммах в реальном масштабе времени, что уменьшается вероятность развития трещин, идущих от отраженной волны. Созданы экраны от детонационных высокотемпературных струй, препятствующие разрушению. Рассмотрены процессы деформаций и разрушения покрытий. Интерференционные линии равных деформаций диагностировали различные отклонения для туфа и мрамора, моделировали возможный процесс деградации покрытий и прогнозировали срок их службы. Зарегистрирована спиновая детонация в смеси продуктов сгорания керосин-кислород, угол наклона близок к 45 градусам, что позволяет производить интенсивно напыления порошков без оплавления, а для вязких материалов – с оплавлением и даже плавлением их поверхности. Показано разрушение покрытия, в котором образовалась каверна размером $2{,}5\times10^{-3}$ м за время 2,2 с при предельном тепловом потоке $1{,}2\times10^{6}$ Вт/м^2. Описаны техника и технология измерений, оценка кл. точности приборов, схем измерения, конструкции измерительных устройств, приборов, расчеты погрешностей при измерении различных параметров, методика обобщения опытных данных по проницаемости и теплообмену покрытий, расчеты невязки при сведении материального и теплового балансов, вопросы аппроксимации, линеаризации, сравнения и обобщения критериальным уравнением процессов гидродинамики и теплопередачи, которые детально изложены в наших работах [1-3], причем в работе [2] уделено внимание по обобщению внутренних (термогидравлических) характеристик теплообмена.

Опираясь на голографические исследования подобное моделирование реальных покрытий поможет проектировщикам избежать термического скола и растрескивания покрытия при мало(много)-цикловой термической усталости материалов покрытий.

Эффективные для напыления порошка удельные тепловые потоки от детонационного факела на поверхности покрытия составляли (5÷12) МВт/м^2 по оси струи (r = 0) на расстоянии от среза сопла $(4\div12)\times10^{-2}$ м, которые в отличии от температурного уровня определяют интенсификацию процесса нанесения напыления. Для напыления порошка частицы отбирались по крупности: $0{,}1\times10^{-3}$ м (2,9%); $0{,}25\times10^{-3}$ м (3,8%); $0{,}5\times10^{-3}$ м (7,1%). Капиллярно-пористая система охлаждения отводила (2÷12) МВт/м^2 при поддержании устойчивого перепада температур, равного (20÷80) К.

Список литературы

1. Experimental studies of natural material-based coatings for thermal protection of metallic surfaces / A.A. Genbach et al // Journal of Materials Science: Materials in Engineering. – 2025. – Vol. 20. – P. 46. https://doi.org/10.1186/s40712-025-00252-5.

2. Boiling crisis in porous structures / A.A. Genbach et al // Energy. – 2022. – Vol. 259. – P. 125076. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125076.

3. Genbach A.A. Limiting thermal state of capillary-porous power-plant components / A.A. Genbach, D.Y. Bondartsev // Russian Engineering Research. – 2020. – Vol. 40. – P. 384-389. https://doi.org/10.3103/S1068798X20050093.

4. Polyaev V.M. Boiling of a liquid on surfaces with porous coatings / V.M. Polyaev, B.V. Kichatov // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2000. – Vol. 73. – P. 253-258. https://doi.org/10.1007/BF02681726.

5. Zhang J.X. Thermomechanical fatigue mechanism in a modern single crystal nickel base superalloy TMS-82 / J.X. Zhang, H. Harada, Y. Ro // Acta Materialia. – 2008. – Vol. 56. – P. 2975-2987. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2008.02.035.

6. Shajari Y. Investigation on mechanical properties of nickel open cell metal foam after heat treatment / Y. Shajari, L. Nikzad, M. Razavi // Scientific Reports. – 2023. – Vol. 13. – P. 16569. https://doi.org/10.1038/s41598-023-42857-w.

7. Sharifzadeh A.M. Experimental investigation of pool boiling heat transfer enhancement using electrodeposited open-cell metal foam / A.M. Sharifzadeh, H. Moghadasi, H. Saffari // International Journal of Thermal Sciences. – 2022. – Vol. 176. – P. 107536. https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2022.107536.

8. Liu B. Advances on strategies for searching for next generation thermal barrier coating materials / B. Liu, Y. Liu, C. Zhu // Journal of Materials Science & Technology. – 2019. – Vol. 35. – P. 833-851. https://doi.org/10.1016/j.jmst.2018.11.016.

9. Esmaeilkhanian A.H. Thermal barrier coating with improved durability: An overview of doped, nanostructured, multilayered, and gradient-structured zirconia-based thermal barrier coatings / A.H. Esmaeilkhanian // Materials Today Communications. – 2023. – Vol. 37. – P. 107514. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.107514.
10. Rajendran R. Gas turbine coatings – An overview / R. Rajendran // Engineering Failure Analysis. – 2012. – Vol. 26. – P. 355-369. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2012.07.007.
11. Clarke D.R. Thermal barrier coating materials / D.R. Clarke, S.R. Phillpot // Materials Today. – 2005. – Vol. 8. – P. 22-29. https://doi.org/10.1016/S1369-7021(05)70934-2.
12. Vaßen R. A Perspective on Thermally Sprayed Thermal Barrier Coatings: Current Status and Trends / R. Vaßen, E. Bakan, D.E. Mack // Journal of Thermal Spray Technology. – 2022. – Vol. 31. – P. 685-698. https://doi.org/10.1007/s11666-022-01330-2.

А.А. Генбач, Д.Ю. Бондарцев*, М.Д. Ерболатов
Ғ. Даукеев атындағы Алматы Энергетика және Байланыс Университеті,
050013, Қазақстан Республикасы, Алматы қаласы, Байтурсынұлы көшесі 126/1
*e-mail: d.bondartsev@aues.kz

ДЕТОНАЦИЯЛЫҚ ӘДІСПЕН АЛЫНҒАН ТАБИҒИ МАТЕРИАЛДАРДАН ЖАСАЛҒАН ЖАБЫНДАРДЫҢ ЖЫЛУЛЫҚ ТҰРАҚТЫЛЫҒЫН ГОЛОГРАФИЯЛЫҚ ЗЕРТТЕУ

Табиғи материалдардан жасалған жабындары бар салқындату жүйесінің шекті жылулық жүктемелері тотықтырғыш артығының коэффициентіне, жылу құралының сипаттамалары мен материал қасиеттеріне байланысты зерттелді. Зерттеулер бет балқуымен және онсыз жұмыс істейтін материалдарға (туф, мрамор) маңызды. Жылу құралы мен ұнтақты жалату шарттары таңдалды, жылу құралын қоректендірудің ығыстыру схемасы және эксперимент жүргізу шарттары әзірленді. Жабындардың деформациясы мен бұзылу үдерістері голография әдісімен қарастырылды. Детонациялық ағын алауының құрылымы тіркелді; кедергідегі тотықтырғыш артығының коэффициенті бірден аз, жанармайдың кейінгі жануы орын алды, бөлшектерді шашырату үдерісі 6 есеге дейін қарқындалды. Жабын бетіндегі меншікті жылулық ағындар сопло кесігінен 4×10^{-2} м қашықтықта ағын осі бойынша (5÷12) МВт/м² құрады. Бұзылудың алдын алатын жоғары температуралы детонациялық ағындардан қорғайтын экрандар жасалды. Тең деформациялардың интерференциялық сызықтары туф пен мрамор жабындарының әртүрлі ауытқуларын диагностикалады. Шекті жылулық ағын $1,2\times10^{6}$ Вт/м² кезінде 2,2 с ішінде өлшемі $2,5\times10^{-3}$ м каверна пайда болған жабынның бұзылуы көрсетілді. Голографиялық зерттеулер жабынның ықтимал деградация үдерісін модельдейді және оның қызмет мерзімін болжайды.

Түйін сөздер: *жылуалмасу, табиғи материалдар, жабындар, жылу құралы, деформация, голография.*

A.A. Genbach, D.Yu. Bondartsev*, M.D. Yerbolatov
Almaty University of Power Engineering and Telecommunications n.a. G. Daukeev,
050013, Republic of Kazakhstan, Almaty, Baitursynov str., 126/1
*e-mail: d.bondartsev@aues.kz

HOLOGRAPHIC INVESTIGATION OF THERMAL STABILITY OF COATINGS FROM NATURAL MATERIALS PRODUCED BY THE DETONATION METHOD

The limiting heat loads for a cooling system with natural material coatings were studied as a function of oxidizer excess ratio, thermal tool characteristics, and material properties. The study is applicable to materials operating with and without surface melting (tuff, marble). The thermal tool and powder deposition conditions were selected, and a displacement-type fuel supply scheme with corresponding experimental conditions was developed. Coating deformation and failure processes were analyzed by holography. The detonation jet flame structure was recorded; the oxidizer excess coefficient at the obstacle was below unity, causing fuel afterburning and up to 6-fold intensification of particle deposition. Specific heat fluxes at the coating surface reached (5÷12) MW/m² along the jet axis at 4×10^{-2} m from the nozzle exit. Protective screens against high-temperature detonation jets were developed to prevent coating failure. Equal-deformation interference fringes revealed differing deflections for tuff and marble coatings. Failure was demonstrated in a coating where a cavity of 2.5×10^{-3} m formed within 2.2 s at a limiting heat flux of 1.2×10^{6} W/m². Holographic studies simulate the potential coating degradation process and enable service life prediction.

Key words: *heat transfer, natural materials, coatings, thermal tool, deformation, holography.*

Сведения об авторах

Александр Алексеевич Генбач – д.т.н., проф., каф. «Теплоэнергетика и Физика», Алматинский университет энергетики и связи имени Г. Даукеева; e-mail: a.genbach@aues.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-3819-4387.

Давид Юрьевич Бондарцев* – PhD, проф. каф. «Теплоэнергетика и Физика», Алматинский университет энергетики и связи имени Г. Даукеева; e-mail: d.bondartsev@aues.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8778-7851.

Маулен Дүйсенбекұлы Ерболатов – докторант каф. «Теплоэнергетика и Физика», Алматинский университет энергетики и связи имени Г. Даукеева; e-mail: erbolatovmaulen@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-5202-6116.

Авторлар туралы мәліметтер

Александр Алексеевич Генбач – т.ғ.д., проф. каф. «Жылу энергетикасы және физика», Ғ. Даукеев атындағы Алматы Энергетика және Байланыс Университеті; e-mail: a.genbach@aues.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-3819-4387.

Давид Юрьевич Бондарцев* – PhD, проф. каф. «Жылу энергетикасы және физика», Ғ. Даукеев атындағы Алматы Энергетика және Байланыс Университеті; e-mail: d.bondartsev@aues.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8778-7851.

Маулен Дүйсенбекұлы Ерболатов – PhD докторанты каф. «Жылу энергетикасы және физика», Ғ. Даукеев атындағы Алматы Энергетика және Байланыс Университеті; e-mail: erbolatovmaulen@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-5202-6116.

Information about the authors

Alexander Genbach – d.t.s., prof. dep. «Thermal Power and Physics», Almaty University of Power Engineering and Telecommunications n.a. G. Daukeev; e-mail: a.genbach@aues.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-3819-4387.

David Bondartsev – PhD, prof. dep. «Thermal Power and Physics», Almaty University of Power Engineering and Telecommunications n.a. G. Daukeev; e-mail: d.bondartsev@aues.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8778-7851.

Maulen Duissenbekuly Yerbolatov – PhD student dep. «Thermal Power and Physics», Almaty University of Power Engineering and Telecommunications n.a. G. Daukeev; e-mail: erbolatovmaulen@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-5202-6116.

Поступила в редакцию 05.05.2026
Поступила после доработки 28.08.2026
Принята к публикации 02.09.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-74

IRSTI: 55.09.29

CC BY 4.0
Check for updates

D.R. Baizhan[1,3], Garip Erdogan[2], T. Alimbekuly[1,4*], N.S. Raisov[1], E.E. Birzhan[1]

[1]Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University,
070002, Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk, st. Shakarim, 148
[2]Sakarya University, 54050, Turkey, Sakarya
[3]Shakarim University, 071412, Kazakhstan, Semey, st. Glinki, 20A
[4]D. Serikbayev East Kazakhstan State Technical University,
070000, Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk, st. Serikbayev, 19
*e-mail: temirlanalimbekuly@gmail.com

EFFECT OF PLASMA HARDENING PARAMETERS ON 65G STEEL STRUCTURE AND PROPERTIES

Abstract: *This article presents a study of the effect of plasma hardening parameters on the structure and properties of grade 65G steel. The effectiveness of plasma treatment in obtaining a hardened surface layer through localized high-speed heating followed by self-cooling of the material was demonstrated. The studies were conducted at plasma arc currents ranging from 130 to 150 A and plasma-forming gas flow rates of 0.22-0.25 L/min, which made it possible to evaluate the influence of the technological parameters on the*

©D.R. Baizhan, Garip Erdogan, T. Alimbekuly, N.S. Raisov, E.E. Birzhan, 2026

characteristics of the resulting layer. The structural and phase composition were analyzed using X-ray diffraction and scanning electron microscopy, while the mechanical and tribological properties of the steel were evaluated using a hardness tester and a tribometer. A comparative study of the properties of 65G steel in the initial state and after plasma surface hardening was carried out. The obtained results indicate that plasma quenching promotes the formation of a gradient microstructure consisting of martensite and retained austenite, with a gradual transition to the initial structure of the material. The maximum microhardness of the hardened layer reaches 670-700 $HV_{0.1}$. At the same time, the wear rate of the treated layer decreases by 5-6 times compared to the initial state. The results of the study confirm the potential of plasma quenching as a method for surface hardening of 65G steel.

Key words: *plasma hardening, 65G steel, microstructure, microhardness, wear resistance.*

Introduction

In industry, plasma hardening is most widely used for hardening components of agricultural machinery, chemical, petrochemical, metallurgical, and other equipment. Unlike traditional heat treatment methods, plasma hardening enables localized hardening and increases process efficiency [1].

Particular interest is research examining the effect of plasma hardening on the hardening of plowshares made of 65G steel [2, 3]. This is because the working elements of tillage machines lose their functionality several times during their seasonal operation [4].

A number of studies have shown that plasma hardening leads to the formation of a martensitic structure, and a gradient-layered structure develops deeper into the hardened zone, characterized by sequential changes in structural components and microhardness in the range of 760-395 HV [2, 5]. It has been established that changing processing parameters (plasma arc current and plasma gas flow rate) significantly affects the hardened layer depth, phase composition, and residual stress level [6].

Despite significant research in the field of plasma hardening, the influence of plasma hardening parameters on the structure and properties of 65G steel has not been fully studied. A combination of parameters is required to ensure maximum zone depth and width, process efficiency, and no surface melting. Since plasma hardening does not cause deformation, parts can be immediately put into operation after processing without final grinding, reducing labor intensity and lowering the cost of the work.

Therefore, the objective of this study is to investigate the influence of plasma hardening parameters on the structure and properties of 65G steel in order to determine optimal processing conditions.

Materials and Methods

This study focused on samples of grade 65G steel. The chemical composition of the steel is shown in Table 1.

Table 1 – Chemical composition of grade 65G steel according to GOST 14959-2016 [7]

Steel	C,%	Si,%	Mn,%	Ni,%	S,%	P,%	Cr,%	Cu,%
65G	0.62- 0.7	0.17- 0.37	0.7-1	up to 0.15	up to 0.025	up to 0.025	up to 0.15	up to 0.2

Plasma hardening was performed using a UDGZ-200 system, which provides localized heating of the part surface using a plasma arc without the use of liquid quenching media [8]. To strengthen thin-walled parts that do not have sufficient mass, intensified cooling methods are used. The main plasma hardening parameters are presented in Table 2.

Table 2 – Plasma hardening parameters for 65G steel processing modes

Processing mode	Plasma arc current, A	Argon flow rate, L/min	Arc length, mm	Plasma torch travel speed, mm/s	Nozzle diameter, mm
PH1_65G	130	0.22	15-20	35-45	9
PH2_65G	150	0.25	15-20	35-45	9

Metallographic analysis of the samples was performed using an SEM3200 scanning electron microscope in BSE mode. Sections were etched in a 4% HNO_3 solution in ethyl alcohol. Microhardness measurements using the Vickers method under a load of 0.98 N (100 g) were performed on a Metolab 502 hardness tester in the cross section of grade 65G steel.

An X'PertPRO X-ray diffractometer using CuKα radiation was used to study the phase composition. The images were taken under the following parameters: tube voltage U = 40 kV; tube current I = 30 mA; Exposure time 0.25 s; shooting step 0.02°. Diffraction patterns were interpreted using HighScore software and the PDF-2 database.

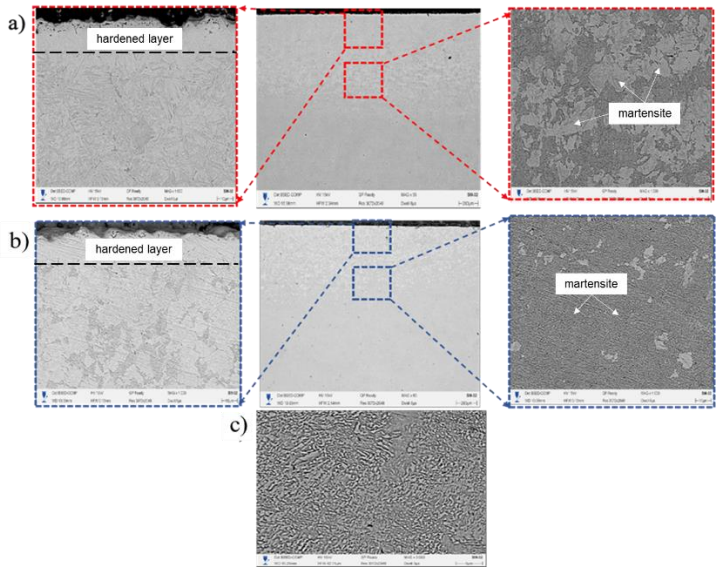
Tribological tests were conducted using the ball-on-disk method in accordance with the ASTM G99 standard on a TRB3 tribometer in dry friction mode [9]. Tribological test parameters: normal load 6 N; sliding velocity 3 cm/s; friction path 100 m; friction trace radius 2 mm. During the tests, the friction coefficient was recorded as a function of the distance traveled, and a subsequent wear assessment was carried out.

Following the ball-on-disk friction test, the wear area was determined using profilometry in accordance with the ISO13565 standard on a TAYLOR HOBSON SURTRONIC S-100 SERIES profilometer [10]. Based on the results of measuring the wear area using the TRB3 tribometer program, the wear rate (wear intensity) of the studied samples was determined.

Results and Discussion

Figure 1 shows the microstructure of grade 65G steel after plasma hardening under different processing conditions: PH1_65G (I=130 A; V_{Ar} = 0.22 l/min) and PH2_65G (I=150 A; V_{Ar} =0.25 l/min).

The microstructural image of the cross-section of the hardened zone obtained in the PH1_65G mode reveals fine-crystalline tempered martensite, forming a light-colored surface layer (Figure 1a). With increasing distance from the surface, a smooth morphological transition to a mixed structure is observed, including lower bainite, martensite, and retained austenite. Lower bainite forms from supercooled austenite at temperatures of 350-200 °C. The original structure of grade 65G steel is characterized by a pearlitic-ferritic microstructure (Figure 1c).



a – PH1_65G (I=130A; V_{Ar} =13 l/h); b – PH2_65G (I=150A; V_{Ar} =15 l/h); c – initial structure

Figure 1 – Cross-sectional microstructure of grade 65G steel after plasma hardening under different processing conditions

Figure 1b shows the cross-sectional microstructure of sample PH2_65G. When studying the structure of the near-surface layers, the problem of interpreting the observed patterns arises. X-ray phase analysis data indicate the presence of retained austenite (γ-Fe) and martensite (α′-Fe) in the sample (Figure 2).

The broadening of the diffraction peaks indicates increased lattice microstrains occurring during hardening. Increased lattice strain with increased carbon content (the carbon content in 65G steel is 0.62-0.7%) is indicated by an increase in the dislocation density in the austenite structure. The X-ray diffraction pattern of sample PH2_65G shows a relatively low intensity of the α-Fe diffraction line, indicating that the sample's microstructure is primarily composed of retained austenite (Figure 1b). The treated surface layers predominantly consist of γ-Fe (retained austenite) with a smaller fraction of α'-Fe (martensitic phase). Quantitative XRD analysis results are presented in Table 3.

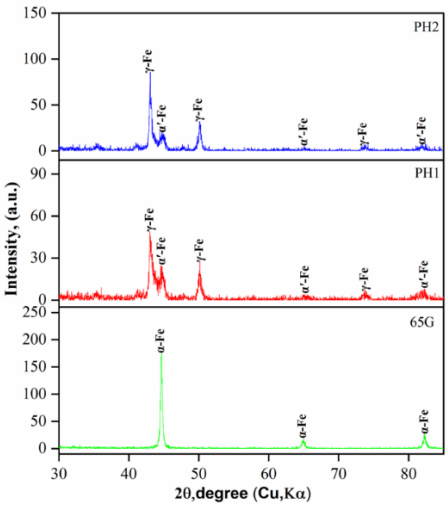


Figure 2 – X-ray diffraction patterns of 65G steel under different plasma hardening conditions (PH1_65G and PH2_65G)

Table 3 – Quantitative phase composition and lattice parameters of the treated surface layers based on X-ray diffraction analysis

Sample	Detected phases	Phase content, wt.%	Lattice parameters, Å
PH1_65G	α'-Fe (martensitic phase)	26.3	a = 2.8513
	γ-Fe (retained austenite)	73.7	a = 3.6292
PH2_65G	α'-Fe (martensitic phase)	19.8	a = 2.8481
	γ-Fe (retained austenite)	80.2	a = 3.6233

In steel hardening, processes based on phase transformations occurring during rapid cooling of the metal, leading to the formation of a martensitic structure, are of greatest interest. Thus, plasma treatment of 65G steel in the PH2_65G mode (I = 150 A; V_{Ar} = 15 l/h), due to increased heat input, leads to a decrease in the surface cooling rate.

Analysis of literature data shows that bainitic transformation achieves a hardness of 650–670 HV [11]. As can be seen from Figure 3, the maximum microhardness of the PH1_65G sample is 670-700 HV0.1, after which it gradually decreases to the microhardness of the base metal with a ferritic-pearlite structure 230 $HV_{0.1}$.

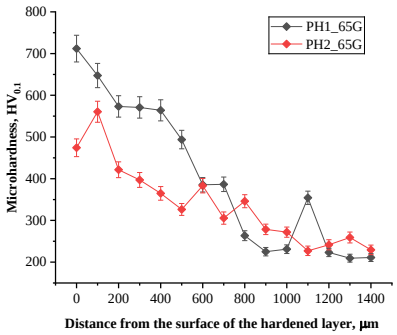


Figure 3 – Microhardness distribution across the depth of the treated layer of grade 65G steel under different plasma hardening conditions (PH1_65G and PH2_65G)

The microhardness distribution across the cross-section of the hardened layer of grade 65G steel under the PH2_65G condition (I = 150 A; V_{Ar} = 15 l/h) is determined by the specific features of its structure: microhardness values smoothly vary from 500 $HV_{0.1}$ to 230 $HV_{0.1}$ (Figure 3).

Figure 4 shows the dry friction coefficient and wear rate of the treated layer of grade 65G steel under different plasma hardening conditions (the counter-body is ShKh15 steel). For all studied systems (before and after plasma hardening), the friction coefficient remained within the range of 0.6-0.7. At the same time, the wear rate significantly decreased by 5-6 times (Fig. 4g), indicating increased wear resistance of the treated samples. This effect may be due to the high content of

residual austenite in the structure of the hardened layer (Figure 1) formed as a result of plasma treatment.

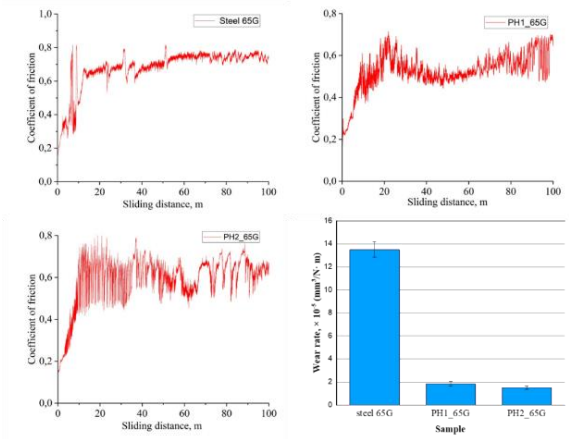


Figure 4 – Dry friction coefficient and wear rate of the treated layer of grade 65G steel under different plasma hardening conditions (ShKh15 steel counter-body)

Conclusions

Thus, based on the results of the conducted research, a range of plasma hardening parameters for grade 65G steel has been established that allows for the production of a hardened layer with increased wear resistance. The technical result of hardening grade 65G steel by plasma hardening is the formation of a modified layer on the surface of the part with a gradient-layered structure and a twofold increase in microhardness and a 5-6 times increase in wear resistance. The change in the structure and mechanical properties of steel during hardening has significant practical significance, as it provides the necessary improvement in the performance characteristics of machine parts and equipment.

References

1 Totten G.E. Steel Heat Treatment: Metallurgy and Technologies / G.E. Totten. – Boca Raton: CRC Press, 2006. – 896 p.

2 Issledovanie izmeneniya struktury, pokazateli tverdosti i treshchinostoikosti plazmenno-uprochnennoi stali 65G / I.M. Kosanova i dr. // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Chernaya metallurgiya. – 2023. – Tom 66, № 5. – C. 516-521. https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-5-516-521. (in Russian).

3 Issledovaniya vliyaniya plazmennoi zakalki na protsessy uprochneniya tyazhelonagruzhennykh detalei pochvorezhushchikh mashin / I.M. Kosanova i dr. // Trudy universiteta. – 2023. – № 4(93). – C. 36-42. https://doi.org/10.52209/1609-1825_2023_4_36. (in Russian).

4 Sharifullin S.N. Features of plasma hardening of working bodies of tillage machinery in Kazakhstan / S.N. Sharifullin, A.T. Bainiyazova, M.M. Abzhaev // Bulletin of the Korkyt Ata Kyzylorda University. – 2023. – № 1(1). – P. 15-21. https://doi.org/10.52081/tst.2023.v01.i1.002.

5 Nanoparticle-strengthened-martensitic Surface Layered Constructed Steel by Plasma Hardening Rout / D. Orynbekov et al // Journal of Nanostructures. – 2021. – Vol. 11, № 4. – P. 814-824. https://doi.org/10.22052/JNS.2021.02.018.

6 Tyurin Yu.N. Electric heating using a liquid electrode / Yu.N. Tyurin, A.D. Pogrebnjak // Surface and Coatings Technology. – 2001. – Vol. 142-144. – P. 293-299. https://doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01207-5.

7 GOST 14959-2016. Metalloproduktsiya iz ressorno-pruzhinnoi nelegirovannoi i legirovannoi stali. Tekhnicheskie usloviya. – Moskva: Standartinform, 2017. – 28 s. (in Russian).

8 Gulyarenko A. The Method of Calculating Ploughshares Durability in Agricultural Machines Verified on Plasma-Hardened Parts / A. Gulyarenko, M. Bembenek // Agriculture. – 2022. – Vol. 12, № 6. – 841. https://doi.org/10.3390/agriculture12060841.

9 ASTM G99-17; Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2016.

10 ISO 13565:1996; Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method; Surfaces having stratified functional properties. ISO: Geneva, Switzerland, 1996.
11 Koval' A.D. Issledovanie kinetiki obrazovaniya nizhnego beinita v strukture vysokouglerodistoi nizkolegirovannoi stali / A.D. Koval', M.N. Brykov, A.E. Kapustyan, D.N. Timofeenko // Novi materiali i tekhnologiї v metalurgiї ta mashinobuduvanni. – 2011. – (1) – S. 17-21. (in Ukrainian).

Funding

This research was funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. BR24992876).

Acknowledgements. *The authors express their gratitude to Ph.D., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Standardization, Metrology and Certification of the S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Aleksandr Aleksandrovich Gulyarenko for consultation and assistance in conducting this study.*

Д.Р. Байжан[1,3], Garip Erdogan[2], Т. Әлімбекұлы[1,4*], Н.С. Райсов[1], Е.Е. Біржан[1]
[1]Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан Университеті,
070002, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ. Шәкәрім даңғ., 148
[2]Сакария университеті, 54050, Түркия, Сакария қ
[3]Шәкәрім университеті, 071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ. Глинки к., 20А
[4]Дәулет Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, 070000, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ. Серікбаев к., 19
*e-mail: temirlanalimbekuly@gmail.com

65Г БОЛАТЫНЫҢ ҚҰРЫЛЫМЫ МЕН ҚАСИЕТТЕРІНЕ ПЛАЗМАЛЫҚ ШЫНЫҚТЫРУ ПАРАМЕТРЛЕРІНІҢ ӘСЕРІ

Бұл мақалада 65Г болатының құрылымы мен қасиеттеріне плазмалық шынықтыру параметрлерінің әсері зерттелген. Материалды жергілікті жоғары жылдамдықпен қыздыру және кейіннен өздігінен салқындату арқылы плазмалық өңдеудің беткі қабатта беріктендірілген қабат алуға тиімді екендігі көрсетілді. Зерттеулер плазмалық доға тогының 130-150 А және плазма түзуші газ шығынының 0,22-0,25 л/мин аралығындағы мәндерінде жүргізілді, бұл технологиялық параметрлердің қалыптасқан қабаттың сипаттамаларына әсерін бағалауға мүмкіндік берді. Құрылымдық және фазалық құрамды талдау үшін рентгендік дифракция және сканерлеуші электрондық микроскопия әдістері қолданылды, ал болаттың механикалық және трибологиялық сипаттамалары микроқаттылық өлшегіш пен трибометр көмегімен бағаланды. 65Г болатының бастапқы күйі мен плазмалық беттік өңдеуден кейінгі қасиеттеріне салыстырмалы зерттеу жүргізілді. Алынған нәтижелер плазмалық шынықтыру нәтижесінде мартенсит пен қалдық аустениттен тұратын, бастапқы құрылымға біртіндеп өтетін градиентті микрокұрылым қалыптасатынын көрсетті. Қатайған қабаттың максималды микрокаттылығы шамамен 670-700 $HV_{0.1}$ мәніне жетеді. Сонымен қатар, өңделген қабаттың тозу жылдамдығы бастапқы күймен салыстырғанда 5-6 есе төмендейтіні анықталды. Зерттеу нәтижелері плазмалық шынықтырудың 65Г болатының беттік қасиеттерін жақсартудың тиімді әдісі екенін және оның қолдану әлеуетінің жоғары екенін көрсетеді.

Түйін сөздер: *плазмалық шынықтыру, 65Г болаты, микроқұрылым, микроқаттылық, тозуға төзімділік.*

Д.Р. Байжан[1,3], Garip Erdogan[2], Т. Әлімбекұлы[1,4*], Н.С. Райсов[1], Е.Е. Біржан[1]
[1]Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова,
070002, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск, пр. Шакарима, 148
[2]Университет Сакарья, 54050, Турция, г. Сакарья
[3]Шәкәрім университет, 071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20А
[4]Восточно-Казахстанский технический университет имени Даулета Серикбаева, 070000, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск, ул. Серикбаева, 19
*e-mail: temirlanalimbekuly@gmail.com

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЕННОЙ ЗАКАЛКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СТАЛИ 65Г

В данной статье представлена исследование влияние параметров плазменной закалки на структуру и свойства стали 65Г. Показано эффективность плазменной обработки для получения упрочнённого поверхностного слоя за счёт локализованного высокоскоростного нагрева и

последующего самоохлаждения материала. Исследования проведены в диапазонах тока плазменной дуги 130-150 А и расхода плазмообразующего газа 0,22-0,25 л/мин, что позволило оценить влияние технологических параметров на характеристики сформированного слоя. Для анализа структурного и фазового состава применялись методы рентгеновской дифракции и сканирующей электронной микроскопии, а оценка механических и трибологических характеристик стали проводилась с использованием микротвердомера и трибометра. Выполнено сравнительное исследование свойств стали 65Г в исходном состоянии и после плазменного упрочнение поверхности стали. Полученные результаты свидетельствуют о том, что плазменная закалка способствует формированию градиентной микроструктуры, включающей мартенсит, остаточный аустенит, с постепенным переходом к исходной структуре материала. Максимальное значение микротвёрдости упрочнённого слоя достигает порядка 670-700 $HV_{0.1}$, при этом скорость износа обработанного слоя уменьшилась в 5-6 раз по сравнению с исходным состоянием. Результаты исследования подтверждают перспективность применения плазменной закалки как метода поверхностного упрочнения стали 65Г.

Ключевые слова: *плазменная закалка, сталь 65Г, микроструктура, микротвердость, износостойкость.*

Information about the authors

Daryn Rashituly Baizhan – Senior researcher of scientific research center «Surface engineering and tribology», Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, Republic of Kazakhstan, PhD student, Educational program 8D05302 «Technical physics», Shakarim University of Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: daryn.baizhan@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9105-3129.

Garip Erdogan – Metallurgical and Materials Engineering Department, Materials Under Extreme Conditions Lab., Sakarya University, Turkey; e-mail: gerdogan@sakarya.edu.tr. ORCID: 0000-0002-3924-9984.

Temirlan Alimbekuly* – Junior researcher of Scientific Research Center «Surface Engineering and Tribology» at Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, Republic of Kazakhstan, PhD student, Educational program 8D07102 «Mechanical engineering», D. Serikbayev East Kazakhstan technical university, Republic of Kazakhstan; e-mail: temirlanalimbekuly@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-7419-1281.

Nurmakhanbet Sayatuly Raisov – junior researcher of Scientific Research Center «Surface Engineering and Tribology» at Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, Republic of Kazakhstan; e-mail: 2002raisov@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-1698-957X.

Elzhan Erkinuly Birzhan – 4th-year student, Educational Program 6B01509 «Physics and Informatics», Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, Republic of Kazakhstan; e-mail: ebirzan0@gmail.com. ORCID:https://orcid.org/0009-0005-3363-4856.

Авторлар туралы мәліметтер

Дарын Рашитұлы Байжан – «Беттік инженерия және трибология» ғылыми-зерттеу орталығының аға ғылыми қызметкері, Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, Қазақстан Республикасы, Шәкәрім университеті 8D05302 «Техникалық физика» білім беру бағдарламасының докторанты, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: daryn.baizhan@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9105-3129.

Garip Erdogan – Metallurgical and Materials Engineering Department, Materials Under Extreme Conditions Lab., Sakarya University, Turkey; e-mail: gerdogan@sakarya.edu.tr. ORCID: 0000-0002-3924-9984.

Темірлан Әлімбекұлы* – Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан Университетінің «Беттік инженерия және трибология» ғылыми-зерттеу орталығының кіші ғылыми қызметкері, Қазақстан Республикасы, Дәулет Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университетінің 8D07102 – «Машина жасау» білім беру бағдарламасы бойынша 2 курс докторанты, Қазақстан Республикасы; e-mail: temirlanalimbekuly@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-7419-1281.

Нұрмаханбет Саятұлы Райсов – «Беттік инженерия және трибология» ғылыми-зерттеу орталығының кіші ғылыми қызметкері, Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: 2002raisov@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-1698-957X.

Елжан Еркінұлы Біржан – Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан Университетінің 6B01509 – «Физика-Информатика» білім беру бағдарламасының 4 курс студенті, Қазақстан Республикасы; e-mail: ebirzan0@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-3363-4856.

Сведения об авторах

Дарын Рашитулы Байжан – Старший научный сотрудник научно-исследовательского центра «Инженерия поверхности и трибология», Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена

Аманжолова, Республика Казахстан, докторант образовательной программы 8D05302 «Техническая физика», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: daryn.baizhan@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9105-3129.

Garip Erdogan – Metallurgical and Materials Engineering Department, Materials Under Extreme Conditions Lab., Sakarya University, Turkey; e-mail: gerdogan@sakarya.edu.tr. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3924-9984.

Темірлан Әлімбекұлы* – Младший научный сотрудник Научно-исследовательского центра «Инженерия поверхности и трибология» Восточно-Казахстанского университета имени Сарсена Аманжолова, Республика Казахстан, докторант 2 курса образовательной программы 8D07102 – «Машиностроение», Восточно-Казахстанский технический университет имени Даулета Серикбаева, Республика Казахстан; e-mail: temirlanalimbekuly@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-7419-1281.

Нурмаханбет Саятулы Райсов – младший научный сотрудник Научно-исследовательского центра «Инженерия поверхности и трибология» Восточно-Казахстанского университета имени Сарсена Аманжолова, Республика Казахстан; e-mail: 2002raisov@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-1698-957X.

Елжан Еркінулы Біржан – студент 4 курса образовательной программы 6B01509 «Физика-Информатика», Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова, Республика Казахстан; e-mail: ebirzan0@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-3363-4856.

Received 01.06.2026
Revised 08.09.2026
Accepted 10.09.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-75

CC BY 4.0
Check for updates

МРНТИ: 29.17.19

А.А. Бектемисов*, М.В. Ермоленко
Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А
*e-mail: anekin88@gmail.com

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ TiO_2 и Al_2O_3 НА ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ И КИНЕМАТИЧЕСКУЮ ВЯЗКОСТЬ ПОДСОЛНЕЧНОГО МАСЛА

Аннотация: *Повышение эффективности теплоотвода при одновременном сохранении приемлемых реологических характеристик является одним из основных требований к наножидкостям на основе растительных масел. В настоящей работе проведено сравнительное исследование влияния наночастиц TiO_2 и Al_2O_3 на коэффициент теплопроводности и кинематическую вязкость подсолнечного масла. Рассмотрены массовые концентрации наночастиц 4 и 8 масс.% в диапазоне температур 293-323 K. Установлено, что введение обоих типов наночастиц повышает теплопроводность базовой жидкости, при этом TiO_2 обеспечивает более выраженный эффект. Для 4 масс.% TiO_2 относительное увеличение коэффициента теплопроводности составляет 8,2-8,5 %, тогда как для Al_2O_3 при той же концентрации составляет 6,1-6,4 %. При концентрации 8 масс.% увеличение составляет соответственно 14,0-14,3 и 12,0-12,4 %. Вместе с тем добавление наночастиц сопровождается повышением кинематической вязкости. Наиболее существенное увеличение наблюдается для 8 масс.% Al_2O_3 и составляет 95-97 %, тогда как для 8 масс.% TiO_2 находится в пределах 64-65 %. Полученные результаты показывают, что TiO_2 в исследованных условиях обеспечивает более благоприятное сочетание увеличения теплопроводности и вязкостных характеристик по сравнению с Al_2O_3. Наблюдаемое различие рассмотрено с позиций формирования межфазного слоя, подвижности наночастиц и особенностей их агрегирования в масляной среде.*

Ключевые слова: *подсолнечное масло; нанолубрикант; TiO_2; Al_2O_3; теплопроводность; кинематическая вязкость; наночастицы.*

Введение

Растительные масла представляют значительный интерес в качестве базовой среды для теплоносителей и технологических жидкостей благодаря их природному происхождению и характерным смазывающим свойствам. Одновременно их теплофизические характеристики

существенно зависят от температуры. Esteban et al. показали выраженную температурную зависимость плотности и вязкости ряда растительных масел, включая подсолнечное, соевое и пальмовое масла; особенно заметным является снижение вязкости при повышении температуры [1].

Наряду с реологическими характеристиками для технологического применения растительных масел важным параметром является теплопроводность. Okafor и Nwoguh экспериментально исследовали вязкость и теплопроводность растительных масел как базовых жидкостей и показали необходимость совместного рассмотрения этих характеристик при оценке их теплофизической эффективности [2].

Одним из способов изменения теплофизических свойств растительных масел является введение дисперсной фазы в виде наночастиц. В литературе представлены исследования как мононаножидкостей, так и систем с несколькими типами наночастиц. При этом эффективность модификации зависит от материала наночастиц, их концентрации, температуры и свойств базового масла. Основные исследования, наиболее близкие к рассматриваемой задаче, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Исследования теплофизических характеристик наножидкостей на основе масел

Источник	Базовая жидкость и наночастицы	Основные исследуемые параметры и условия
Nwoguh et al. [3]	Высокоолеиновое соевое масло; Al_2O_3, MoS_2 и TiO_2	Частицы около 30 нм, 0,5-4,0 масс.%, 25-70 °C; исследованы теплопроводность и вязкость
Wanatasanappan et al. [4]	Кокосовое, соевое и пальмовое масла; Al_2O_3-TiO_2	Соотношение 50:50, 0,2-0,6 масс.%, 30–60 °C; теплопроводность, вязкость и плотность
Sarafraz et al. [5]	Кокосовое масло; Ag	Исследованы теплопроводность и вязкость наножидкости и их изменение с температурой и концентрацией
Jyothish et al. [6]	Подсолнечная олеиновая основа; $ZnTiO_3$, BN, CuO	1-4 масс.%, 30-70 °C; исследованы теплопроводность, вязкость и реологические свойства
Tiwari et al. [7]	Кокосовое масло; Al_2O_3	0,25-1,50 масс.%; исследованы теплопроводность, динамическая вязкость и смачиваемость
Yiamsawas et al. [8]	Смесь этиленгликоль/вода; TiO_2 и Al_2O_3	0-4 об.%, 15-60 °C; проведено прямое сравнение влияния TiO_2 и Al_2O_3 на вязкость
Okafor et al. [9]	Высокоолеиновые растительные масла; гибридные системы GnP, TiO_2, MoS_2, Al_2O_3	Исследовано изменение теплопроводности гибридных наножидкостей
Okafor et al. [10]	Высокоолеиновое соевое масло; TiO_2, Al_2O_3, MoS_2 и графеновые нанопластинки	Проведено сравнительное исследование теплопроводности и вязкости в зависимости от температуры и концентрации

Следовательно, анализ литературы показывает, что основное внимание исследователей уделяется влиянию температуры и концентрации наночастиц на теплопроводность и вязкость растительных масел. Вместе с тем сравнительная оценка TiO_2 и Al_2O_3 при одинаковых повышенных массовых концентрациях представляет отдельный интерес, поскольку более высокая теплопроводность материала наночастицы в монолитном состоянии не обязательно приводит к более высокому приросту эффективной теплопроводности наножидкости.

В настоящем исследовании в качестве базовой жидкости используется подсолнечное масло, а в качестве дисперсной фазы - наночастицы TiO_2 и Al_2O_3 с концентрациями 4 и 8 масс.%. Цель работы заключается в сравнительной оценке влияния TiO_2 и Al_2O_3 на коэффициент теплопроводности и кинематическую вязкость подсолнечного масла в диапазоне температур 293-323 K, а также в анализе причин различий между полученными характеристиками.

Материалы и методы

В качестве базовой жидкости в эксперименте использовалось подсолнечное масло. В исследуемую жидкость вводились наночастицы двух типов – TiO_2 и Al_2O_3. Для каждого материала исследовались две массовые концентрации: 4 и 8 масс.%.

Экспериментальные данные получены при четырех значениях температуры: 293, 303, 313 и 323 K. Для каждого температурного состояния определялись коэффициент теплопроводности и кинематическая вязкость базового подсолнечного масла и четырех наножидкостей: TiO_2 4 масс.%, TiO_2 8 масс.%, Al_2O_3 4 масс.% и Al_2O_3 8 масс.%.

Методика приготовления состояла из следующих стадий:

1) На первом этапе подсолнечное масло разбавляли гексаном, чтобы снизить его вязкость и упростить дальнейшее перемешивание;

2) В полученный раствор вводили наночастицы (TiO_2, Al_2O_3), после чего подвергали суспензию ультразвуковой обработке при помощи диспергатора JY92-IIDN для достижения гомогенного распределения твердой фазы (рис. 1а);

3) На финальной стадии гексан отгоняли на роторном испарителе Stegler RE-52CS, в результате чего было получено подсолнечное масло с равномерно распределенными наночастицами (рис. 1б).

Измерение теплопроводности производилось с использованием анализатора теплопроводности Thermtest THW-L2 (рис. 1в). Схема установки для определения кинематической вязкости состоит из термостатический бани LOIP-LT и стеклянного вискозиметра (рис 1г.)

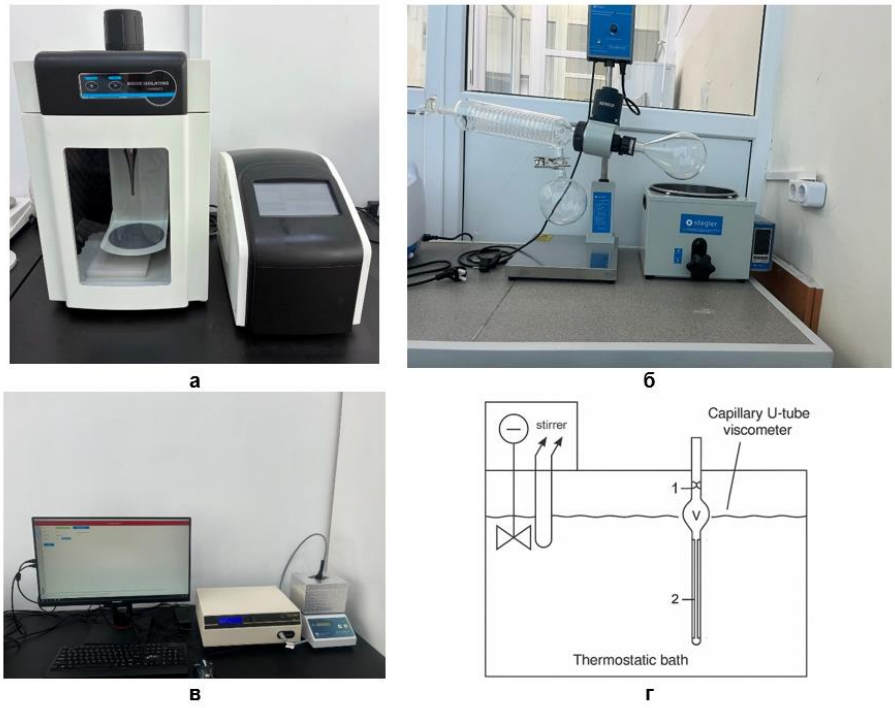


Рисунок 1 – Оборудование, задействованное при приготовлении наномасла и измерении его теплофизических свойств
а – диспергатор JY92-IIDN; б – роторный испаритель Stegler RE-52CS;
в – анализатор теплопроводности Thermtest THW-L2; г – схема установки для определения кинематической вязкости

Результаты и обсуждение

На рисунке 2 представлены температурные зависимости коэффициента теплопроводности подсолнечного масла и наножидкостей с TiO_2 и Al_2O_3. Согласно экспериментальным данным, для всех исследуемых составов коэффициент теплопроводности постепенно уменьшается при повышении температуры от 293 до 323 K.

Одновременно во всём рассматриваемом диапазоне температур наножидкости имеют более высокую теплопроводность по сравнению с исходным подсолнечным маслом.

При 293 K коэффициент теплопроводности исходного подсолнечного масла составляет 0,169 Вт/(м·K). Введение 4 масс.% TiO_2 повышает его до 0,183 Вт/(м·K), а увеличение концентрации TiO_2 до 8 масс.% – до 0,193 Вт/(м·K). Для Al_2O_3 при тех же концентрациях получены значения 0,179 и 0,189 Вт/(м·K) соответственно.

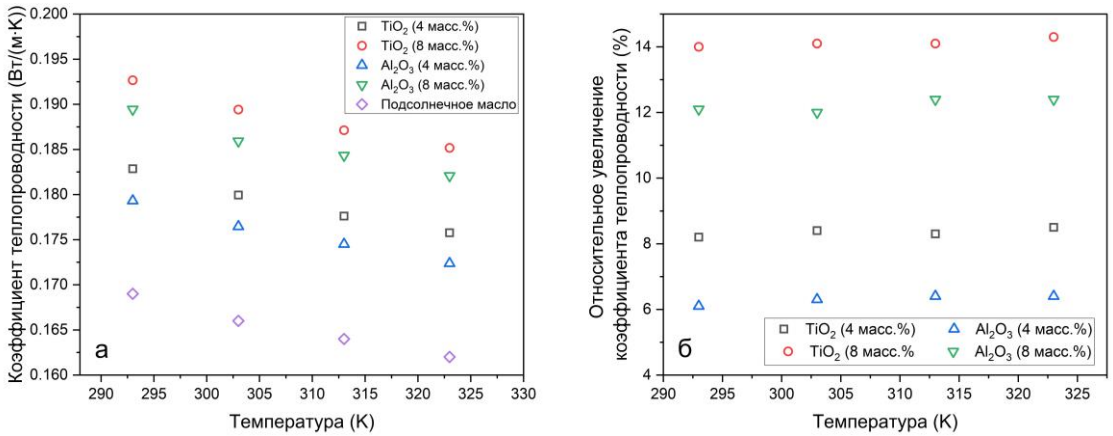


Рисунок 2 – Зависимость характеристик теплопроводности от температуры:
а – коэффициент теплопроводности; б – относительное увеличение коэффициента теплопроводности

При 323 K коэффициент теплопроводности подсолнечного масла снижается до 0,162 Вт/(м·K). При этом значения для TiO_2 составляют 0,176 Вт/(м·K) при 4 масс.% и 0,185 Вт/(м·K) при 8 масс.%, тогда как для Al_2O_3 получены соответственно 0,172 и 0,182 Вт/(м·K).

Следовательно, при одинаковой массовой концентрации TiO_2 обеспечивает более высокий коэффициент теплопроводности, чем Al_2O_3, во всех четырех исследованных температурных точках.

Различие особенно наглядно проявляется при рассмотрении относительного увеличения коэффициента теплопроводности.

Для наножидкости с 4 масс.% TiO_2 относительный прирост теплопроводности находится в узком диапазоне 8,2-8,5 %. При 4 масс.% Al_2O_3 соответствующий прирост составляет 6,1-6,4 %. Таким образом, уже при меньшей из двух исследуемых концентраций TiO_2 показывает более выраженное повышение теплопроводности.

При увеличении содержания наночастиц до 8 масс.% относительный прирост становится значительно выше для обоих оксидов. Для TiO_2 он составляет 14,0-14,3 %, тогда как для Al_2O_3 – 12,0-12,4 %. При этом преимущество TiO_2 сохраняется во всём диапазоне 293-323 K.

Температурные зависимости кинематической вязкости имеют более выраженный характер. Для подсолнечного масла и всех исследуемых наножидкостей повышение температуры сопровождается существенным уменьшением кинематической вязкости (рис. 3).

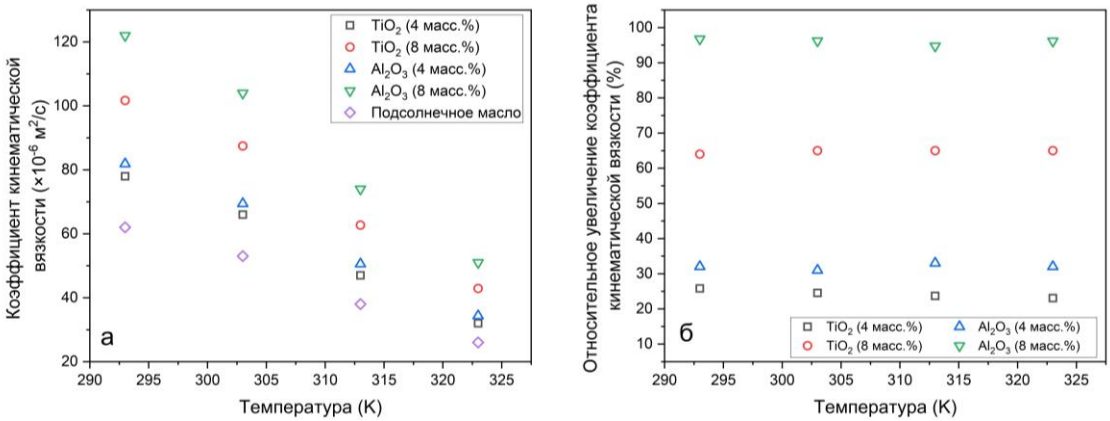


Рисунок 3 – Зависимость характеристик кинематической вязкости от температуры:
а – коэффициент кинематической вязкости; б – относительное увеличение коэффициента кинематической вязкости

При 293 K кинематическая вязкость подсолнечного масла составляет $62 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Добавление 4 масс.% TiO_2 повышает её до $78 \cdot 10^{-6}$ м²/с, а 8 масс.% – до $102 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Для Al_2O_3 значения составляют соответственно $82 \cdot 10^{-6}$ и $122 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

При повышении температуры до 323 K вязкость базового масла уменьшается до $26 \cdot 10^{-6}$ м^2/с. Для наножидкостей с TiO_2 получены значения $32 \cdot 10^{-6}$ и $43 \cdot 10^{-6}$ м^2/с при концентрациях 4 и 8 масс.% соответственно. Для Al_2O_3 значения составляют $34 \cdot 10^{-6}$ и $51 \cdot 10^{-6}$ м^2/с.

При концентрации 4 масс.% TiO_2 относительное увеличение кинематической вязкости составляет 23-26 %, тогда как для Al_2O_3 оно достигает 31-33 %. Более выраженное различие наблюдается при концентрации 8 масс.%. Для TiO_2 увеличение составляет 64-65 %, в то время как для Al_2O_3 оно находится в диапазоне 95-97 %.

Именно поэтому, Al_2O_3 оказывает значительно более сильное влияние на вязкость подсолнечного масла по сравнению с TiO_2. При этом относительное увеличение вязкости для каждого состава остаётся сравнительно стабильным при изменении температуры, несмотря на существенное снижение абсолютных значений вязкости.

Заключение

Экспериментально установлено, что введение TiO_2 и Al_2O_3 повышает коэффициент теплопроводности подсолнечного масла при обеих исследуемых концентрациях. При этом TiO_2 обеспечивает более высокий прирост теплопроводности: 8,2-8,5 % при 4 масс.% и 14,0-14,3 % при 8 масс.%. Для Al_2O_3 соответствующие значения составляют 6,1-6,4 и 12,0-12,4 %.

Повышение температуры от 293 до 323 K сопровождается постепенным снижением абсолютного коэффициента теплопроводности всех исследованных жидкостей. Наибольшее значение во всём температурном диапазоне сохраняется для состава с 8 масс.% TiO_2.

Кинематическая вязкость с повышением температуры существенно уменьшается, однако введение наночастиц увеличивает её относительно исходного подсолнечного масла. Наиболее выраженное увеличение характерно для Al_2O_3. При 8 масс.% Al_2O_3 относительное повышение вязкости составляет 95-97 %, тогда как для 8 масс.% TiO_2 – 64-65 %.

Несмотря на более высокую объёмную теплопроводность монолитного Al_2O_3, в рассматриваемой дисперсной системе TiO_2 обеспечивает более высокий прирост эффективной теплопроводности. Согласно исходной интерпретации результатов, наблюдаемое различие связано с совокупным влиянием межфазного слоя, подвижности наночастиц, характера их агрегирования и вязкости базовой среды.

По совокупности исследованных параметров TiO_2 характеризуется более благоприятным соотношением между повышением коэффициента теплопроводности и увеличением кинематической вязкости по сравнению с Al_2O_3.

Список литературы

1. Temperature dependence of density and viscosity of vegetable oils / Esteban B. et al // Biomass and Bioenergy. – 2012. – Vol. 42. – P. 164-171. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.03.007.
2. Okafor A.C. A study of viscosity and thermal conductivity of vegetable oils as base cutting fluids for minimum quantity lubrication machining of difficult-to-cut metals / A.C. Okafor, T.O. Nwoguh // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2020. – Vol. 106. – P. 1121-1131. https://doi.org/10.1007/s00170-019-04611-3.
3. Nwoguh T.O. Enhancement of viscosity and thermal conductivity of soybean vegetable oil using nanoparticles to form nanofluids for minimum quantity lubrication machining of difficult-to-cut metals / T.O. Nwoguh et al // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2021. – Vol. 113. – P. 3377-3388. https://doi.org/10.1007/s00170-021-06812-1.
4. Wanatasanappan V.V. Thermophysical Properties of Vegetable Oil-Based Hybrid Nanofluids Containing Al_2O_3–TiO_2 Nanoparticles as Insulation Oil for Power Transformers / V.V. Wanatasanappan, M. Rezman, M.Z. Abdullah // Nanomaterials. – 2022. – Vol. 12, № 20, Art. 3621. https://doi.org/10.3390/nano12203621.
5. Thermal Performance and Viscosity of Biologically Produced Silver/Coconut Oil Nanofluids / M.M. Sarafraz et al // Chemical and Biochemical Engineering Quarterly. – 2016. – Vol. 30, № 4. – P. 489-500. https://doi.org/10.15255/CABEQ.2015.2203.
6. Jyothish P. Experimental investigation study on enhancing the thermal and rheological properties of sunflower vegetable oil with $ZnTiO_3$, BN, CuO nanofluid for machining of Inconel-718 under minimum quantity lubrication (MQL) / P. Jyothish, V. Vasu, D. Kashinath // Materials Today: Proceedings. – 2022. – Vol. 59. – P. 1599-1607. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.147.

7. Tiwari S. Synthesis, characterization, and application of Al_2O_3/coconut oil-based nanofluids in sustainable machining of AISI 1040 steel / S. Tiwari, M. Amarnath, M.K. Gupta // Journal of Molecular Liquids. – 2023. – Vol. 386, Art. 122465. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.122465.
8. Experimental studies on the viscosity of TiO_2 and Al_2O_3 nanoparticles suspended in a mixture of ethylene glycol and water for high temperature applications / T. Yiamsawas et al // Applied Energy. – 2013. – Vol. 111. – P. 40-45. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.04.068.
9. Thermal Conductivity Characterization of High Oleic Vegetable Oils Based Hybrid Nanofluids Formulated Using GnP, TiO_2, MoS_2, Al_2O_3 Nanoparticles for MQL Machining / A.C. Okafor et al // International Journal of Thermophysics. – 2024. – Vol. 45, Art. 169. https://doi.org/10.1007/s10765-024-03472-7.
10. Thermal conductivity and viscosity characterization of soybean oil nanofluids dispersed with graphene nanoplatelets, MoS_2, TiO_2 and Al_2O_3 nanoparticles for MQL machining / A.C. Okafor et al // Discover Nano. – 2026. – Vol. 21, Art. 303. https://doi.org/10.1186/s11671-026-04754-9.

Сведения о финансировании

Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP26100207).

А.А. Бектемисов*, М.В. Ермоленко
«Шәкәрім университеті» КеАҚ,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинка көш., 20 А
*e-mail: anekin88@gmail.com

TiO_2 ЖӘНЕ Al_2O_3 НАНОБӨЛШЕКТЕРІНІҢ КҮНБАҒЫС МАЙЫНЫҢ ЖЫЛУӨТКІЗГІШТІГІ МЕН КИНЕМАТИКАЛЫҚ ТҰТҚЫРЛЫҒЫНА САЛЫСТЫРМАЛЫ ӘСЕРІ

Өсімдік майлары негізіндегі наносұйықтықтарға қойылатын негізгі талаптардың бірі – қолайлы реологиялық сипаттамаларды сақтай отырып, жылу әкету тиімділігін арттыру. Осы жұмыста TiO_2 және Al_2O_3 нанобөлшектерінің күнбағыс майының жылуөткізгіштік коэффициенті мен кинематикалық тұтқырлығына әсері салыстырмалы түрде зерттелді. 293-323 K температура аралығында нанобөлшектердің 4 және 8 масс.% концентрациялары қарастырылды. Нанобөлшектердің екі түрін де енгізу базалық сұйықтықтың жылуөткізгіштігін арттыратыны анықталды, бұл ретте TiO_2 анағұрлым айқын әсер көрсетті. 4 масс.% TiO_2 үшін жылуөткізгіштік коэффициентінің салыстырмалы артуы 8,2-8,5%-ды құраса, дәл осындай концентрациядағы Al_2O_3 үшін бұл көрсеткіш 6,1-6,4%-ды құрады. 8 масс.% концентрацияда өсім тиісінше 14,0-14,3 және 12,0-12,4% болды. Сонымен қатар, нанобөлшектерді қосу кинематикалық тұтқырлықтың артуымен қатар жүрді. Ең жоғары өсім 8 масс.% Al_2O_3 үшін байқалып, 95-97%-ды құрады, ал 8 масс.% TiO_2 үшін бұл көрсеткіш 64-65 % аралығында болды. Алынған нәтижелер зерттелген жағдайларда TiO_2 және Al_2O_3-пен салыстырғанда жылуөткізгіштіктің артуы мен тұтқырлық сипаттамаларының неғұрлым қолайлы үйлесімін қамтамасыз ететінін көрсетті. Байқалған айырмашылық фазааралық қабаттың түзілуі, нанобөлшектердің қозғалғыштығы және олардың майлы ортада агрегациялану ерекшеліктері тұрғысынан қарастырылды.

Түйін сөздер: *күнбағыс майы; наномайлағыш; TiO_2; Al_2O_3; жылуөткізгіштік; кинематикалық тұтқырлық; нанобөлшектер.*

A.A. Bektemissov*, M.V. Ermolenko
Shakarim University, 20A Glinka St., Semey, 071412, Republic of Kazakhstan
*e-mail: anekin88@gmail.com

COMPARATIVE EFFECT OF TiO_2 AND Al_2O_3 NANOPARTICLES ON THE THERMAL CONDUCTIVITY AND KINEMATIC VISCOSITY OF SUNFLOWER OIL

Improving heat dissipation efficiency while maintaining acceptable rheological characteristics is one of the main requirements for vegetable oil-based nanofluids. In the present study, a comparative investigation of the effects of TiO_2 and Al_2O_3 nanoparticles on the thermal conductivity and kinematic viscosity of sunflower oil was carried out. Nanoparticle mass concentrations of 4 and 8 wt.% were considered within a temperature range of 293-323 K. It was established that the addition of both types of nanoparticles increased the thermal conductivity of the base fluid, with TiO_2 providing a more pronounced effect. For 4 wt.% TiO_2, the relative increase in thermal conductivity was 8.2-8.5%, whereas for Al_2O_3 at the same concentration it was 6.1-6.4%.

At a concentration of 8 wt.%, the corresponding increases were 14.0-14.3% and 12.0-12.4%, respectively. At the same time, the addition of nanoparticles was accompanied by an increase in kinematic viscosity. The most significant increase was observed for 8 wt.% Al_2O_3 and amounted to 95-97%, whereas for 8 wt.% TiO_2 it was within the range of 64-65%. The obtained results show that, under the investigated conditions, TiO_2 provides a more favorable combination of thermal conductivity enhancement and viscosity characteristics compared with Al_2O_3. The observed difference was considered in terms of interfacial layer formation, nanoparticle mobility, and the characteristics of nanoparticle aggregation in the oil medium.

Key words: *sunflower oil; nanolubricant; TiO_2; Al_2O_3; thermal conductivity; kinematic viscosity; nanoparticles.*

Сведения об авторах

Ануар Алмасбекович Бектемисов* – научный сотрудник кафедры «Техническая физика и теплоэнергетика», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: anekin88@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0364-4632.

Михаил Вячеславович Ермоленко – кандидат технических наук, ассоциированный профессор, старший преподаватель кафедры «Техническая физика и теплоэнергетика», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: tehfiz@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1677-8023.

Авторлар туралы мәліметтер

Ануар Алмасбекович Бектемисов* – «Техникалық физика және жылуэнергетика» кафедрасының ғылыми қызметкері, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: anekin88@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0364-4632.

Михаил Вячеславович Ермоленко – техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, «Техникалық физика және жылу энергетикасы» кафедрасының аға оқытушысы, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: tehfiz@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1677-8023.

Information about the authors

Anuar Almasbekovich Bektemissov* – researcher, Department of Technical Physics and Heat Power Engineering, Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: anekin88@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0364-4632.

Mikhail Vyacheslavovich Yermolenko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Lecturer at the Department of «Technical Physics and Heat Power Engineering», Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: tehfiz@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1677-8023.

Поступила в редакцию 10.06.2026
Поступила после доработки 16.07.2026
Принята к публикации 11.09.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-76

ГРНТИ 58.91.35

CC BY 4.0
Check for updates

Е.А. Қабдылқақов*, Н.Е. Мухамедов, А.С. Сураев, С.А. Должиков, А.В. Пахниц
[1]Филиал «Институт атомной энергии»
Национального ядерного центра Республики Казахстан
180010, Республика Казахстан, область Абай, г. Курчатов, улица Бейбіт атом, 10.
*e-mail kabdylkakov@nnc.kz

ПРИМЕНЕНИЕ УСТАНОВКИ ЭШП ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ТВЕРДЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ РЕАКТОРА БН-350

Аннотация: *Переработка металлических твердых радиоактивных отходов (ТРО), образующихся при выводе из эксплуатации ядерных установок, является актуальной задачей, решение которой позволяет уменьшить объем отходов, подлежащих захоронению. В работе представлены результаты исследования возможности применения электрошлакового переплава (ЭШП) для переработки металлических ТРО реактора БН-350. Эксперимент проведен на установке ЭШП, ранее апробированной при очистке стальных жаровых труб исследовательского реактора*

©А.Ж. Бекей, Ф. Вакандио, Т.В. Шакиева, Г.Е. Ергазиева, Х. Авчукир, 2026

ИВГ.1М от радиоактивного загрязнения. В качестве имитатора одного из образцов ТРО БН-350 использован фрагмент трубы из стали 12Х18Н10Т размером Ø50×5 мм. Перед экспериментом выполнены подготовка установки, позиционирование расходуемого электрода и формирование шлаковой ванны. В ходе переплава осуществлялась регистрация электрических параметров установки, что позволило проанализировать особенности протекания процесса. В результате переплавлено 2,3 кг металла и получен цилиндрический слиток диаметром около 60 мм. Анализ зарегистрированных значений тока и напряжения показал, что неустойчивость процесса на начальном этапе была связана с кратковременными короткими замыканиями между электродом и кокилем кристаллизатора. Возникновение коротких замыканий обусловлено малой величиной кольцевого зазора и недостаточным количеством флюса в нем. Установлено, что существующая конфигурация установки позволяет осуществлять переплав трубчатых металлических изделий, однако геометрические размеры перерабатываемых образцов ограничиваются параметрами кристаллизатора и величиной требуемого кольцевого зазора. Для переработки ТРО иных размеров и формы необходимо разрабатывать кристаллизаторы с соответствующими геометрическими и конструктивными параметрами.

Ключевые слова: *твердые радиоактивные отходы, БН-350, электрошлаковый переплав, кристаллизатор, кокиль.*

Введение

Обращение с радиоактивными отходами (РАО) является одним из ключевых вопросов атомной энергетики. В процессе эксплуатации и вывода из эксплуатации атомных электрических станций (АЭС) образуется большое количество твердых и жидких радиоактивных отходов.

Значительную долю твердых радиоактивных отходов (ТРО) составляют различные металлы и сплавы [1-5]. Одним из конечных этапов обращения с ТРО является их захоронение в соответствующих пунктах, тип которых определяется характеристиками отходов. Совершенствование технологий обращения с ТРО должно быть направлено не только на развитие методов их захоронения, но и на разработку методов переработки и дезактивации с целью уменьшения объема отходов, подлежащих захоронению.

Для Республики Казахстан актуальной остается задача обращения с ТРО энергетического реактора БН-350. В рамках данной задачи возникает необходимость разработки и внедрения технологий переработки металлических РАО с целью их дезактивации либо перевода в формы, пригодные для дальнейшего обращения.

Одним из подходящих методов переработки металлических радиоактивных отходов является электрошлаковый переплав (ЭШП). Процесс основан на омическом нагреве шлаковой ванны электрическим током, проходящим между расходуемым электродом и формируемым слитком [6, 7].

В филиале «Институт атомной энергии» Национального ядерного центра Республики Казахстан проводятся исследования по оценке эффективности электрошлакового переплава для очистки нержавеющих сталей от урана, трансурановых элементов и продуктов распада урана. Для проведения экспериментов используется установка ЭШП, созданная на базе аппарата электрошлаковой сварки А-550У. Проведенные ранее эксперименты [8-9] подтвердили принципиальную возможность применения данной технологии для переработки твердых металлических РАО. В этих экспериментах осуществлялся переплав и очистка от радиоактивного загрязнения стальных жаровых труб, применявшихся в конструкции экспериментальных технологических каналов исследовательского реактора ИВГ.1М.

По результатам исследований определено снижение активности U-235 в металле до минимально детектируемого уровня и снижение активности Cs-137 – на величину до двух порядков. В то же время, определено наличие U-235 и Cs-137 в шлаке, а также в фильтрующих элементах, что косвенно подтверждается увеличением мощности эквивалентной дозы от шлака и фильтрующих элементов. Активность Co-60 после переплава сохраняется практически на исходном уровне, поскольку данный радионуклид образован в нержавеющей стали вследствие нейтронной активации [8].

Установка ЭШП

Основным узлом любых установок для электрошлакового переплава является электрошлаковая печь. В электрошлаковой печи осуществляется переплав металлических элементов, используемых в качестве расходуемых электродов; их нагрев и плавление

происходят за счет омического нагрева шлаковой ванны. Расплавленный металл опускается к бассейну расплава сквозь расплавленный флюс, при этом в ходе процессов электрохимического взаимодействия металла с компонентами флюса происходит выборочное извлечение одних или внесение других элементов в состав металла (рис. 1) [8-9].

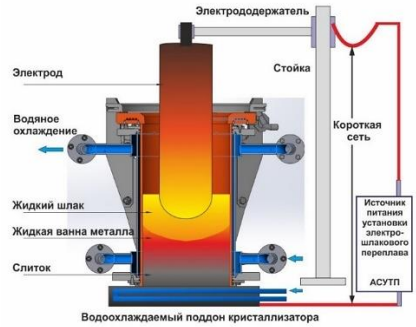


Рисунок 1 – Схема электрошлакового переплава

В начале процесса электрошлакового переплава в кристаллизаторе происходит плавление флюса и нижнего торца электрода, в результате чего образуется ванна расплава. Далее электрод непрерывно подается в ванну расплавленного флюса. За счет тепла, выделяемого во флюсе вследствие его электрического сопротивления, электрод оплавляется, а капли металла стекают вниз, образуя слиток в полости кокиля водоохлаждаемого кристаллизатора. Сама установка ЭШП филиала ИАЭ РГП НЯЦ РК состоит из следующих элементов (рис. 2):

1. лабораторная электрошлаковая печь;
2. кристаллизатор;
3. поддон;
4. трансформатор ТШС-3000;
5. система водяного охлаждения и сбора сточных вод;
6. система автономной вентиляции.



1 – электрошлаковая печь; 2 – кристаллизатор; 3 – поддон;
4 – трансформатор; 5 – система водяного охлаждения и сбора сточных вод; 6 – система автономной вентиляции

Рисунок 2 – Внешний вид установки ЭШП

Кристаллизатор и поддон установки предназначены для формирования цилиндрических слитков очищенного металла в процессе электрошлакового переплава. В кристаллизаторе происходит плавление электродного металла и рабочего флюса, а также формирование слитка в условиях принудительного охлаждения жидкого металла (рис. 3 а, б).

Кристаллизатор состоит из двух основных деталей – наружного кожуха и кокиля. Кожух кристаллизатора представляет собой отрезок трубы, к которому приварены нижний и верхний фланцы. На боковой поверхности трубы приварены патрубки подвода и отвода теплоносителя, в качестве которого используется вода. Крепление кожуха кристаллизатора к кокилю осуществляется с помощью фланцевых соединений. Диаметр внутренней полости кокиля, в котором образуется слиток – 60 мм. Поддон установки, на котором размещается кристаллизатор, также охлаждается водой.



а) кристаллизатор и поддон б) медный кокиль

Рисунок 3 – Кристаллизатор на поддоне и медный кокиль

Кристаллизатор состоит из двух основных деталей – наружного кожуха и кокиля. Кожух кристаллизатора представляет собой отрезок трубы, к которому приварены нижний и верхний фланцы. На боковой поверхности трубы приварены патрубки подвода и отвода теплоносителя, в качестве которого используется вода. Крепление кожуха кристаллизатора к кокилю осуществляется с помощью фланцевых соединений. Диаметр внутренней полости кокиля, в котором образуется слиток – 60 мм. Поддон установки, на котором размещается кристаллизатор, также охлаждается водой.

Виды ТРО реактора БН-350

В состав ТРО реактора БН-350 входят строительные материалы (например, бетонная крошка), элементы металлических конструкций и контура охлаждения, а также различные инструменты (дрели, разводные и газовые ключи) и другие изделия (рис. 4). Применение электрошлакового переплава рассматривается как способ снижения объемов металлических радиоактивных отходов, а, в перспективе – переработка, т.е. возврат в повторное использование части очищенного металла. На рисунке 4 представлены реальные образцы ТРО реактора БН-350.



Рисунок 4 – Образцы ТРО реактора БН-350

В таблице 1 представлены измеренные значения массы, удельной активности и мощности эквивалентной дозы.

Образцы ТРО различаются геометрическими параметрами, формой и материалом изготовления.

Образец под номером 11 является наиболее подходящим по форме и размерам для использования в качество электрода. Образец представляет собой металлическую трубу размером Ø47×5 мм. Для исследования возможности переплава данного вида ТРО на установке ЭШП проведен пуск с использованием его имитатора.

Таблица 1 – Результаты измерения активности и мощности эквивалентной дозы образцов ТРО

№	Наименование	Масса, кг	Удельная активность, 10^6 Бк	Мощность эквивалентной дозы, мкЗв/ч			
				Вплотную	0,1 м	0,5 м	1 м
1	Бетонная крошка	5,8	0,931	63,0	25,3	3,8	1,26
2	Бетонная крошка	8,7	0,805	66,0	26,0	3,2	0,98
3	Инструмент (газовый, рожковый ключ)	4,5	0,356	85,0	18,0	1,7	0,73
4	Инструмент (дрель со сверлом, отвертка)	3,0	1,667	170,0	39,0	3,5	1,32
5	Алюминиевый лист	0,7	2,286	280,0	30,0	1,5	0,7
6	Заглушка разжимная	4,4	0,500	110,0	28,5	2,3	0,93
7	Шланг	0,7	10,286	206,0	38,0	4,8	1,9
8	Вентиль отсечной	2,2	0,773	78,0	22,5	1,8	0,73
9	Фланец	5,1	0,118	19,3	4,0	0,89	0,4
10	Рабочее колесо насоса	2,1	0,429	37,0	10,6	1,2	0,51
11	Отрезок трубы	2,2	0,273	23,0	7,8	0,97	0,52
12	Крышка пенала Т-1	3,9	0,179	24,0	6,4	0,8	0,43
13	Фрагмент трубы с фланцем	4,0	0,038	6,1	1,7	0,42	0,2
14	Металл листовой	3,6	0,250	28,0	8,7	1,2	0,52
15	Фильтр Д-23	32	1,531	148,0	89,0	31,0	14,0

Подготовка к эксперименту с имитатором ТРО

В качестве имитатора ТРО был выбран фрагмент трубы (Ø50×5 мм), максимально приближенный по своим геометрическим размерам (Ø47×5 мм) и материальному составу (сталь 12Х18Н10Т) к одному из образцов ТРО под номером 11 (рис. 5).

Выбор имитатора ТРО в качестве образца обусловлен необходимостью отработки методики электрошлакового переплава. Проведение предварительных экспериментов позволяет определить оптимальный размер зазора между электродом и стенкой медного кокиля, обеспечить устойчивое положение электрода в процессе переплава и исключить его контакт со стенкой кокиля, что особенно важно для предотвращения радиоактивного загрязнения установки при последующей переработке реальных ТРО.

Масса имитатора составила 3,514 кг. К фрагменту трубы был приварен наконечник – стальной стержень, служащий для крепления электрода в электрододержателе установки ЭШП. Общая длина электрода (фрагмент трубы и наконечник) составила 1,2 м.



а) Измерение массы имитатора ТРО б) установка ЭШП перед пуском

Рисунок 5 – Подготовка эксперимента

Перед пуском были смонтированы элементы системы охлаждения кристаллизатора, поддона и трансформатора установки ЭШП. После установки и герметизации гибких подводящих и отводящих трубопроводов выполнено заполнение системы водой и проведена

проверка на герметичность всех соединений. Охлаждение элементов установки ЭШП осуществлялось проточной водой со сливом сточной воды в специальную канализацию. На рисунке 6 представлен вид установки ЭШП с гибкими рукавами и закрепленным в ней электродом.

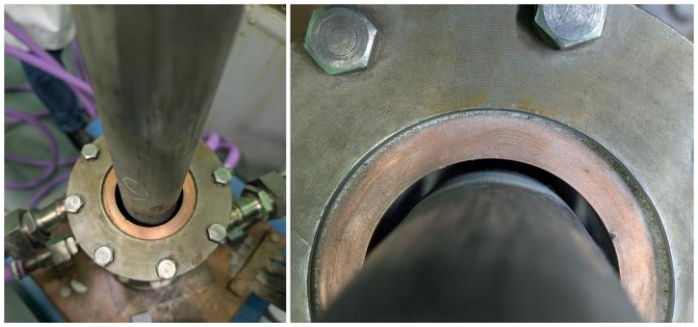


Рисунок 6 – Позиционирование электрода в кристаллизаторе

Для исключения возникновения короткого замыкания между электродом и стенкой медного кокиля кристаллизатора в процессе движения электрода при переплаве необходимо обеспечить гарантированный зазор путем точного позиционирования электрода относительно стенок кокиля. При помощи системы управления подачей электрода, работающей в ручном режиме, была проверена траектория его движения при полном вводе в кристаллизатор и последующем извлечении с контролем ширины зазора (рис. 6). После подтверждения отсутствия контакта между этими элементами во всем диапазоне движения положение электрода и кристаллизатора было зафиксировано, а установка переведена в режим дистанционного управления.

На заключительном этапе подготовки к эксперименту для осуществления переплава в режиме «твердого» старта между торцом электрода и металлической пластиной (затравкой), размещенной на водоохлаждаемом поддоне, был установлен прессованный пучок металлической стружки («жучок»). Для обеспечения электрического контакта «жучок» был плотно прижат электродом к затравке. Полость между электродом и кристаллизатором была заполнена флюсом марки АНФ-6 массой 545 г.

Результаты эксперимента

Пуск установки ЭШП начался через 45 с после включения системы регистрации параметров. Включение питающего трансформатора осуществлялось при напряжении 37 В, при этом ток в ходе этапа «твердого» старта изменялся в пределах от 600 до 1600 А, что свидетельствовало о начале процесса расплавления «жучка» и флюса и образования расплавленной шлаковой ванны. Общая длительность эксперимента составила около 300 с. Переходный процесс формирования шлаковой ванны и выхода на установившийся режим продолжался около 110 с, после чего установившийся режим переплава сохранялся в течение примерно 190 с.

Во время переходного режима работы установки и формирования расплавленной шлаковой ванны были зафиксированы кратковременные повышения тока до значений свыше 5000 А. По-видимому, они были обусловлены короткими замыканиями между электродом и стенкой кокиля через фрагменты «жучка» после его частичного расплавления. В этом случае автоматический режим работы установки предусматривает мгновенное отключение питающего трансформатора и немедленное извлечение электрода до размыкания образовавшегося контакта.

После размыкания контакта и восстановления требуемого электрического сопротивления процесс ЭШП автоматически возобновляется путем повторного ввода электрода. Этот алгоритм работы установки повторяется до полного образования расплавленной шлаковой ванны и стабилизации режима переплава. В ходе установившегося режима оператор вручную регулирует значение тока путем изменения скорости подачи электрода по показаниям амперметра.

На основании данных системы регистрации построены диаграммы изменения тока и напряжения в ходе эксперимента, приведенные на рисунке 7.

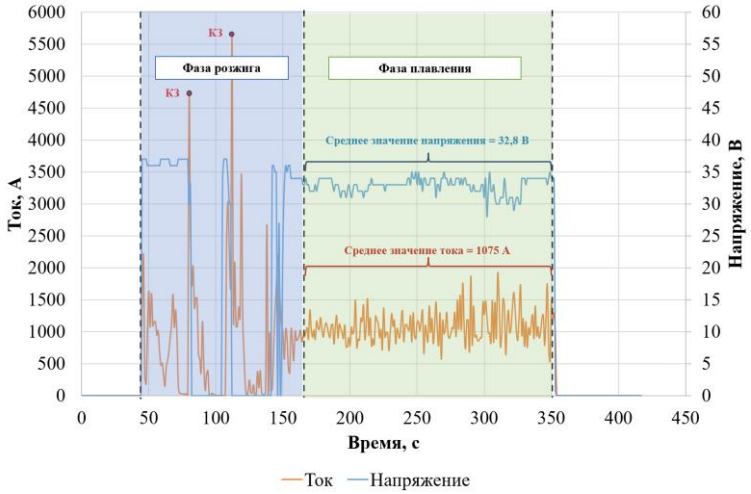


Рисунок 7 – Диаграмма изменения тока и напряжения в ходе эксперимента

На рисунке 8 представлены фрагменты различных стадий процесса электрошлакового переплава, зафиксированные системой видеонаблюдения установки.



начало плавления (160 с) | фаза плавления (160 с – 350 с) | завершение плавления (350 с)

Рисунок 8 – Процесс ЭШП

В ходе неустановившегося режима переплава были зафиксированы выбросы небольшого количества шлака, которые, вероятно, были обусловлены выходом раскаленного газа из внутренней полости трубы через расплавленную шлаковую ванну.

До плавления длина расходуемой части электрода составляла 620 мм, после переплава – 220 мм. Таким образом, во время процесса ЭШП было переплавлено 400 мм электрода, что соответствует массе 2,3 кг. В результате переплава был получен слиток, представленный на рисунке 9. Высота слитка составила около 100 мм, а диаметр – около 60 мм. Полученный слиток имеет правильную цилиндрическую форму с небольшим усечением в верхней части и практически полностью повторяет форму внутренней полости кокиля кристаллизатора.

Внешняя поверхность полученного слитка однородная и гладкая, с характерным металлическим блеском; видимые поверхностные дефекты отсутствуют. В центре верхнего торца слитка имеется углубление – усадочная раковина, характерная для процесса кристаллизации металла в кокиле (рис. 9).



Рисунок 9 – Внешний вид полученного слитка

Выводы

Результаты проведенного эксперимента показали, что установка ЭШП позволяет переплавлять трубчатые металлические изделия. Анализ зарегистрированных значений тока и напряжения позволил определить моменты прерывания процесса ЭШП. Установлено, что основной причиной прерываний являлось возникновение короткого замыкания между электродом и кристаллизатором через фрагменты разрушенного «жучка». Возникновению короткого замыкания способствовали малая величина кольцевого зазора между наружной поверхностью электрода и стенкой кокиля кристаллизатора (2-5 мм), а также недостаточное количество флюса в данном зазоре.

Таким образом, при проведении последующих экспериментов на установке ЭШП с радиоактивными образцами ТРО необходимо обеспечить поперечный размер расходуемой части электрода относительно внутреннего диаметра кокиля кристаллизатора так, чтобы величина кольцевого зазора между электродом и стенкой кокиля составляла не менее 10-15 мм. При этом габаритный диаметр электрода не должен превышать 40 мм. Одним из вариантов выполнения данного требования является смятие трубы вдоль продольной оси с последующей деформацией ее стенок. Кроме того, целесообразно предусмотреть несколько отверстий в верхней части трубы для свободного выхода перегретого газа из ее внутренней полости и предотвращения повышения давления в процессе переплава.

Вместе с тем, металлические ТРО реактора БН-350 не ограничиваются трубчатыми изделиями с наружным диаметром менее 60 мм. Они характеризуются значительным разнообразием геометрических форм и габаритных размеров и могут представлять собой различные изделия, в том числе гаечные ключи, вентили, фланцы и другие металлические элементы сложной геометрической формы. Возможность непосредственной переработки таких изделий на существующей установке ЭШП ограничена сложностью их использования в качестве расходуемых электродов и несоответствием их габаритных размеров рабочим параметрам кристаллизатора.

Следует также отметить что установка ЭШП применяется для лабораторных исследований и не предназначена для использования ее в промышленных масштабов. Однако, реультаты полученные с помощью данной установкой могут послужить основой для создания промышленных установок по электрошлаковому переплаву крупных объемов ТРО.

Также, дальнейшие исследования в области переработки ТРО реактора БН-350 с образцами, не совместимыми по масса-габаритным размерам с существующим кристаллизатором, может послужить основой для разработки новых кристаллизаторов с требуемыми техническими характеристиками, что позволит расширить экспериментальные возможности установки ЭШП.

Проектирование нового медного кокиля требует обязательной оценки его температурного поля, термических напряжений. Для решения этих задач целесообразно применение методов вычислительной гидродинамики. Разработанные ранее расчетные подходы к моделированию теплового состояния электрода и кристаллизатора установки ЭШП [10, 11] могут быть использованы для расчетного обоснования конструкции новых кристаллизаторов для их различного применения.

В расчетных методах используется программный пакет ANSYS, с помощью которого выполняется моделирование теплового состояния кристаллизатора установки ЭШП и омического нагрева электрода. Расчетные подходы позволяют оценивать температурное поле кристаллизатора и электрода, а также наблюдать динамику изменения его температуры.

Список литературы

1. Что такое радиоактивные отходы? / Ю. Амано и др. // IAEA Bulletin. – 2014. – Т. 55, № 3. – С. 3-4.
2. Radioactive Waste: A Review / D. Deng et al // Water Environment Research. – 2020. – Vol. 92, № 10. – P. 1818-1825.
3. Radioactive Waste Treatment Technology: A Review / G. Tochaikul et al // Kerntechnik. – 2022. – Vol. 87, № 2. – P. 208-225.
4. Methods of Thermal Treatment of Radioactive Waste / L. Fuks et al // Energies. – 2022. – Vol. 15, № 1, Art. 375.

5. Santana L.P. Management of Radioactive Waste: A Review / L.P. Santana // Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences. – 2016. – Vol. 6, № 2. – P. 38-43.
6. Walek J. Analysis of Thermophysical Properties of Electro Slag Remelting and Evaluation of Metallographic Cleanliness of Steel / J. Walek, A. Odehnalová, R. Kocich // Materials. – 2024. – Vol. 17, № 18, Art. 4613.
7. Numerical Investigation on the Electroslag Remelting of High Carbon Martensitic Stainless Steels / X. Liu et al // Metals. – 2023. – Vol. 13, № 3, Art. 482.
8. Должиков С.А. Применение электрошлакового переплава для очистки радиоактивно-загрязненного металла / С.А. Должиков, А.В. Пахниц, Н.Е. Мухамедов // Семипалатинский испытательный полигон: наследие и перспективы развития научно-технического потенциала: материалы X Международной конференции (12-14 сентября 2023 г.). – Курчатов: РГП НЯЦ РК, 2023. – С. 47.
9. Очистка стали от радиоактивного загрязнения методом электрошлакового переплава / А.Д. Вурим и др. // Вестник НЯЦ РК. – 2002. – № 1. – С. 34-39.
10. Моделирование омического нагрева электрода установки электрошлакового переплава в программном пакете ANSYS / Е.А. Қабдылқақов и др. // Вестник НЯЦ РК. – 2025. – № 3. – С. 147-155.
11. Моделирование теплового состояния кристаллизатора установки электрошлакового переплава после образования расплава металла / Е.А. Қабдылқақов и др. // Вестник НЯЦ РК. – 2026. – № 2. – С. 167-175.

References

1. Chto takoe radioaktivnye otkhody? / Yu. Amano i dr. // IAEA Bulletin. – 2014. – T. 55, № 3. – S. 3-4. (in Russian).
2. Radioactive Waste: A Review / D. Deng et al // Water Environment Research. – 2020. – Vol. 92, № 10. – P. 1818-1825. (in English).
3. Radioactive Waste Treatment Technology: A Review / G. Tochaikul et al // Kerntechnik. – 2022. – Vol. 87, № 2. – P. 208-225. (in English).
4. Methods of Thermal Treatment of Radioactive Waste / L. Fuks et al // Energies. – 2022. – Vol. 15, № 1, Art. 375. (in English).
5. Santana L.P. Management of Radioactive Waste: A Review / L.P. Santana // Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences. – 2016. – Vol. 6, № 2. – P. 38-43. (in English).
6. Walek J. Analysis of Thermophysical Properties of Electro Slag Remelting and Evaluation of Metallographic Cleanliness of Steel / J. Walek, A. Odehnalová, R. Kocich // Materials. – 2024. – Vol. 17, № 18, Art. 4613. (in English).
7. Numerical Investigation on the Electroslag Remelting of High Carbon Martensitic Stainless Steels / X. Liu et al // Metals. – 2023. – Vol. 13, № 3, Art. 482. (in English).
8. Dolzhikov S.A. Primenenie ehlektroshlakovogo pereplava dlya ochistki radioaktivno-zagryaznennogo metalla / S.A. Dolzhikov, A.V. Pakhnits, N.E. Mukhamedov // Semipalatinskii ispytatel'nyi poligon: nasledie i perspektivy razvitiya nauchno-tekhnicheskogo potentsiala: materialy X Mezhdunarodnoi konferentsii (12-14 sentyabrya 2023 g.). – Kurchatov: RGP NYATs RK, 2023. – S. 47. (in Russian).
9. Ochistka stali ot radioaktivnogo zagryazneniya metodom ehlektroshlakovogo pereplava / A.D. Vurim i dr. // Vestnik NYATs RK. – 2002. – № 1. – S. 34-39. (in Russian).
10. Modelirovanie omicheskogo nagreva ehlektroda ustanovki ehlektroshlakovogo pereplava v programmnom pakete ANSYS / E.A. Қabdylқақov i dr. // Vestnik NYATs RK. – 2025. – № 3. – S. 147-155. (in Russian).
11. Modelirovanie teplovogo sostoyaniya kristallizatora ustanovki ehlektroshlakovogo pereplava posle obrazovaniya rasplava metalla / E.A. Қabdylқақov i dr. // Vestnik NYATs RK. – 2026. – № 2. – S. 167-175. (in Russian).

Информация о финансировании:

Работа проведена в рамках проекта программно-целевого финансирования BR24993118 «НИР по обоснованию выбора и реализации технологии переработки твердых радиоактивных отходов».

Е.А. Қабдылқақов*, Н.Е. Мухамедов, А.С. Сураев, С.А. Должиков, А.В. Пахниц
Филиал «Атом энергия институты» Қазақстан Республикасының Ұлттық ядролық орталығы
180010, Қазақстан Республикасы, Абай облысы, Курчатов қаласы, Бейбіт атом көшесі 10.
*e-mail: kabdylkakov@nnc.kz

БН-350 РЕАКТОРЫНЫҢ ҚАТТЫ РАДИОАКТИВТІ ҚАЛДЫҚТАРЫН ҚАЙТА ӨҢДЕУ ҮШІН ЭШП ҚОНДЫРҒЫСЫН ҚОЛДАНУ

Ядролық қондырғыларды пайдаланудан шығару кезінде түзілетін металл қатты радиоактивті қалдықтарды (ҚРҚ) қайта өңдеу көмуге жататын қалдықтардың көлемін азайтуға мүмкіндік беретін өзекті міндеттердің бірі болып табылады. Зерттеуде БН-350 реакторының металл ҚРҚ-сын қайта өңдеу үшін электрошлактық қайта балқыту (ЭШҚБ) әдісін қолдану мүмкіндігін зерттеу нәтижелері ұсынылған. Эксперимент бұрын ИВГ.1М зерттеу реакторының болат жалын құбырларын радиоактивті ластанудан тазарту кезінде сынақтан өткен ЭШҚБ қондырғысында жүргізілді. БН-350 реакторының ҚРҚ үлгілерінің бірінің имитаторы ретінде өлшемі Ø50×5 мм болатын 12Х18Н10Т болатынан жасалған құбыр фрагменті пайдаланылды. Эксперимент алдында қондырғыны дайындау, жұмсалатын электродты орналастыру және шлак ваннасын қалыптастыру жұмыстары орындалды. Қайта балқыту барысында қондырғының электрлік параметрлері тіркеліп, процестің жүру ерекшеліктеріне талдау жүргізілді. Нәтижесінде 2,3 кг металл қайта балқытылып, диаметрі шамамен 60 мм цилиндр пішінді құйма алынды. Тіркелген ток пен кернеу мәндерін талдау процестің бастапқы кезеңіндегі тұрақсыздық электрод пен кристаллизатордың мыс кокилі арасындағы қысқа тұйықталулармен байланысты болғанын көрсетті. Қысқа тұйықталулар сақиналы саңылаудың аз болуынан және ондағы флюс мөлшерінің жеткіліксіздігінен туындаған. Қондырғының қолданыстағы конфигурациясы құбыр тәрізді металл бұйымдарды қайта балқытуға мүмкіндік беретіні анықталды, алайда қайта өңделетін үлгілердің геометриялық өлшемдері кристаллизатор параметрлерімен және қажетті сақиналы саңылау шамасымен шектеледі. Өлшемдері мен пішіні өзгеше ҚРҚ-ны қайта өңдеу үшін тиісті геометриялық және конструкциялық параметрлері бар кристаллизаторларды әзірлеу қажет.

Түйін сөздер: *қатты радиоактивті қалдық, реактор, электрқожды балқытып қайта өңдеу, кристаллизатор, кокиль.*

Y.A. Kabdylkakov*, N.Y. Mukhamedov, A.S. Suraev, S.A. Dolzhikov, A.V. Pakhnits
Branch «Institute of atomic energy» National nuclear center of Republic Kazakhstan
180010, Republic of Kazakhstan, Abay region, Kurchatov, Beybit atom street 10
*e-mail: kabdylkakov@nnc.kz

APPLICATION OF AN ELECTROSLAG REMELTING FACILITY FOR PROCESSING SOLID RADIOACTIVE WASTE FROM THE BN-350 REACTOR

The processing of solid metallic radioactive waste (SRW) generated during the decommissioning of nuclear facilities is an important task that can reduce the volume of waste requiring disposal. This paper presents the results of a study on the feasibility of applying electroslag remelting (ESR) to process solid metallic radioactive waste from the BN-350 reactor. The experiment was conducted using an ESR facility previously tested for the decontamination of steel flame tubes from the IVG.1M research reactor. A fragment of a 12Cr18Ni10Ti steel tube with dimensions of Ø50×5 mm was used as a surrogate for one of the BN-350 SRW samples. Prior to the experiment, the facility was prepared, the consumable electrode was positioned, and a molten slag bath was formed. During remelting, the electrical parameters of the facility were recorded to analyze the characteristics of the process. As a result, 2.3 kg of metal was remelted, producing a cylindrical ingot approximately 60 mm in diameter. Analysis of the recorded current and voltage values showed that process instability at the initial stage was associated with short circuits between the electrode and the copper mold of the crystallizer. The short circuits were caused by the small annular gap and an insufficient amount of flux within this gap. The results demonstrated that the existing facility configuration enables the remelting of tubular metallic components; however, the geometric dimensions of the processed samples are limited by the crystallizer parameters and the required annular gap. Processing SRW samples of different sizes and shapes therefore requires the development of crystallizers with appropriate geometric and design parameters.

Key words: *solid radioactive waste, reactor, electroslag remelting, crystallizer, copper mold.*

Сведения об авторах

Ержан Асқаруұлы Қабдылқақов* – научный сотрудник лаборатории исследования теплофизических и нейтронно-физических характеристик облучательных устройств филиала «Институт атомной энергии» Национального ядерного центра Республики Казахстан, г. Курчатов,

Республика Казахстан, докторант 2 курса специальности «Техническая физика», исследовательской школы физических и химических наук, Shakarim university, г. Семей, Республика Казахстан; e-mail: kabdylkakov@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3541-2569.

Нуржан Еролович Мухамедов – начальник отдела разработки и испытания реакторных устройств, филиала «Институт атомной энергии» Национального ядерного центра Республики Казахстан, PhD, ассоциированный профессор, г. Курчатов, Республика Казахстан, e-mail: mukhamedov@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6672-180X.

Артур Сергеевич Сураев – ведущий научный сотрудник лаборатории исследования теплофизических и нейтронно-физических характеристик облучательных устройств филиала «Институт атомной энергии» Национального ядерного центра Республики Казахстан, г. Курчатов, Республика Казахстан. PhD, ассоциированный профессор; e-mail: suraev@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5250-2852.

Сергей Александрович Должиков – начальник группы лаборатории испытания реакторного топлива филиала «Институт атомной энергии» Национального ядерного центра Республики Казахстан, город Курчатов, Республика Казахстан, докторант 2 курса специальности «Техническая физика», исследовательской школы физических и химических наук, Shakarim university, г. Семей, Республика Казахстан; e-mail: Dolzhikov@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-9109-7767.

Александр Владимирович Пахниц – заместитель начальника отдела разработки и испытания реакторных устройств филиала «Институт атомной энергии» Национального ядерного центра Республики Казахстан, г. Курчатов, Республика Казахстан; e-mail: pav@nnc.kz.

Автор туралы мәліметтер

Ержан Асқарұлы Қабдылқақов* – Қазақстан Республикасы Ұлттық ядролық орталығы «Атом энергиясы институты» филиалының сәулелендіру құрылғыларының жылуфизикалық және нейтрондық-физикалық сипаттамаларын зерттеу зертханасының ғылыми қызметкері, Курчатов қаласы, Қазақстан Республикасы, Shakarim University, Физика-химия ғылымдары зерттеу мектебінің «Техникалық физика» мамандығы бойынша 2-курс докторанты, Семей қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: kabdylkakov@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3541-2569.

Нұржан Еролович Мухамедов – Қазақстан Республикасы Ұлттық ядролық орталығы «Атом энергиясы институты» филиалының реакторлық құрылғыларды әзірлеу және сынау бөлімінің бастығы, PhD, қауымдастырылған профессор, Курчатов қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: mukhamedov@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6672-180X.

Артур Сергеевич Сураев – Қазақстан Республикасы Ұлттық ядролық орталығы «Атом энергиясы институты» филиалының сәулелендіру құрылғыларының жылуфизикалық және нейтрондық-физикалық сипаттамаларын зерттеу зертханасының жетекші ғылыми қызметкері, PhD, қауымдастырылған профессор, Курчатов қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: suraev@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5250-2852.

Сергей Александрович Должиков – Қазақстан Республикасы Ұлттық ядролық орталығы «Атом энергиясы институты» филиалының реакторлық отынды сынау зертханасының топ бастығы. Курчатов қ., Қазақстан Республикасы, Shakarim University, Физика-химия ғылымдары зерттеу мектебінің «Техникалық физика» мамандығы бойынша 2-курс докторанты, Семей қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: Dolzhikov@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-9109-7767.

Александр Владимирович Пахниц – Қазақстан Республикасы Ұлттық ядролық орталығы «Атом энергиясы институты» филиалының реакторлық құрылғыларды әзірлеу және сынау бөлімінің бастығының орынбасары, PhD, қауымдастырылған профессор, Курчатов қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: pav@nnc.kz.

Information about the authors

Yerzhan A. Kabdylkakov* – Researcher at the Laboratory for Investigation of Thermophysical and Neutron-Physical Characteristics of Irradiation Devices, Branch «Institute of Atomic Energy» of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Republic of Kazakhstan, Second-year PhD student in Technical Physics at the Research School of Physical and Chemical Sciences, Shakarim University, Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: kabdylkakov@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3541-2569.

Nurzhan E. Mukhamedov – Head of the Department for Development and Testing of Reactor Devices, Branch «Institute of Atomic Energy» of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Republic of Kazakhstan, PhD, Associate Professor, e-mail: mukhamedov@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6672-180X.

Artur S. Suraev – Leading Researcher at the Laboratory for Investigation of Thermophysical and Neutron-Physical Characteristics of Irradiation Devices, Branch «Institute of Atomic Energy» of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Republic of Kazakhstan, PhD, Associate Professor; e-mail: suraev@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5250-2852.

Sergey Aleksandrovich Dolzhikov – Head of Group, Reactor Fuel Testing Laboratory, Institute of Atomic Energy Branch of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Republic of Kazakhstan. Second-year doctoral student in Technical Physics at the Research School of Physical and Chemical Sciences, Shakarim University, Semey, Republic of Kazakhstan, e-mail: Dolzhikov@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-9109-7767.

Aleksandr Vladimirovich Pakhnits – Deputy Head of the Department of Development and Testing of Reactor Devices, Institute of Atomic Energy Branch of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Republic of Kazakhstan; e-mail: pav@nnc.kz.

Поступила в редакцию 06.06.2026
Поступила после доработки 11.09.2026
Принята к публикации 16.09.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-77

ҒТАХР: 31.15.33

BY 4.0

Check for updates

А.Ж. Бекей[1], Ф. Вакандио[2], Т.В. Шакиева[1], Г.Е. Ергазиева[3], Х. Авчукир[*]

[1]Жаңа химиялық технологиялар және материалдар ғылыми зерттеу институты,
әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Төле би к. 96а, Алматы қ., Қазақстан

[2]Экс-Марсель университеті,
Эскадрилья Нормандия-Неман к. 52, Марсель қ., Франция

[3]Жану проблемалары институты,
Бөгенбай батыр к. 172 А, Алматы қ., Қазақстан

*e-mail: khaisa.avchukir@kaznu.edu.kz

СҮТ ҚЫШҚЫЛЫ-НАТРИЙ ДОДЕЦИЛСУЛЬФАТЫ ЖҮЙЕСІНДЕ ЭЛЕКТРТҰНДЫРЫЛҒАН МЫС КАТАЛИЗАТОРЛАРЫНЫҢ НУКЛЕАЦИЯСЫ МЕН ҚҰРЫЛЫМДЫҚ ЕРЕКШЕЛІКТЕРІ

Аңдатпа: *CO_2-ні электрхимиялық тотықсыздандыруға (CO_2RR) арналған белсенді мыс катализаторларын бағытты түрде алу үшін сүт қышқылы-натрий додецилсульфаты жүйесіндегі мыс электркристалдануының нуклеация-өсу заңдылықтары зерттелді. Электрхимиялық зерттеулер циклдық вольтамперометрия және хроноамперометрия әдістерімен жүргізілді. Мыс тұнбалары 0,04 М $CuCl_2$ + 3 М $C_3H_6O_3$ + 0,14 М ДДС (pH 4,0) ерітіндісінен шыны көміртек электродына –0,35 В потенциалда және 60 °С температурада алынды. Тұндыру потенциалының – 0,15 В-тен – 0,35 В-қа дейін теріс ығысуы нуклеация орталықтарының түзілуін жеделдетіп, бөлшек радиусының 12,57-ден 1,34 мкм-ге дейін төмендеуіне әкелді.*

Құрылымдық-морфологиялық талдау алынған мыс тұнбаларының көпқырлы құрылым түзетінін және Cu(111) басым кристаллографиялық бағдарланумен сипатталатынын көрсетті. CO_2-мен қанықтырылған 0,5 М $NaHCO_3$ ерітіндісінде бұл мыс тұнбалары поликристалды коммерциялық мыс электродымен салыстырғанда CO_2RR-дің жоғары катодтық ток тығыздығын қамтамасыз етті. Электрхимиялық импеданстық спектроскопия (EIS) нәтижелері, заряд тасымалдау кедергісінің 107,8-ден 36,5 Ом·см^2-ге дейін төмендеуі наноқұрылымды мыс бетінде электрод/электролит шекарасында заряд тасымалданудың жеңілдегенін көрсетті. Осылайша, сүт қышқылы-натрий додецилсульфаты ортасында электртұндыру арқылы алынған құрылымы реттелетін мыс тұнбалары CO_2-нің электртотықсыздану реакциясына арзан әрі перспективалы электркатализаторлар ретінде қарастырылуы мүмкін.

Түйін сөздер: *Электртұндыру, сүт қышқылы, натрий додецилсульфаты, мыс, көміртегі қос тотығын электрхимиялық тотықсыздандыру.*

1. Кіріспе

Мыс негізді катализаторлар CO_2-нің электрхимиялық тотықсыздану реакциясында (eCO_2RR) ерекше орын алады, себебі Cu C_1, C_2 және одан жоғары көміртекті өнімдерді түзе алатын санаулы металдардың бірі болып табылады. Алайда Cu катализаторларының белсенділігі мен өнім селективтілігі тек химиялық құрамымен ғана емес, ең алдымен беттің құрылымдық ұйымдасуымен анықталады. Кристаллографиялық қырлар, дефекттер, сатылы қадамдар, жиектер, дән шекаралары, нақты электрхимиялық белсенді бет ауданы және электрод маңындағы микроорта CO аралық түрлерінің беттік қамтылуына, сутегі бөліну реакциясымен (HER) бәсекеге және C-C байланысының түзілу ықтималдығына тікелей әсер етеді [1]. Бұл құрылым-қасиет байланысы монокристалды мыс беттерінде айқын байқалады: Cu(100) беттері этилен түзілуіне, ал Cu(111) беттері метан түзілуіне көбірек бейімділік танытатыны көрсетілген [2]. Дегенмен монокристалды модельдік жүйелердің практикалық шектеулері поликристалды және наноқұрылымды Cu катализаторларына қызығушылықты арттырды. Наноқұрылымдану нәтижесінде төмен координацияланған атомдардың, дефекттік

©А.Ж. Бекей, Ф. Вакандио, Т.В. Шакиева, Г.Е. Ергазиева, Х. Авчукир, 2026

орталықтардың және жоғары индексті қырлардың үлесі артып, eCO_2RR аралық түрлерінің адсорбциясы мен реакциялық тармақталуы өзгереді. Мұндай беттер *CO қамтылуын арттырып, CO-CO жұптасуын және C_{2+} өнімдерінің түзілуін жеңілдетуі мүмкін [3]. Алайда CO қамтылуының жоғары болуы C_{2+} өнімдерінің селективті түзілуіне әрдайым жеткілікті шарт емес. Өте ұсақ Cu нанобөлшектерінде, әсіресе 5 нм-ден төмен өлшемдерде, CO түзілуі күшейіп, көмірсутектердің түзілуі басылатыны хабарланған [4]. Сондықтан тиімді CO_2RR үшін CO тұрақтануы, көршілес белсенді орталықтардың сақталуы, масса алмасу жағдайы және HER-мен бәсекенің шектелуі өзара үйлесуі қажет. Әдеби деректер Cu морфологиясын мақсатты түрде басқару арқылы CO_2RR өнімдерінің таралуын өзгертуге болатынын көрсетеді. 50-100 нм диапазонындағы мыс нанобөлшектері, дефектке бай призмалық құрылымдар және in situ түзілетін нанокуб-доминантты беттер этилен түзілуін күшейтетіні анықталған [5–7]. Кубтәрізді мыс нанокристалдары белгілі бір өлшем диапазонында C_2 өнімдеріне қолайлы болса, аса кеуекті немесе дендриттік құрылымдарда микроорта мен масса алмасу ерекшеліктеріне байланысты өнімдердің таралуы басқа бағытқа ығысуы мүмкін [8,9]. Сонымен қатар мыс нанокристалдарының пішіні де маңызды: куб тәрізді және додекаэдр тәрізді құрылымдар этилен мен этанол түзілуіне бейім болса, октаэдр тәрізді мыс көбіне C_1 өнімдерінің түзілуіне қолайлы екені көрсетілген [10]. Дефекттік орталықтардың рөлі C_2 өнімдерімен ғана шектелмей, C_3 өнімдерінің түзілуіне де әсер етуі мүмкін [11].

Осы тұрғыдан алғанда, электртұндыру Cu катализаторларының морфологиясын, дефектілік дәрежесін және нақты белсенді бет ауданын салыстырмалы түрде қарапайым әрі басқарылатын жолмен реттеуге мүмкіндік береді. Электртұндыру кезінде катализатордың соңғы құрылымы тек қолданылған потенциалмен ғана емес, электролит құрамымен, комплекс түзуші компоненттермен, беттік-белсенді қоспалармен және олардың нуклеация мен өсу кинетикасына әсерімен де анықталады. Сондықтан тұндыру ортасының химиялық табиғатын түсіну Cu негізді катализаторлардың құрылымы мен кейінгі eCO_2RR белсенділігі арасындағы байланысты ашу үшін маңызды. Соған қарамастан, сүт қышқылы мен натрий додецилсульфаты қатысындағы ортада мыс электртұндыру үдерісінің кинетикалық ерекшеліктері, нуклеация механизмі, морфология түзілуі және алынған катализаторлардың eCO_2RR жағдайындағы электркаталитикалық белсенділігі арасындағы байланыс жүйелі түрде қарастырылмаған. Осы жұмыста аталған жүйеде мыстың электрхимиялық тұну үдерісі зерттеліп, тұндыру ортасының мыс нуклеациясына, өсу сипатына, бет морфологиясына және нақты белсенді бет ауданына әсері анықталды. Алынған нәтижелер Cu катализаторларында нуклеация сипаты мен морфологияның нақты белсенді бет ауданына және кейінгі eCO_2RR белсенділігіне әсерін айқындауға мүмкіндік береді.

2. Тәжірибелік бөлім

Мыстың электрхимиялық тотықсыздануын зерттеу үшін құрамында 0,04 M CuCl2, 3 M сүт қышқылы (C3H6O3) және 0,14 M натрий додецилсульфаты (ДДС) бар электролит қолданылды. Электрхимиялық тұндыру: 0,04 M CuCl2 + 3 M C3H6O3 + 0,14 M ДДС ерітіндісінде жүргізілді. pH мәні 4,0-ге дейін 1,0 M NaOH ерітіндісі көмегімен реттелді және тәжірибелер 60 °C температурада [12] әдебиетте келтірілген әдістемеге сүйене отырып жүргізілді. Әрбір эксперимент кемінде үш реттен жүргізілді. Барлық электрхимиялық зерттеулер Autolab PGSTAT 302N потенциостат/гальваностат құрылғысында орындалды. Жұмысшы электрод ретінде геометриялық ауданы 0,07 см2 шыны көміртек электроды (GCE) қолданылды. Электродтың беті алюминий оксиді суспензиясымен мұқият өңделді. Күміс/күміс хлоридті электроды салыстырмалы электрод ретінде, ал платина электроды қарсы электрод ретінде қолданылды.

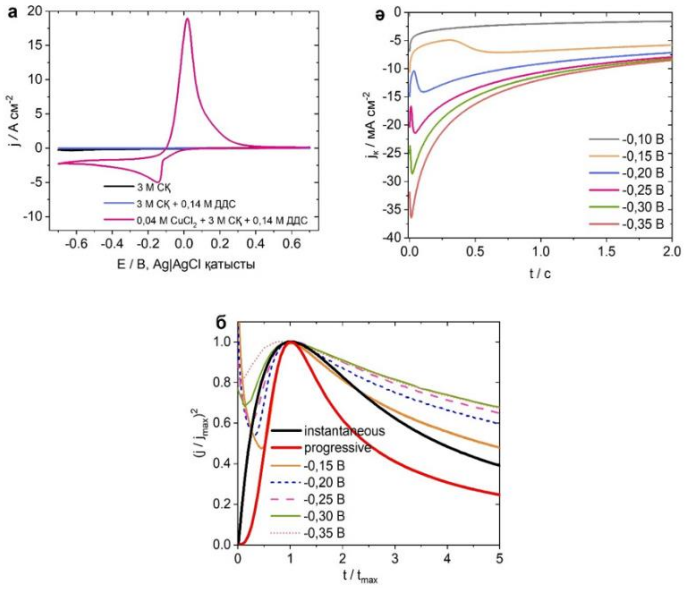
Циклдық вольтамперометриялық зерттеулер 10 мВ/с сканерлеу жылдамдығында орындалды. Ал хроноамперометриялық өлшеулер жаңа фазаның түзілуін зерттеу мақсатында тұрақты потенциал режимінде жүргізілді. Нуклеация үдерісінің ерекшеліктерін бағалау үшін потенциал –0,15 В-тен –0,35 В аралығында өзгертілді. Мыс катализаторы GCE электродында –0,35 В потенциалда pH=4,0 және T=60 °C температурада 20 мин бойы электртұндырылды. Электртұндырылған мыс құрылымдарының морфологиясы сканерлеуші электрондық микроскопия (СЭМ) әдісімен зерттелді. Үлгілердің фазалық құрамы мен кристаллографиялық құрылымы рентгендік дифракция (XRD) әдісімен анықталды.

Электродтардың салыстырмалы электрхимиялық белсенді ауданын бағалау үшін қос электрлік қабат сыйымдылығы (Cdl) N2-мен қанықтырылған 0,5 M NaHCO3 ерітіндісінде фарадейлік емес потенциал аймағында тіркелген циклдық вольтамперометриялық қисықтары негізінде анықталды. Электртұндырудан кейін Cu катализаторы этанолмен және бидистилденген сумен шайылып, кептірілді. Циклдық вольтамперометриялық қисықтар GCE үшін 5-40 мВ/с, ал электртұндырылған Cu катализаторы үшін 10-50 мВ/с сканерлеу жылдамдықтарында алынды. Cdl мәнін есептеу үшін әр электродтың фарадейлік емес аймағынан тұрақты потенциал таңдалды: GCE үшін E=−0,04 В, ал Cu катализаторы үшін E=−0,08 В. Осы потенциалдарда анодтық (ja) және катодтық (jc) тоқ тығыздықтары әртүрлі сканерлеу жылдамдықтарында анықталып, олардың сканерлеу жылдамдығына тәуелділігі жеке тұрғызылды. Алынған сызықтық тәуелділіктердің анодтық және катодтық көлбеулері сәйкесінше ka және kc деп белгіленді. Қос электрлік қабат сыйымдылығы Cdl=(ka−kc)/2 теңдеуі бойынша есептелді.

Алынған мыс катализаторларының CO2-нің электртотықсыздану белсенділігі сызықты вольтамперометрия, электрхимиялық импеданстық спектроскопия және хроноамперометрия әдістерімен бағаланды. Сызықты вольтамперограммалар N2 және CO2-мен қанықтырылған 0,5 M NaHCO3 ерітіндісінде 10 мВ/с сканерлеу жылдамдығында түсірілді. Электрхимиялық импеданстық спектроскопия E = –0,6 В потенциалда (Ag/AgCl-ге қатысты), 0,01 В синусоидалық амплитудада және 0,1 Гц-100 кГц жиілік аралығында жүргізілді. Найквист диаграммаларын Рэндлс эквиваленттік сызбасымен модельдеу арқылы заряд тасымалдану кинетикасын сипаттайтын параметр есептелді. Катализатор тұрақтылығын бағалау үшін хроноамперометриялық өлшеулер CO2-мен қанықтырылған 0,1 M KHCO3 ерітіндісінде – 0,6 В-тен –1,0 В-қа дейінгі потенциалда (Ag/AgCl-ге қатысты) потенциалдар аралығында 2 сағат бойы жүргізілді.

3. Зерттеу нәтижелері және талқылау

Мыстың электрхимиялық тотықсыздану-тотығуы шыны көміртек электроды бетінде сүт қышқылы және натрий додецилсульфаты ортасында циклдық вольтамперометрия әдісімен зерттелініп, мыстың разряд-иондану вольтамперограммасы алынды (сурет 1а). Фондық электролит – сүт қышқылы (СҚ) мыстың разряд-иондану потенциалы аймағында тұрақты екенін, бөгде реакциялардың жүрмейтінін Сурет 1 а келтірілген циклдық вольтамперограммадан көруге болады. Ерітіндіге 0,14 М ДДС қосу ешқандай қосымша реакцияға алып келмейді, тоқ нөлге тең. Яғни, ДДС беттік белсенді зат ретінде тек электрод бетін бүркемелеп, электрхимиялық тұнатын мыстың құрылымдануына ғана әсер етеді десек болады.

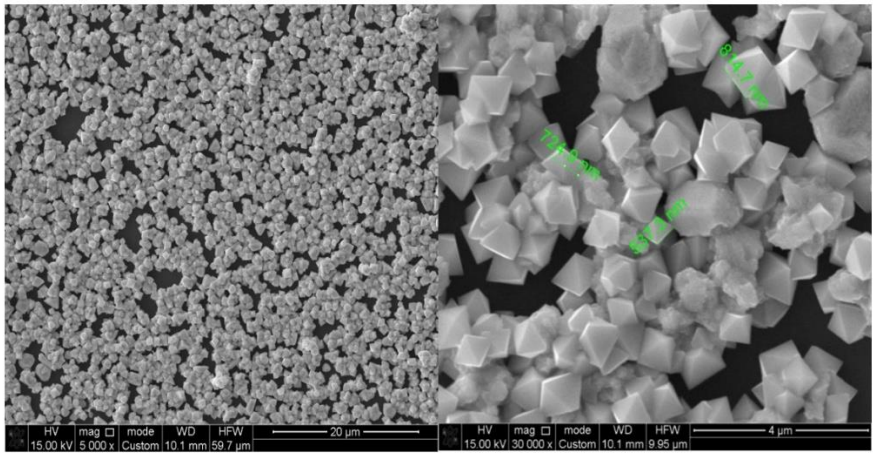


Сурет 1 – GCE электродында 0,04 М $CuCl_2$ + 3 М СҚ + 0,14 М ДДС ерітіндісінде тіркелген: (а) циклдық вольтамперограммалар; (ә) әртүрлі потенциалдарда алынған хроноамперометриялық қисықтар; (б) тәжірибелік хроноамперометриялық қисықтардың $(j/j_{max})^2 – t/t_{max}$ өлшемсіз тоқ транзиенттерінің Шарифкер-Хиллс теориялық модельдерімен салыстырылуы.Өлшеу шарттары: pH = 4, T = 60 °C және *v* = 10 мВ/с

Жүйеде 0,04 М мыс(II) хлориді қосылғанда ғана катодтық және анодтық шыңдар тіркеліп, мыстың разряд-иондануын айқын көрсетті. Бұл жұмыстағы электролиттің: 0,04 М $CuCl_2$ + 3 М СҚ + 0,14 М ДДС ерекшелігі мыстың тотықсыздануы –0,15 В потенциалдағы тек бір катодтық шыңмен ($Cu^{2+} + 2e^- = Cu^0$) сипатталады (Сурет 1 а). Ал өзге сулы және су-органикалық орталарда мыстың электртотықсыздануы екі катодтық шың беріп, сатылай өтеді [13]. Соған ұқсас, мыстың +0,1 В-тағы шыңға сәйкес анодтық еруі де жалқы шыңмен ерекшеленіп ($Cu^0 – 2e^- = Cu^{2+}$), Cu тотығуының СҚ-ДДС жүйесінде сатылай механизмге бағынбайтынын көрсетеді. Бұл өзгешеліктер көп мөлшердегі 3 М СҚ ортасының, Cu^{2+}–лактат комплексінің түзілуі және электрод-электролит беттердің бөлу шекарасындағы беттік белсенді зат ДДС адсорбциялану ерекшеліктерімен байланысты.

Тәжірибелік тоқ-уақыт қисықтары (Сурет 1ә) электрхимиялық кристалдану үдерісінің потенциалға тәуелді өтетінін көрсетті. Асқын кернеуді арттыру электрод бетінде тұнып жатқан белсенді мыс орталықтарының артуына алып келетіні расталды. Осыған дейінгі зерттеулерде келтірілгендей [14], тоқ-уақыт қисықтарын белгілі Шарифкер-Хиллс моделі негізінде талдау мыстың жаңа фаза түзу-кристалдану сатысы лездік (instantaneous) механизммен жүретіні анықталды.

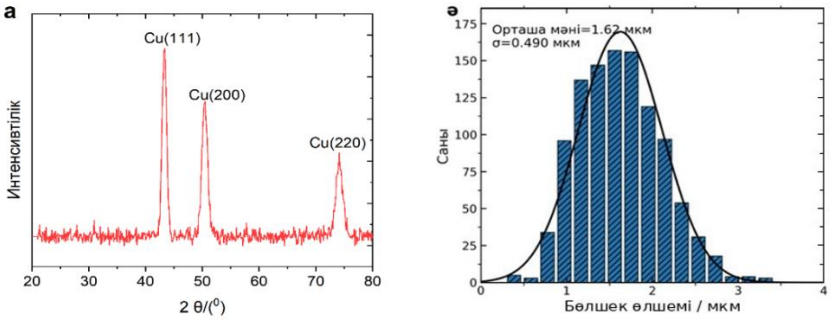
СЭМ кескіндері электртұндырылған мыс бөлшектерінің айқын фасеттелген көпқырлы морфология түзетінін көрсетті. СЭМ кескіндерінде бөлшектердің қырлары мен жазық беттері анық байқалады, бұл олардың кубооктаэдр тәрізді көпқырлы морфологияға жақын екенін көрсетеді. Бөлшектердің өлшемдері негізінен 500-800 нм аралығында шоғырланған (Сурет 2).



Сурет 2 – 0,04 М $CuCl_2$ + 3 М СҚ + 0,14 М ДДС, pH = 4 ерітіндісінен –0,35 В потенциалда және 60 °С температурада GCE бетінде тұндырылған мыс бөлшектерінің СЭМ кескіндері

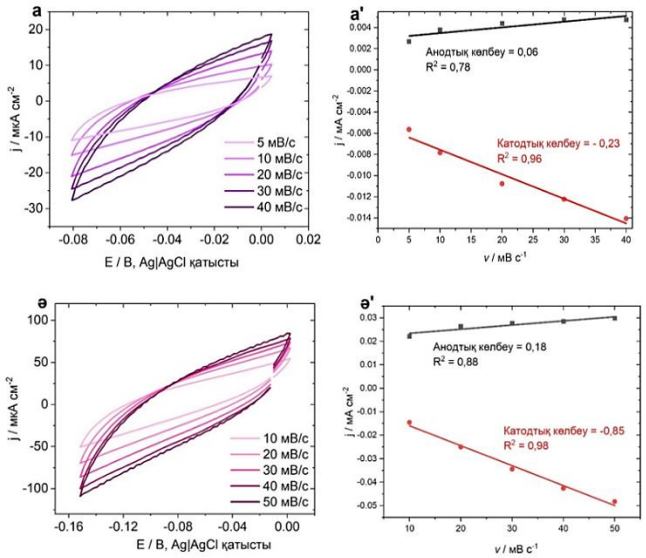
Мұндай морфология кристалл қырларының селективті экспозициясын қамтамасыз етіп, бөлшектердің жоғары кристалдық сипатқа ие екенін көрсетеді. ДДС молекулалары кристалл өсуін бағыттап, бөлшектердің дұрыс геометриялық формасын қалыптастыруға ықпал етеді. Сонымен қатар, электролит құрамына сүт қышқылының енгізілуі Cu^{2+} иондарымен кешен түзіп, олардың электрод бетіне миграциясы мен разрядына әсер етеді. Каталитикалық тұрғыдан алғанда, мұндай көпжақты құрылымдар беткі белсенді орталықтардың тығыздығын арттырып, иондардың диффузиясын жеңілдетеді. Нәтижесінде электркаталитикалық реакциялардың қарқындылығы айтарлықтай жоғарылайды.

СЭМ әдісімен анықталған морфологиялық ерекшеліктер рентгенқұрылымдық талдау (XRD) нәтижелерімен толықтырылды. $2\theta \approx 43{,}3°$, 50,4° және 74,1° мәндеріндегі дифракциялық шыңдар сәйкесінше Cu(111), Cu(200) және Cu(220) жазықтықтарына тән болып, металл мыс фазасының түзілгенін көрсетеді (Сурет 3а). Cu(111) шыңының басымдығы тұнбаның осы кристаллографиялық бағыт бойынша артық бағдарланғанын айғақтайды. Cu_2O және CuCl сияқты екіншілік фазаларға тән шыңдардың байқалмауы алынған тұнбаның фазалық тазалығын көрсетеді (Сурет 3ә). Бұл нәтижелер жоғарыда талданған электрхимиялық кристалдану ерекшеліктерімен үйлесіп, ДДС пен лактат иондарының бірлескен әсері мыс нуклеациясы мен кристалдардың бағытталған өсуін реттеуге ықпал ететінін көрсетеді.



Сурет 3 – (а) 2-суретте келтірілген шарттарда электртұндырылған мыс бөлшектерінің рентгендік дифракциялық спектрі; (ә) СЭМ бейнелерін сандық өңдеу арқылы алынған мыс бөлшектерінің өлшемдік таралу гистограммасы

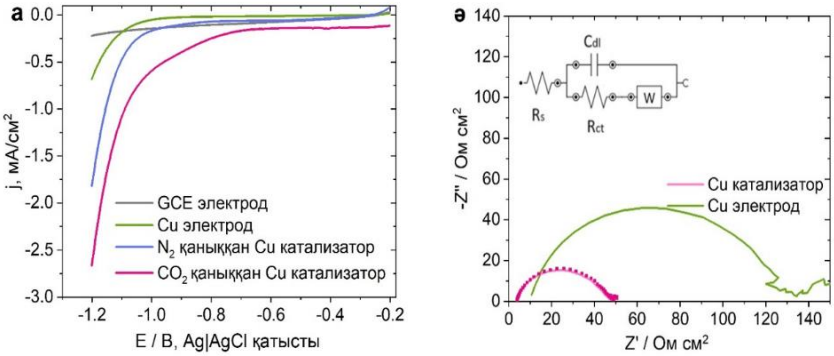
Қос электрлік қабат сыйымдылығының нәтижелері электртұндырылған Cu катализаторының электрхимиялық қолжетімді бет ауданы артқанын көрсетті. GCE үшін C_{dl} мәні 143 мкФ/см^2 болса, кубооктаэдр тәрізді көпқырлы Cu катализаторы үшін бұл көрсеткіш 513 мкФ/см^2-қа дейін өсті. Яғни электртұндырылған Cu бетінде C_{dl} мәні GCE-мен салыстырғанда шамамен 3,6 есе жоғары болды. Бұл айырмашылық электртұндыру нәтижесінде түзілген көпқырлы Cu морфологиясының электрхимиялық қолжетімді бет ауданын ұлғайтқанын көрсетеді. Мұндай құрылым CO_2RR кезінде электрод/электролит шекарасындағы заряд алмасу мен аралық бөлшектердің түзілуіне қолайлы жағдай жасап, катализатордың электрхимиялық белсенділігін арттыруға ықпал етуі ықтимал (Сурет 4).



Сурет 4 – Қос электрлік қабат сыйымдылығын бағалау үшін әртүрлі сканерлеу жылдамдықтарында алынған циклдық вольтамперограммалар: (а) шыны көміртек электроды (GCE); (ә) электртұндырылған Cu катализаторы

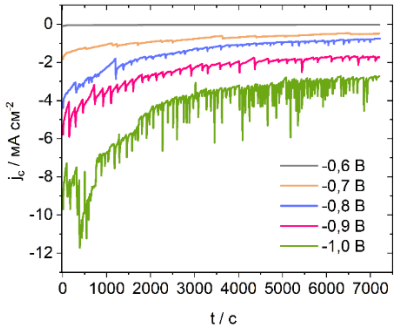
Осылайша, морфология, кристаллографиялық бағдарлану және Cdl нәтижелері электртұндырылған Cu бетінің CO_2RR кезіндегі электрхимиялық қасиеттеріне әсер етуі мүмкін екенін көрсетеді. Бұл әсерді бағалау үшін N_2 және CO_2-мен қанықтырылған 0,5 M $NaHCO_3$ ерітіндісінде сызықтық вольтамперлік өлшеулер жүргізілді. 0,5 M $NaHCO_3$ ерітіндісінде N_2 және CO_2 атмосфераларында алынған сызықтық вольтамперлік қисықтар электртұндырылған кубооктаэдр тәрізді көпқырлы Cu электродының поликристалды мыспен салыстырғанда жоғары катодтық тоқ тығыздығын қамтамасыз ететінін көрсетті (Сурет 5 а). Бұл электродта eCO2RR реакцияның басталу потенциалы – 0,82 В тіркеліп, поликристалды мыспен (-0,94 В) салыстырғанда 120 мВ-қа оң мәнге ығысқан, яғни реакция төменірек асқын кернеуде жүретінін көрсетеді. CO_2 және N_2 – мен қаныққан ерітінділерді салыстыру CO_2 тотықсызданууының сутек түзілу реакциясымен қатар жүретінін көрсетті. Анықталған бұл жоғары белсенділік электрхимиялық тұндырылған мыстың беткі ауданының ұлғаюымен және белсенді

орталықтардың көптігімен байланысты болуы мүмкін. Сонымен қатар, электрхимиялық импеданстық спектроскопиялық талдау заряд тасымалдау кедергісінің поликристалды мыстағы 107,8 Ом·см^2-ден электртұндырылған мыс үшін 36,5 Ом·см^2-ге дейін төмендегенін көрсетті, бұл наноқұрылымды бетте заряд алмасу кинетикасының жақсарғанын айғақтайды (Сурет 5 ә).



Сурет 5 – (а) N_2 және CO_2-мен қанықтырылған 0,5 М $NaHCO_3$ ерітіндісіндегі GCE, поликристалды мыс электроды және электртұндырылған мыс бетінде алынған сызықты вольтамперограммалар, *v* =10 мВ/с; (ә) CO_2-мен қанықтырылған 0,5 М $NaHCO_3$ ерітіндісінде 25 °С температурада −0,60 В (RHE-ге қатысты) потенциалда тіркелген мыс электродтарының Найквист қисықтары

CO_2 тотықсыздану үдерісінің кинетикасы мен тұрақтылығын тереңірек зерттеу үшін –0,6-дан –1,0 В-қа дейінгі потенциалдарда хроноамперометриялық өлшеулер жүргізілді. Нәтижелер катализатордың тұрақты жұмыс істейтінін көрсетті (Сурет 6). Потенциал теріс мәнге ығысқан сайын катодтық ток тығыздығы артып, реакция кинетикасының күшейгені байқалды. –1,0 В потенциалда токтың айқын тербелістері байқалды, бұл сутек түзілу реакциясының қарқын алғандығымен байланысты болуы мүмкін.



Сурет 6 – CO_2-мен қанықтырылған ерітіндіде электрхимиялық тұндырылған мыс катализаторы бетінде тіркелген хроноамперограммалар

Кесте 1-де eCO_2RR кезінде C_{2+} өнімдерінің түзілуіне бейімділік көрсеткен мыс негізді нанокатализаторлардың әдеби деректердегі негізгі электркаталитикалық көрсеткіштері жинақталды. Бұл мәліметтер Cu катализаторларының өнім селективтілігі беттің морфологиясы, кристаллографиялық құрылымы, электролит құрамы және жұмыс потенциалы сияқты өзара байланысты факторлармен анықталатынын көрсетеді. Осы жұмыста алынған электртұндырылған Cu катализаторының өнімдік құрамы хроматографиялық әдістермен анықталмағандықтан, ол Фарадейлік тиімділік (FE) мәндері бойынша тікелей салыстыруға енгізілген жоқ. Дегенмен CO_2-қанықтырылған ортада жоғары катодтық ток тығыздығының байқалуы, заряд тасымалдану кедергісінің төмендеуі және тоқтың уақыт бойынша салыстырмалы тұрақтылығы СҚ-ДДС ортасында түзілген құрылымданған мыс бетінің eCO_2RR үшін тиімді электркаталитикалық жүйе екенін көрсетеді.

Кесте 1 – CO_2RR кезінде C_{2+} өнімдеріне бағытталған әртүрлі мыс негізді нанокатализаторлардың электркаталитикалық көрсеткіштері

Мыс негізді катализаторлар	Негізгі C_{2+} өнімдері	FE, %	Тоқ тығыздығы, мА/см^2	Электролит	E, В RHE-ге қатысты	Әдебиет
Cu наножіпшелер	C_2H_4	41	100	1 М KOH	-	[15]
Cu_2O нанокубтары	C_{2+} өнімдері	50	200	1 М KOH	-	[16]
Cu_2O@Cu-BTC-0,5	C_2H_5OH	58,5	-	0,1 М $KHCO_3$	-	[17]
Жоғары реттелген CuO_x наноқұрылымдар	C_2H_5OH	63,8	232,8	3 М KOH	–1,20	[18]
Cu(100)-қырлары басым құрылымдар	C_2H_4	72	359	1 М KCl	–1,28	[19]
Кеуекті Cu наноленталары	C_{2+} өнімдері	40	-	0,1 М $KHCO_3$	–0,63	[20]
Наноқұрылымды Cu	C_2H_4	15,2	-	0,1 М $KHCO_3$	–1,00	[21]
Cu_2O нанокристалдары	C_2H_4	92	212	1,0 KOH	–0,65	[22]
Cu NPs /NG	C_2H_4	19	-	0,5 М $KHCO_3$	–0,90	[23]
Cu NPs/NG	C_2H_5OH	63	-	0,1 М $KHCO_3$	–1,20	[24]
Графит/көміртек NPs/Cu/PTFE	C_2H_4	70	75-100	7,0 М KOH	–0,55	[25]

Қорытындылай келе, 3 М сүт қышқылы ортасында мыс электртұндыру үдерісі кинетикалық тұрғыдан қарқынды жүретіні анықталды. Натрий додецилсульфатын беттік-белсенді қоспа ретінде қолдану құрылымданған және салыстырмалы біркелкі мыс бөлшектерінің түзілуіне ықпал етті. Алынған мыс тұнбалары CO_2-нің электрхимиялық тотықсыздануы кезінде жоғары катодтық ток тығыздығын көрсетіп, 2 сағат бойы салыстырмалы тұрақты жұмыс істеді. Бұл нәтижелер СҚ-ДДС ортасында электртұндыру арқылы алынған құрылымданған мыс беттерін еCO_2RR үшін қолайлы электркаталитикалық материал ретінде қарастыруға негіз береді.

Қорытынды

Бұл жұмыста сүт қышқылы мен натрий додецилсульфаты қатысындағы ортада мыс катализаторларын электртұндыру арқылы алу зерттелді. Зерттеу нәтижелері электркристалдану процесінің потенциалға тәуелді екенін және ДДС пен лактат иондарының кристалл құрылымын бағыттайтынын көрсетті. Алынған мыс бөлшектері жоғары кристалдылықпен және Cu(111) жазықтығының басымдығымен сипатталды. Мұндай құрылым олардың электрохимиялық қасиеттерін жақсартып, көміртегі қостотығын тотықсыздандыруда жоғары каталитикалық белсенділік көрсетті. Сонымен қатар, электртұндырылған мыс катализаторы төмен асқын кернеумен және жоғары ток тығыздығымен ерекшеленді. Импеданстық талдау заряд тасымалдаудың жеңілдегенін дәлелдеді, бұл наноқұрылымды беттің тиімділігін көрсетеді. Жалпы, алынған нәтижелер бұл жүйеде синтезделген мыс катализаторлары CO_2 электртотықсыздануы үшін болашағы зор әрі тиімді материал екенін айқындайды.

Әдебиеттер тізімі

1. Engineering strategies in the rational design of Cu-based catalysts for electrochemical CO_2 reduction: from doping of elements to defect creation / S. Yousaf et al // Materials Advances. – 2024. – Vol. 5, № 20. – P. 7891-7978. https://doi.org/10.1039/D4MA00321G.
2. Electrochemical reduction of carbon dioxide at various series of copper single crystal electrodes / Y. Hori et al // Journal of Molecular Catalysis A: Chemical. – 2003. – Vol. 199, № 1-2. – P. 39-47. https://doi.org/10.1016/S1381-1169(03)00016-5.
3. Grain-Boundary Engineering Boosted Undercoordinated Active Sites for Scalable Conversion of CO_2 to Ethylene / Y. Zhang et al // ACS Nano. – 2024. – Vol. 18, № 27. – P. 17483-17491. https://doi.org/10.1021/acsnano.3c12662.
4. Particle Size Effects in the Catalytic Electroreduction of CO_2 on Cu Nanoparticles / R. Reske et al // Journal of the American Chemical Society. – 2014. – Vol. 136, № 19. – P. 6978-6986. https://doi.org/10.1021/ja500328k.
5. The importance of surface morphology in controlling the selectivity of polycrystalline copper for CO_2 electroreduction / W. Tang et al // Physical Chemistry Chemical Physics. – 2012. – Vol. 14, № 1. – P. 76-81. https://doi.org/10.1039/C1CP22700A.
6. Prism-Shaped Cu Nanocatalysts for Electrochemical CO_2 Reduction to Ethylene / H.S. Jeon et al // ACS Catalysis. – 2018. – Vol. 8, № 1. – P. 531-535. https://10.1021/acscatal.7b02959.

7. Roberts F.S. High selectivity for ethylene from carbon dioxide reduction over copper nanocube electrocatalysts / F.S. Roberts, K.P. Kuhl, A. Nilsson // Angewandte Chemie International Edition. – 2015. – Vol. 54, № 17. – P. 5179-5182. https://doi.org/10.1002/anie.201412214.
8. Mechanistic Insights into the Selective Electroreduction of Carbon Dioxide to Ethylene on Cu_2O-Derived Copper Catalysts / A.D. Handoko et al // The Journal of Physical Chemistry C. – 2016. – Vol. 120, № 36. – P. 20058-20067. https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.6b07128.
9. Porous dendritic copper: an electrocatalyst for highly selective CO_2 reduction to formate in water/ionic liquid electrolyte / T.N. Huan et al // Chemical Science. – 2017. – Vol. 8, № 1. – P. 742-747. https://doi.org/10.1039/C6SC03194C.
10. Morphology Manipulation of Copper Nanocrystals and Product Selectivity in the Electrocatalytic Reduction of Carbon Dioxide / N.-T. Suen et al // ACS Catalysis. – 2019. – Vol. 9, № 6. – P. 5217-5222. https://doi.org/10.1021/acscatal.9b00790.
11. Mechanistic Insights into the Enhanced Activity and Stability of Agglomerated Cu Nanocrystals for the Electrochemical Reduction of Carbon Dioxide to n-Propanol / D. Ren et al // The Journal of Physical Chemistry Letters. – 2016. – Vol. 7, № 1. – P. 20-24. https://doi.org/10.1021/acs.jpclett.5b02554.
12. Copper nanocubes and nanostructured cuprous oxide prepared by surfactant-assisted electrochemical deposition / B. Luo et al // CrystEngComm. – 2013. – Vol. 15, № 28. – P. 5654-5659. https://doi.org/10.1039/C3CE40708J.
13. Bekey A. Influence of Acetonitrile on Cu Electrochemical Nucleation and Growth: Preliminary Test of Catalytic Activity for eCO_2RR / A. Bekey, F. Vacandio, K. Avchukir // Electrocatalysis. – 2025. – Vol. 16, № 3. – P. 513-525. https://doi.org/10.1007/s12678-025-00940-y.
14. Bekey A. Surfactant-assisted copper electrodeposition: role of SDS on nucleation kinetics, surface area, and catalytic activity for CO_2 reduction / A. Bekey, F. Vacandio, K. Avchukir // Journal of Applied Electrochemistry. – 2025. – Vol. 55, № 10. – P. 2701-2719. https://doi.org/10.1007/s10800-025-02343-9.
15. Five-fold twinned copper nanowire gas diffusion electrodes for electrochemical CO_2 reduction with enhanced C_2 product selectivity and stability / H.-Y. Chen et al // Sustainable Energy & Fuels. – 2025. – Vol. 9, № 21. – P. 5904-5914. https://doi.org/10.1039/D5SE01129A.
16. Size-dependent selectivity of Cu_2O nanocube catalysts for CO_2 reduction at industrial current densities / M. Etzi et al // Electrochimica Acta. – 2026. – Vol. 551. – Article 148114. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2026.148114.
17. Oriented Growth of In Situ Coordinated MOF on Spherical Cu_2O for Electrocatalytic CO_2 Reduction to Ethanol / Z. Yu et al // ACS Applied Materials & Interfaces. – 2026. – Vol. 18, № 13. – P. 19217-19226. https://doi.org/10.1021/acsami.6c03213.
18. Preferentially Stabilizing the Watershed Intermediates by Adsorbate-adsorbate Interaction to Accelerate CO_2 Electroreduction to Ethanol / P. Huang et al // Advanced Functional Materials. – 2025. – Vol. 35, № 17. – Article 2424583. https://doi.org/10.1002/adfm.202424583.
19. Facet-switching of rate-determining step on copper in CO_2-to-ethylene electroreduction / Y.-C. Zhang et al // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. – 2024. – Vol. 121, № 25. – Article e2400546121. https://doi.org/10.1073/pnas.2400546121.
20. Selective formation of C_2 products from the electrochemical conversion of CO_2 on CuO-derived copper electrodes comprised of nanoporous ribbon arrays / F.-S. Ke et al // Catalysis Today. – 2017. – Vol. 288. – P. 18-23. https://doi.org/10.1016/j.cattod.2016.10.001.
21. CO_2 Electroreduction with Enhanced Ethylene and Ethanol Selectivity by Nanostructuring Polycrystalline Copper / Y. Kwon et al // ChemElectroChem. – 2016. – Vol. 3, № 6. – P. 1012-1019. https://doi.org/10.1002/celc.201600068.
22. Electrosynthesis of high purity ethylene using high-index facet Cu_2O nanocrystals electrocatalyst / A.M. Harzandi et al // Applied Catalysis B: Environment and Energy. – 2025. – Vol. 366. – Article 125053. https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2025.125053.
23. Controlled assembly of Cu nanoparticles on pyridinic-N rich graphene for electrochemical reduction of CO_2 to ethylene / Q. Li et al // Nano Energy. – 2016. – Vol. 24. – P. 1-9. https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2016.03.024.

24. High-Selectivity Electrochemical Conversion of CO_2 to Ethanol using a Copper Nanoparticle/N-Doped Graphene Electrode / Y. Song et al // ChemistrySelect. – 2016. – Vol. 1, № 19. – P. 6055-6061. https://doi.org/10.1002/slct.201601169.
25. CO_2 electroreduction to ethylene via hydroxide-mediated copper catalysis at an abrupt interface / C.-T. Dinh et al // Science. – 2018. – Vol. 360, № 6390. – P. 783-787. https://doi.org/10.1126/science.aas9100.

Алғыс

Жұмыс Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғарғы білім министрлігінің қаржылық қолдауымен BR24992935 ғылыми жобасы аясында жүзеге асырылды.

А.Ж. Бекей[1], Ф. Вакандио[2], Т.В. Шакиева[1], Г.Е. Ергазиева[3], Х. Авчукир[*]
[1]Научно-исследовательский институт новых химических технологий и материалов,
Казахский национальный университет им. Аль-Фараби,
ул. Толе Би 96а, г. Алматы, Казахстан
[2]Университет Экс-Марсель,
ул. Эскадрилья Нормандия-Неман 52, г. Марсель, Франция
[3]Институт проблем горения,
Богенбай Батыра, 172 А, г. Алматы, Казахстан
*e-mail: khaisa.avchukir@kaznu.edu.kz

НУКЛЕАЦИЯ И СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРООСАЖДЕННОГО МЕДНОГО КАТАЛИЗАТОРА ИЗ СРЕДЫ МОЛОЧНАЯ КИСЛОТА-ДОДЕЦИЛСУЛЬФАТ НАТРИЯ

Для направленного электроосаждения активных медных катализаторов для электрохимического восстановления CO_2 (CO_2RR) были исследованы закономерности нуклеации и роста электроосаждения меди в системе молочная кислота-додецилсульфат натрия. Электрохимические исследования проводились методами циклической вольтамперометрии и хроноамперометрии. Осадки меди получали из раствора 0,04 М $CuCl_2$ + 3 М $C_3H_6O_3$ + 0,14 М SDS (pH 4,0) на стеклоуглеродном электроде при потенциале –0,35 В и температуре 60 °С. Смещение потенциала осаждения в отрицательную сторону от –0,15 В до –0,35 В ускоряет образование центров нуклеации и приводит к снижению радиуса частиц с 12,57 до 1,34 мкм.

Структурно-морфологический анализ показал, что полученные медные осадки формируют многогранную структуру и характеризуются преобладающей кристаллографической ориентацией Cu(111). В растворе 0,5 М $NaHCO_3$, насыщенном CO_2, эти медные осадки обеспечили более высокую катодную плотность тока CO_2RR по сравнению с поликристаллическим коммерческим медным электродом. Результаты электрохимической импедансной спектроскопии (EIS) показали, что снижение сопротивления переноса заряда с 107,8 до 36,5 Ом·см^2 свидетельствует об облегчении переноса заряда на границе электрод/электролит на поверхности наноструктурированной меди. Таким образом, медные осадки с регулируемой структурой, полученные методом электроосаждения в среде молочной кислоты-додецилсульфата натрия, могут рассматриваться как дешёвые и перспективные электрокатализаторы для реакции электрохимического восстановления CO_2.

Ключевые слова: *Электроосаждение, молочная кислота, додецилсульфат натрия, медь, электрохимическое восстановление диоксида углерода.*

A.Z. Bekey[1], F. Vacandio[2], T.V. Shakiyeva[1], G.E. Yergazieva[3], K. Avchukir[*]
[1]Scientific Research Institute for New Chemical Technologies and Materials,
Al-Farabi Kazakh National University, 96a Tole Bi Str., Almaty, Kazakhstan
[2]Aix-Marseille University, 52 Escadrille Normandie-Niemen Ave., Marseille, France
[3]Institute of Combustions Problems, 172 A Bogenbay Batyr Str., Almaty, Kazakhstan
*e-mail: khaisa.avchukir@kaznu.edu.kz

NUCLEATION AND STRUCTURAL FEATURES OF AN ELECTRODEPOSITED COPPER CATALYST FROM A LACTIC ACID-SODIUM DODECYL SULFATE MEDIUM

To obtain active copper catalysts for the electrochemical reduction of CO_2 (CO_2RR) in a controlled manner, the nucleation and growth mechanisms of copper electrodeposition in a lactic acid-sodium dodecyl sulfate (SDS) medium were investigated. Electrochemical studies were carried out using cyclic voltammetry and chronoamperometry methods. Copper deposits were obtained from a solution of 0.04 M $CuCl_2$ + 3 M

$C_3H_6O_3$ + 0.14 M SDS (pH 4.0) on a glassy carbon electrode at a potential of –0.35 V and a temperature of 60 °C. A negative shift in the deposition potential from –0.15 V to –0.35 V accelerates the formation of nucleation centers and leads to a decrease in particle radius from 12.57 to 1.34 μm.

Structural and morphological analysis showed that the obtained copper deposits form a polyhedral structure and are characterized by a predominant Cu(111) crystallographic orientation. In a CO_2-saturated 0.5 M $NaHCO_3$ solution, these copper deposits provided a higher cathodic current density for CO_2RR compared to a polycrystalline commercial copper electrode. The results of electrochemical impedance spectroscopy (EIS) showed that a decrease in charge transfer resistance from 107.8 to 36.5 Ω·cm^2 indicates facilitated charge transfer at the electrode/electrolyte interface on the surface of nanostructured copper. Thus, copper deposits with a tunable structure obtained by electrodeposition in a lactic acid-sodium dodecyl sulfate medium can be considered as low-cost and promising electrocatalysts for the electrochemical reduction of CO_2.

Key words: *Electrodeposition, lactic acid, sodium dodecyl sulfate, copper, electrochemical reduction of carbon dioxide.*

Авторлар туралы мәліметтер

Ақбаян Жосалықызы Бекей – PhD студент, Жаңа химиялық технологиялар және материалдар ғылыми зерттеу институтының ғылыми қызметкері, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан; e-mail: bekey_akbayan3@kaznu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6612-0775.

Флоренс Вакандио – PhD, профессор, Экс-Марсель университеті, Франция; e-mail: florence.vacandio@univ-amu.fr. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7814-363X.

Татьяна Владимировна Шакиева – х.ғ.к., профессор, Жаңа химиялық технологиялар және материалдар ғылыми зерттеу институтының директоры, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан; e-mail: shakievatatyana@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9664-442X.

Гаухар Ергазиевна Ергазиева – х.ғ.к., профессор, Жану проблемалары институты, каталитикалық процестер зертханасының меңгерушісі, Алматы, Қазақстан; e-mail: ergazieva_g@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9464-5317.

Хайса Авчукир* – PhD, Жаңа химиялық технологиялар және материалдар ғылыми зерттеу институтының жетекші ғылыми қызметкері, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан; e-mail: khaisa.avchukir@kaznu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6612-0775.

Сведения об авторах

Ақбаян Жосалықызы Бекей – PhD студент, научный сотрудник Научно-исследовательского института новых химических технологий и материалов, Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, Казахстан; e-mail: bekey_akbayan3@kaznu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6612-0775.

Флоренс Вакандио – PhD, профессор, Университет Экс-Марсель, Франция; e-mail: florence.vacandio@univ-amu.fr. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7814-363X.

Татьяна Владимировна Шакиева – к.х.н., профессор, директор Научно-исследовательского института новых химических технологий и материалов, Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, Казахстан; e-mail: shakievatatyana@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9664-442X.

Гаухар Ергазиевна Ергазиева – к.х.н., профессор, Института проблем горения, заведующий лаборатории каталитических процессов, Казахстан; e-mail: ergazieva_g@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9464-5317.

Хайса Авчукир* – PhD, ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского института новых химических технологий и материалов, Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, Казахстан; e-mail: khaisa.avchukir@kaznu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6612-0775.

Information about the authors

Akbayan Zhosalykyzy Bekey – PhD student, researcher at the Scientific Research Institute of New Chemical Technologies and Materials, Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan; e-mail: bekey_akbayan3@kaznu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6612-0775.

Florence Vacandio – PhD, Professor, Aix-Marseille University, France; e-mail: florence.vacandio@univ-amu.fr. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7814-363X.

Tatyana Vladimirovna Shakiyeva – candidate of chemical sciences, professor, director of the Scientific Research Institute of New Chemical Technologies and Materials, Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan; e-mail: shakievatatyana@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9664-442X.

Gauhar Ergazievna Yergazieva – candidate of chemical sciences, professor, head of the laboratory of catalytical processes at the Institute of Combustion Problems, Kazakhstan; e-mail: ergazieva_g@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4126-2907.

Khaisa Avchukir* – PhD, leading researcher at the Scientific Research Institute of New Chemical Technologies and Materials, Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan; e-mail: khaisa.avchukir@kaznu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6612-0775.

Редакцияға енуі 03.04.2026
Өңдеуден кейін түсуі 28.05.2026
Жариялауға қабылданды 05.06.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-78

IRSTI: 31.23.19

CC BY 4.0
Check for updates

K. Botabekova*, A.K. Kipchakbayeva, M.T. Kaimova, M.B. Mukhitdin, E.B. Kartbayeva
Al-Farabi Kazakh National University, Faculty of Chemistry and Chemical Technology,
Almaty, Kazakhstan 050040, Republic of Kazakhstan, Almaty, 71 Al-Farabi Avenue
*e-mail: karakatbota00@gmail.com

PHYTOCHEMICAL CHARACTERIZATION AND COMPARATIVE ANALYSIS OF BIOLOGICALLY ACTIVE COMPOUNDS IN *CIRSIUM VULGARE* AND *CIRSIUM ARVENSE*

Annotation: *Species of the genus Cirsium are considered promising sources of biologically active compounds and attract considerable interest in phytochemical and pharmacognostic research. Among them, Cirsium vulgare and Cirsium arvense are widely distributed in Kazakhstan and have traditionally been used in folk medicine. Previous studies have reported the presence of phenolic compounds, fatty acids, vitamins, and other secondary metabolites in representatives of this genus; however, comparative phytochemical data for these species remain limited.*

The aim of the present study was to perform a comparative analysis of physicochemical characteristics and biologically active compounds in aqueous-ethanolic extracts of Cirsium vulgare and Cirsium arvense. Fatty acid composition was determined by gas chromatography with flame ionization detection, total phenolic compounds were evaluated spectrophotometrically using the Folin-Ciocalteu method, and vitamin C content was analyzed by high-performance liquid chromatography. In addition, moisture content and total ash values of the plant material were determined according to standard analytical procedures.

The obtained results demonstrated noticeable differences in the phytochemical composition of the studied species. In total, twenty-one fatty acids were identified in the extracts. Cirsium arvense was characterized by a higher content of linolenic acid and vitamin C, whereas Cirsium vulgare contained increased amounts of total phenolic compounds together with linoleic, eicosenoic, and palmitic acids. Similar differences in the accumulation of biologically active compounds may be associated with species-specific metabolic features and environmental conditions.

The present study expands current information on the phytochemical composition of local representatives of the genus Cirsium. The obtained results may be considered as preliminary comparative data for further pharmacognostic, phytochemical, and applied investigations related to medicinal plant raw materials and biologically active compounds.

Key words: *cirsium vulgare, cirsium arvense, fatty acids, phenolic compounds, vitamin c, phytochemical analysis.*

Introduction

Kazakhstan is distinguished by its rich flora and the wide distribution of wild medicinal plants, which are considered a source of biologically active compounds. Despite the growing interest in medicinal plant raw materials, the phytochemical composition of many wild plants has not yet been fully studied. The study of local plant resources and the identification of biologically active substances is one of the important directions of pharmaceutical and pharmacognostic research.

Currently, plant-derived compounds are considered promising components of phytopharmaceutical and nutraceutical products. Natural products differ in structural diversity compared to synthetic substances and the presence of biologically important metabolites. In this regard, the study of wild medicinal plants growing in Kazakhstan is of scientific and practical interest [1].

©K. Botabekova, A.K. Kipchakbayeva, M.T. Kaimova, M.B. Mukhitdin, E.B. Kartbayeva, 2026

One of the important stages of phytochemical research is the isolation and analysis of biologically active compounds from plant raw materials. The complexity of plant matrices, the variability of secondary metabolites, and the influence of environmental factors require the use of modern analytical methods. Gas chromatography, high-performance liquid chromatography, and spectrophotometric methods are widely used in the study of fatty acids, phenolic compounds, vitamins, and other metabolites [2].

Plants belonging to the *Cirsium* (*Asteraceae*) family, widespread in Kazakhstan, are of particular interest. Representatives of this family have long been used in folk medicine. However, information on their phytochemical composition is still limited. The literature indicates that some *Cirsium* species contain flavonoids, phenolic compounds, fatty acids, vitamins, and other secondary metabolites. However, comparative studies conducted under the same analytical conditions are lacking [3].

The scientific novelty of the study is associated with the comparative phytochemical analysis of *Cirsium vulgare and Cirsium arvense* plants collected in the Almaty region. For the first time, the physicochemical parameters, fatty acid composition, vitamin C, and total phenolic compounds of these plants were systematized and comparatively studied under a single analytical condition. The aim of the study was to conduct a comparative analysis of the physicochemical parameters and biologically active compounds of *Cirsium vulgare and Cirsium arvense*. The species-specific characteristics of their phytochemical composition were assessed by determining the content of fatty acids, vitamin C, and total phenolic compounds.

Materials and methods

The Study Objects and Raw Material Preparation

The objects of the study were the aerial parts of *Cirsium vulgare* and *Cirsium arvense* collected during the flowering period in the Almaty region of the Republic of Kazakhstan in 2025. Taxonomic identification of the plant material was carried out according to morphological characteristics using standard floristic references.

The collected raw material was cleaned from mechanical impurities and dried in the shade under natural ventilation at room temperature until reaching an air-dry state. The dried material was ground to obtain a homogeneous powdered mass. Prepared samples were stored in tightly closed containers under dry and dark conditions until further analysis.

Extraction was performed using 70% ethanol as an extractant at a raw material-to-solvent ratio of 1:10.Ultrasonic extraction was carried out for 1 h at room temperature. Extraction was repeated three times to ensure maximum recovery of biologically active compounds. After extraction, the obtained solutions were filtered and concentrated, while the remaining plant residue (meal) was used for further analysis.

Determination of Physicochemical Parameters

Physicochemical characteristics of the plant raw material were evaluated using standard pharmacopoeial and analytical procedures. The investigated parameters included moisture content, total ash, organic acids, saponins, flavonoids, coumarins, and tannins. Moisture content was determined by drying samples to constant weight. Total ash content was evaluated after thermal treatment of accurately weighed samples in a muffle furnace followed by gravimetric analysis. Organic acids were determined by titration using an appropriate indicator system.

Quantitative determination of saponins, flavonoids, coumarins, and tannins was performed spectrophotometrically using corresponding standard compounds and calibration curves. The obtained results were expressed as percentages of absolutely dry plant material [4].

Determination of Fatty Acid Composition

Qualitative and quantitative analysis of fatty acids in hydroalcoholic extracts of Cirsium vulgare and Cirsium arvense was performed by gas chromatography with flame ionization detection (GC-FID) using a GX-1000 “Chromas” gas chromatograph (Russia) according to the methodology of MVI MN 1364-2000. Prior to chromatographic analysis, lipid fractions were isolated from the plant material and subjected to transesterification to obtain fatty acid methyl esters. Chromatographic separation was carried out under programmed temperature conditions using a capillary column and helium as the carrier gas. Identification of individual fatty acids was based on comparison of retention times with those of corresponding standard compounds. Quantitative evaluation of the detected

components was performed by calculating the relative percentage of each fatty acid in relation to the total identified fatty acid content [5].

Determination of Vitamin C

Quantitative determination of vitamin C (ascorbic acid) in the studied plant extracts was carried out using high-performance liquid chromatography (HPLC) on a K2025 chromatograph (China) equipped with a reversed-phase C18 column. Chromatographic analysis was performed according to the standard procedure R.4.1.1672-03 for the determination of water-soluble vitamins. The mobile phase consisted of water and acetonitrile under isocratic elution conditions at a flow rate of 1.0 mL/min. Detection of analytes was performed at wavelengths of 210 and 254 nm. Identification of ascorbic acid was achieved by comparing the retention time of the sample peak with that of the reference standard. Quantitative determination was based on a calibration curve constructed using standard solutions of ascorbic acid, and the results were expressed in mg per 100 g of absolutely dry plant material [6].

Determination of Total Phenolic Content

Total phenolic content in hydroalcoholic extracts was determined spectrophotometrically using the Folin–Ciocalteu method. For analysis, the reaction mixture consisted of the plant extract, Folin–Ciocalteu reagent, and sodium carbonate solution. After incubation under standard laboratory conditions, absorbance was measured at 765 nm using a UV–Vis spectrophotometer. Quantitative determination of phenolic compounds was carried out using a calibration curve prepared with gallic acid standard solutions. The obtained results were expressed as milligrams of gallic acid equivalents per gram of dry plant material (mg GAE/g) [7].

Statistical Analysis

Statistical analysis was performed using Student's t-test. Differences between the compared groups were considered statistically significant at $p < 0.05$. All experiments were carried out in triplicate ($n = 3$), and the results are presented as mean value ± standard deviation [9].

Results and Discussion

Studies of various representatives of the genus *Cirsium* have shown that these plants are rich sources of biologically active compounds, including flavonoids, phenolic compounds, tannins, fatty acids, vitamins, and other secondary metabolites. Previous investigations of species such as *Cirsium japonicum, Cirsium setidens,* and *Cirsium arvense* demonstrated the presence of flavonoids, phenolic acids, tannins, and antioxidant-active compounds associated with the pharmacological potential of these plants.

The objects of the study were the aerial parts of plants of the genus *Cirsium* – *Cirsium vulgare* and *Cirsium arvense*, collected during the flowering phase in the Almaty region of Kazakhstan in 2025. After harvesting, the plant material was dried in shaded conditions at ambient temperature and subsequently milled to a fine powder. Interest in these species is mainly related to their chemical composition, which includes phenols, flavonoids, coumarins, saponins, and polyunsaturated fatty acids responsible for several biological effects. Similar phytochemical trends have previously been reported for other representatives of the *Asteraceae* family (Table 1, 2).

Table 1 – Physicochemical Parameters of *Cirsium* Species

Parameter	*Cirsium vulgare* (%)	*Cirsium arvense* (%)
Moisture content	5.97 ± 0.11	7.65 ± 0.14
Total ash	9.00 ± 0.09	10.00 ± 0.12

Table 2 – Content of Biologically Active Compounds in Medicinal Plant Raw Material of *Cirsium vulgare* and *Cirsium arvense*

Parameter	*Cirsium vulgare* (%)	*Cirsium arvense* (%)
Free organic acids	0.39 ± 0.02	0.36 ± 0.01
Saponins	1.51 ± 0.05	2.51 ± 0.08
Coumarins	0.25 ± 0.01	0.57 ± 0.02
Flavonoids	5.27 ± 0.14	4.06 ± 0.10
Tannins	2.92 ± 0.09	4.45 ± 0.12

Data are presented as mean ± SD (n = 3).

Statistical analysis was performed using Student's t-test, and differences between species were considered statistically significant at $p < 0.05$.

Data are presented as mean ± SD (n = 3).

Statistical analysis was performed using Student's t-test, and differences between species were considered statistically significant at $p < 0.05$.

The increased moisture and ash values recorded for *Cirsium arvense* suggest differences between the species in water retention and mineral accumulation, which play an important role in plant metabolism. At the same time, the content of organic acids in both species was found to be similar, indicating a comparable contribution of these compounds to the antioxidant properties of the obtained extracts.

A higher content of saponins, coumarins, and tannins was observed in *Cirsium arvense*. These groups of compounds are commonly discussed in the literature in connection with potential immunomodulatory, anticoagulant, and antibacterial effects. In contrast, *Cirsium vulgare* demonstrated a higher level of flavonoids, which may contribute to antioxidant and anti-inflammatory properties.

Overall, the revealed differences reflect species-specific features in the accumulation of biologically active compounds. These findings are important for the rational selection of plant raw materials intended for pharmaceutical use [8-9].

Fatty Acid Profile

Quantitative determination of fatty acids was carried out by gas chromatography using a flame ionization detector. The analysis was performed on a GX-1000 "Chromas" chromatograph in accordance with the MVI MN 1364-2000 protocol. In total, twenty-one individual fatty acids were identified in the studied samples, and the obtained data are summarized in Table 3.

Table 3 – Fatty acid composition (% of total) in *Cirsium* extracts

Compound	Name	*Cirsium vulgare (%)*	*Cirsium arvense (%)*
C12:0	Lauric acid	ND	0.143 ± 0.01
C13:0	Tridecanoic acid	ND	0.205 ± 0.01
C14:0	Myristic acid	1.108 ± 0.03	0.330 ± 0.02
C15:0	Pentadecanoic acid	ND	0.126 ± 0.01
C15:1	Pentadecenoic acid	ND	0.134 ± 0.01
C16:0	Palmitic acid	18.712 ± 0.42	10.016 ± 0.31
C16:1	Palmitoleic acid	ND	0.606 ± 0.03
C18:0	Stearic acid	2.682 ± 0.08	2.112 ± 0.07
C18:1	Oleic acid	4.605 ± 0.12	2.564 ± 0.09
C18:2n6c	Linoleic acid	29.710 ± 0.55	13.849 ± 0.47
C18:3n6	γ-Linolenic acid	ND	0.280 ± 0.02
C18:3n3	α-Linolenic acid	5.913 ± 0.19	32.338 ± 0.74
C20:0	Arachidic acid	6.963 ± 0.21	0.240 ± 0.01
C20:1	Eicosenoic acid	21.409 ± 0.51	3.938 ± 0.14
C20:2	Eicosadienoic acid	4.436 ± 0.15	0.805 ± 0.03
C20:3n3	Eicosatrienoic acid	4.461 ± 0.13	ND
C21:0	Heneicosanoic acid	ND	1.858 ± 0.06
C22:0	Behenic acid	ND	25.775 ± 0.63
C22:6n3	Docosahexaenoic acid	ND	0.573 ± 0.03
C23:0	Tricosanoic acid	ND	0.699 ± 0.03
C24:0	Lignoceric acid	ND	3.048 ± 0.10

ND – not detected.

Data are presented as mean ± SD (n = 3).

Statistical analysis was performed using Student's t-test, and differences between species were considered statistically significant at $p < 0.05$.

Cirsium arvense was found to contain relatively high levels of docosahexaenoic acid (C22:6n3). Since docosahexaenoic acid is commonly found in marine and microbial organisms, its

detection in terrestrial plant samples may be due to the specific analytical conditions, overlapping chromatographic peaks, or environmental factors. The results should be considered preliminary and require further confirmation using reference standards or by additional chromatographic studies. The relatively high content of behenic acid observed in the studied samples may be associated with species-specific peculiarities of lipid metabolism, ecological growing conditions, climatic factors, or the developmental stage of the plants at the time of collection.

There are differences in the fatty acid composition between *Cirsium vulgare* and *Cirsium arvense*. Linoleic, eicosenoic, and palmitic acids predominate in *Cirsium vulgare. Cirsium arvense* had higher levels of linolenic acid and long-chain saturated fatty acids. Similar fatty acids have been described in other members of the *Cirsium* family (*Asteraceae*), and differences in their quantitative composition may be related to environmental conditions, plant growth period, and extraction parameters. Polyunsaturated fatty acids identified in the studied extracts are important structural components of plant cell membranes. According to literature, linoleic and linolenic acids are associated with antioxidant and protective properties of lipid fractions of plant origin. The high content of linolenic acid in *Cirsium arvense* may indicate specific features of lipid metabolism of this species. The results should be considered primarily as a phytochemical characterization of the studied species. The identified fatty acid profile indicates the potential biological significance of these compounds and demonstrates the prospects for further pharmacological and biochemical studies on *Cirsium* extracts [10].

Vitamin C content

The content of ascorbic acid was quantified by high-performance liquid chromatography using a C18 column. Detection was carried out at wavelengths of 210 and 254 nm with a K2025 chromatographic system (China), in accordance with method R.4.1.1672-03 (Table 4).

Table 4 – Vitamin C content (mg/100 g of dry plant material)

Thistle species	Vitamin C (mg/100 g DW)
Cirsium vulgare	0.915 ± 0.03
Cirsium arvense	3.099 ± 0.08

Data are presented as mean ± SD (n = 3).

Statistical analysis was performed using Student's t-test, and differences between species were considered statistically significant at $p < 0.05$.

The obtained results demonstrated differences in the content of ascorbic acid between the studied *Cirsium* species. A higher concentration of vitamin C was detected in *Cirsium arvense* compared to *Cirsium vulgare.* Similar variations in ascorbic acid accumulation have previously been described for medicinal plants depending on species characteristics, environmental conditions, and vegetation stage.

Ascorbic acid is known as one of the important water-soluble antioxidants present in plant tissues. In addition to its protective role against oxidative processes, vitamin C may contribute to stabilization of other biologically active compounds, including phenolic substances and flavonoids. The increased content of ascorbic acid identified in *Cirsium arvense* may reflect specific metabolic features of this species.

At the same time, the obtained data should be considered primarily as comparative phytochemical characteristics of the studied plant materials. The relatively high vitamin C content observed in *Cirsium arvense* indicates the prospects for further investigation of this species as a potential source of biologically active compounds for phytopharmaceutical and nutraceutical applications [11].

The obtained HPLC chromatogram contains a clearly defined ascorbic acid peak, enabling reliable determination of vitamin C content in the samples (Figure 1).

Phenolic Compounds Content

The determination of total phenolic compounds in 70% ethanolic extracts was carried out using the Folin-Ciocalteu spectrophotometric method (Table 5).

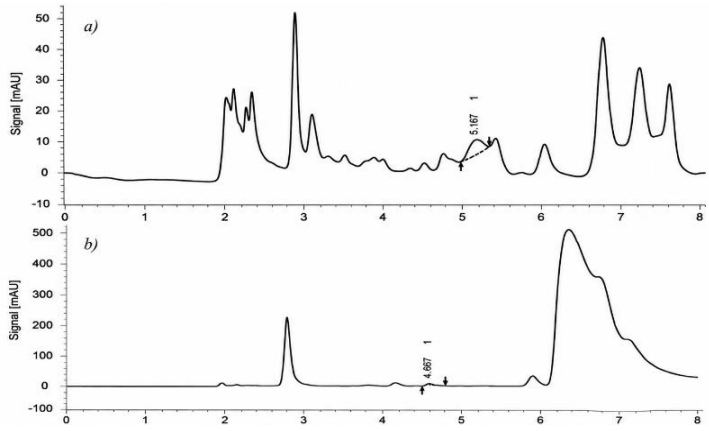


Figure 1 – HPLC chromatograms of vitamin C in extracts of:
a) Cirsium arvense; b) Cirsium vulgare

Table 5 – Phenolic Compounds (mg GAE/g)

Thistle species	Phenolic compounds (mg GAE/g DW)
Cirsium vulgare	30.11 ± 0.62
Cirsium arvense	25.32 ± 0.54

Data are presented as mean ± SD (n = 3).

Statistical analysis was performed using Student's t-test, and differences between species were considered statistically significant at $p < 0.05$.

Phenolic compounds are among the major groups of biologically active substances found in medicinal plants. The obtained results demonstrated that the total phenolic content in *Cirsium vulgare* was higher than in *Cirsium arvense*. Similar differences in phenolic accumulation have previously been described for representatives of the *Asteraceae* family and may be associated with species characteristics, environmental conditions, and physiological stage of plant development.

Phenolic compounds identified in the studied extracts are known as important components of plant protective systems. According to literature data, these substances may contribute to antioxidant and membrane-protective properties of plant extracts. The increased phenolic content detected in *Cirsium vulgare* may indicate certain features of secondary metabolism in this species.

At the same time, the obtained data should be considered primarily as comparative phytochemical characteristics of the studied plants. The results demonstrate the potential of further investigation of *Cirsium* species as potential sources of phenolic compounds and other biologically active substances for pharmacognostic and phytochemical studies[12].

In the present study, comparative phytochemical differences between *Cirsium vulgare* and *Cirsium arvense* were demonstrated. The obtained results confirmed species-specific features in the accumulation of fatty acids, phenolic compounds, flavonoids, tannins, coumarins, saponins, and vitamin C, which is generally consistent with literature data for other representatives of the genus Cirsium and the *Asteraceae* family.

Conclusions

A comparative phytochemical study of *Cirsium vulgare* and *Cirsium arvense* plants collected in the Almaty region of Kazakhstan showed differences in physicochemical parameters and the content of biologically active compounds. The results confirmed the presence of species-specific features in the accumulation of fatty acids, vitamin C and phenolic compounds.

While *Cirsium arvense* contained a higher content of ascorbic acid and linolenic acid, *Cirsium vulgare* was characterized by a higher content of total phenolic compounds, as well as linoleic, eicosene and palmitic acids. Such differences in phytochemical composition may be associated with the characteristics of plant metabolism, environmental conditions and the physiological development stage of the plant.

The identified compounds are known to be important components of plant biochemical systems and may contribute to the biological significance of the studied extracts. Since the study is limited only to comparative phytochemical characterization, conclusions regarding potential

biological activity should be considered preliminary and require additional pharmacological and biochemical studies.

The scientific novelty of the study is characterized by a comparative analysis of *Cirsium vulgare* and *Cirsium arvense* plants growing in Kazakhstan under uniform analytical conditions. For the first time, comparative data on the physicochemical parameters, fatty acid composition, vitamin C content and total phenolic compounds of these local plant raw materials were systematized and analyzed. The results complement the current knowledge about representatives of the *Cirsium* genus and indicate the prospects for future pharmacognostic, phytochemical and applied research aimed at finding plant sources of biologically active compounds.

References

1. Phytopharmaceuticals and herbal drugs: prospects and safety issues in the delivery of natural products / G.G. Naik et al // In: Phytopharmaceuticals and Herbal Drugs. Academic Press, 2023. – P. 215-248. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99125-4.00006-8.
2. Dushenkov V. New strategy for the search of natural biologically active substances / V. Dushenkov, I. Raskin // Russian J. Plant Physiol. – 2008. – № 55(4). – P. 564-567.
3. Traditional uses, phytochemical composition, pharmacological properties, and the biodiscovery potential of the genus Cirsium / G. Aggarwal et al // Chemistry. – 2022. – № 4(4). – P. 1161-1192. https://doi.org/10.3390/chemistry4040079.
4. State Pharmacopoeia of the Republic of Kazakhstan. Methods for analysis of medicinal plant raw materials. – Almaty, 2020. – Vol. 1. – P. 245-258.
5. Methodology MVI MN 1364-2000. Determination of fatty acid composition by gas chromatography. Minsk, 2000.
6. R 4.1.1672-03. Determination of water-soluble vitamins by high-performance liquid chromatography. Moscow, 2003.
7. Singleton V.L. Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of Folin-Ciocalteu reagent / V.L. Singleton, R. Orthofer, R.M. Lamuela-Raventós // Methods Enzymol. – 1999. – № 299. – P. 152-178. https://doi.org/10.1016/S0076-6879(99)99017-1.
8. The biological action of saponins in animal systems: a review / G. Francis et al // J. Nutr. – 2002. – № 88(6). – P. 587-605. https://doi.org/10.1079/BJN2002725.
9. Mechanism of action of flavonoids as anti-inflammatory agents: a review / P. Rathee et al // Inflamm. Allergy Drug Targets. – 2009. – № 8(3). – P. 229-235. https://doi.org/10.2174/187152809788681049.
10. Calder P.C. Functional roles of fatty acids and their effects on human health / P.C. Calder // J. Parenter. Enteral Nutr. – 2015. – № 39. – P. 18S-32S. https://doi.org/10.1177/0148607115595980.
11. May J.M. Role of vitamin C in the function of the vascular endothelium / J.M. May, F.E. Harrison // Antioxid. Redox Signal. – 2013. – № 19(17). – P. 2068-2083. https://doi.org/10.1089/ars.2012.4992.
12. Ali S.S. Implication of dietary phenolic acids on inflammation in cardiovascular disease / S.S. Ali, P.J. Houghton, A. Soumyanath // Rev. Cardiovasc. Med. – 2020. – № 21(2). – P. 225-240. https://doi.org/10.31083/j.rcm210205.

Acknowledgements

The work was carried out with the financial support of the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (grant no. AP27511639 Development and standardization of pharmaceutical products with anti-inflammatory and antioxidant activity based on domestic plant raw materials).

К.Т. Ботабекова*, А.К. Кипчакбаева, М.Т. Каимова, М.Б. Мухитдин, Э.Б. Картбаева2

Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,

050040, Қазақстан Республикасы, Алматы, Әл-Фараби даңғылы, 71

*e-mail: karakatbota00@gmail.com

***CIRSIUM VULGARE ЖӘНЕ CIRSIUM ARVENSE ӨСІМДІКТЕРІНДЕГІ БИОЛОГИЯЛЫҚ БЕЛСЕНДІ ҚОСЫЛЫСТАРДЫҢ ФИТОХИМИЯЛЫҚ СИПАТТАМАСЫ ЖӘНЕ САЛЫСТЫРМАЛЫ ТАЛДАУЫ**

Cirsium туысына жататын өсімдіктер биологиялық белсенді қосылыстардың перспективті көздері ретінде қарастырылып, фитохимиялық және фармакогностикалық зерттеулерде үлкен қызығушылық тудырады. Олардың ішінде Cirsium vulgare және Cirsium arvense Қазақстан аумағында кең таралған және халық медицинасында дәстүрлі түрде қолданылып келеді. Бұрын жүргізілген зерттеулерде бұл туыс өкілдерінің құрамында фенолды қосылыстар, май қышқылдары, дәрумендер және басқа да екіншілік метаболиттер бар екендігі көрсетілген, алайда аталған түрлер бойынша салыстырмалы фитохимиялық мәліметтер әлі де шектеулі.

Зерттеудің мақсаты Cirsium vulgare және Cirsium arvense өсімдіктерінің су-этанолды экстракттарындағы физика-химиялық көрсеткіштер мен биологиялық белсенді қосылыстарға салыстырмалы талдау жүргізу болды. Май қышқылдарының құрамы жалынды-ионизациялық детекторы бар газды хроматография әдісімен анықталды, фенолды қосылыстардың жалпы мөлшері Фолин-Чокальтеу спектрофотометриялық әдісі арқылы бағаланды, ал С дәруменінің мөлшері жоғары тиімді сұйықтық хроматографиясы әдісімен зерттелді. Стандартты аналитикалық әдістерге сәйкес өсімдік шикізатының ылғалдылығы мен жалпы күл мөлшері анықталды.

Зерттелген түрлердің фитохимиялық құрамында айқын айырмашылықтар бар екенін көрсетті. Экстракттар құрамынан жалпы жиырма бір май қышқылы анықталды. Cirsium arvense құрамында линолен қышқылы мен С дәруменінің мөлшері жоғары болса, Cirsium vulgare құрамында жалпы фенолды қосылыстардың, сондай-ақ линол, эйкозен және пальмитин қышқылдарының мөлшері басым болды. Биологиялық белсенді қосылыстардың жиналуындағы анықталған айырмашылықтар метаболизмнің түрлік ерекшеліктерімен және қоршаған орта жағдайларымен байланысты болуы мүмкін.Зерттеу Cirsium туысының жергілікті өкілдерінің фитохимиялық құрамы туралы мәліметтерді толықтырады. Нәтижелер дәрілік өсімдік шикізаты мен биологиялық белсенді қосылыстарға байланысты болашақ фармакогностикалық, фитохимиялық және қолданбалы зерттеулер үшін алдын ала салыстырмалы деректер ретінде қарастырылуы мүмкін.

Түйін сөздер: *cirsium vulgare, cirsium arvense, май қышқылдары, фенолды қосылыстар, дәрумен с, фитохимиялық анализ.*

К.Т. Ботабекова*, А.К. Кипчакбаева, М.Т. Каимова, М.Б. Мухитдин, Э.Б. Картбаева
Казахский национальный университет имени аль-Фараби,
050040, Республика Казахстан, Алматы, проспект Аль-Фараби, 71
*e-mail: karakatbota00@gmail.com

ФИТОХИМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В *CIRSIUM VULGARE* И *CIRSIUM ARVENSE*

Представители рода Cirsium рассматриваются как перспективные источники биологически активных соединений и вызывают значительный интерес в фитохимических и фармакогностических исследованиях. Среди них Cirsium vulgare и Cirsium arvense широко распространены на территории Казахстана и традиционно используются в народной медицине. Ранее проведенные исследования показали наличие у представителей данного рода фенольных соединений, жирных кислот, витаминов и других вторичных метаболитов, однако сравнительные фитохимические данные для этих видов остаются ограниченными.

Целью настоящего исследования являлся сравнительный анализ физико-химических характеристик и биологически активных соединений в водно-этанольных экстрактах Cirsium vulgare и Cirsium arvense. Жирнокислотный состав определяли методом газовой хроматографии с пламенно-ионизационным детектированием, общее содержание фенольных соединений оценивали спектрофотометрическим методом Фолина-Чокальтеу, а содержание витамина С анализировали методом высокоэффективной жидкостной хроматографии. Определены показатели влажности и общей золы растительного сырья согласно стандартным аналитическим методикам.

Результаты показали заметные различия в фитохимическом составе исследованных видов. Всего в экстрактах была идентифицирована двадцать одна жирная кислота. Для Cirsium arvense было характерно более высокое содержание линоленовой кислоты и витамина С, тогда как Cirsium vulgare содержал повышенные количества общих фенольных соединений, а также линолевой, эйкозеновой и пальмитиновой кислот. Выявленные различия в накоплении биологически активных соединений могут быть связаны с видоспецифическими особенностями метаболизма и условиями окружающей среды.

Проведенное исследование расширяет существующие сведения о фитохимическом составе местных представителей рода Cirsium. Полученные результаты могут рассматриваться как предварительные сравнительные данные для дальнейших фармакогностических, фитохимических и прикладных исследований, связанных с лекарственным растительным сырьем и биологически активными соединениями.

Ключевые слова: *cirsium vulgare, cirsium arvense, жирные кислоты, фенольные соединения, витамин с, фитохимический анализ .*

Сведения об авторах

Каракат Ботабекова* – магистрант, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, факультет химии и химической технологии, г. Алматы, Казахстан; e-mail: karakatbota00@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-0754-3544.

Алия Кипчакбаева – PhD, ассоциированный профессор, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, факультет химии и химической технологии, г. Алматы, Казахстан: e-mail: aliya_k85@mail.ru.

Мукадас Каймова – магистрант, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, факультет химии и химической технологии, г. Алматы, Казахстан; e-mail: mukadas.kaimova@mail.ru.

Меруерт Мухитдин – магистр медицинских наук, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, факультет медицины и здравоохранения, г. Алматы, Казахстан; e-mail: Kazbek.meruyert2@gmail.com.

Эльмира Бекболовна Картбаева – PhD, ассоциированный профессор, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, факультет медицины и здравоохранения, г. Алматы, Казахстан; e-mail: e.kartbayeva@gmail.com.

Авторлар туралы мәлімет

Каракат Ботабекова* – магистрант, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, химия және химиялық технология факультеті, Алматы қ., Қазақстан; e-mail: karakatbota00@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-0754-3544.

Алия Кипчакбаева – PhD, қауымдастырылған профессор, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, химия және химиялық технология факультеті, Алматы қ., Қазақстан; e-mail: aliya_k85@mail.ru.

Мукадас Каймова – магистрант, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, химия және химиялық технология факультеті, Алматы қ., Қазақстан; e-mail: mukadas.kaimova@mail.ru.

Меруерт Мухитдин – медицина ғылымдарының магистрі, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, медицина және денсаулық сақтау факультеті, Алматы қ., Қазақстан, e-mail: Kazbek.meruyert2@gmail.com.

Эльмира Бекболовна Картбаева – PhD, қауымдастырылған профессор, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, медицина және денсаулық сақтау факультеті, Алматы қ., Қазақстан; e-mail: e.kartbayeva@gmail.com.

Information about the authors

Karakat Botabekova* – Master's student, Al-Farabi Kazakh National University, Faculty of Chemistry and Chemical Technology, Almaty, Kazakhstan; e-mail: karakatbota00@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-0754-3544.

Aliya Kipchakbayeva – PhD, Associate Professor, Al-Farabi Kazakh National University, Faculty of Chemistry and Chemical Technology, Almaty, Kazakhstan; e-mail: aliya_k85@mail.ru.

Mukadas Kaimova – Master's student, Al-Farabi Kazakh National University, Faculty of Chemistry and Chemical Technology, Almaty, Kazakhstan; e-mail: mukadas.kaimova@mail.ru.

Meruyert Mukhitdin – Master of Medical Sciences, Al-Farabi Kazakh National University, Faculty of Medicine and Health Care, Almaty, Kazakhstan; e-mail: Kazbek.meruyert2@gmail.com.

Elmira Bekbolovna Kartbayeva – PhD, Associate Professor, Al-Farabi Kazakh National University, Faculty of Medicine and Health Care, Almaty, Kazakhstan; e-mail: e.kartbayeva@gmail.com.

Received 02.04.2026
Revised 22.05.2026
Accepted 26.05.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-79

МРНТИ: 31.17.15; 31.15.17

Б.Қ. Қасенов[1], Ш.Б. Қасенова[1*], Ж.И. Сағынтаева[1], Е.Е. Қуанышбеков[1], М.А. Исабаева[2]
[1]Ж. Әбішев атындағы химия металлургия институты,
100009, Қазақстан, Қарағанды қ., Ермеков көшесі, 63
[2]Торайғыров университеті,
140008, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ., Ломов көшесі, 64
[*]e-mail: kasenovashuga@mail.ru

$LaSrCuVMnO_{7.5}$ ҚҰРАМДЫ ҚОСЫЛЫСТЫҢ ТЕРМОДИНАМИКАЛЫҚ ЖӘНЕ ЭЛЕКТРФИЗИКАЛЫҚ СИПАТТАМАЛАРЫН ЗЕРТТЕУ

Аңдатпа: *Мақалада $LaSrCuVMnO_{7.5}$ құрамды қосылысының термодинамикалық және электрфизикалық сипаттамаларын зерттеу нәтижелері ұсынылған.*

*$LaSrCuVMnO_{7.5}$ құрамды қосылысы жылу сыйымдылығының температураға тәуелділігі ИТ-С-400 сериялық калориметрінде 298.15-673 К температуралар аралығында зерттелді. Жылу сыйымдылықтың температураға тәуелділігін сипаттайтын полином теңдеулері фазалық ауытқуларды ескере отырып анықталды. Зерттеу нәтижелері көрсеткендей қосылыс 373 және 523 К температураларда, мүмкін II-текті ауысуға жататын λ-тәрізді әсерлер байқалады. Иондық инкременттер негізінде стандартты энтропиясы анықталып, әрі қарай зерттеліп отырған қосылыстың термодинамикалық функцияларының температураға тәуелділіктері H°(T) – H°(298,15), S°(T), Ф**(T) жылу сыйымдылық теңдеулері көмегімен анықталды.*

Электрфизикалық сипаттамалардың (диэлектрлік өтімділік пен электрліккедергі) температураға тәуелділіктерін зерттеу $LaSrCuVMnO_{7.5}$ құрамды қосылысының электрсыйымдылығын LCR (Тайвань) сериялық құрылғысында 1, 5 және 10 кГц жұмыс жиіліктерінде, құрғақ ауада үздіксіз, әрбір бекітілген температурада белгілі бір уақыт ұстай отырып, термостаттық режимде өлшеу арқылы жүргізілді. Жоғары температура аймағында (шамамен 413 К және одан жоғары) электрлік сипаттамалардың күрт өзгеруі тіркелді, бұл фазалық ауысудың бар екендігін көрсетуі мүмкін, сондай-ақ өткізгіштік механизмдерінің және поляризациялық процестердің өзгеруімен қатар жүреді.

Зерттеу барысында қол жеткізілген деректер жиынтығы $LaSrCuVMnO_{7.5}$ қосылысының теродинамикалық қасиеттерін болжауға арналған модельдеудің бастапқы негізін қалыптастырып, сондай-ақ қосылыстың зертханалық тәжірибелік үлгісін құжаттауға қажет маңызды ақпараттық база ретінде қызмет етеді.

Түйін сөздер: *Термодинамикалық сипаттама, жылу сыйымдылық, электр өтімділік, кедергі, температураға тәуелділік.*

Кіріспе

Перовскит тәрізді манганиттер асқын магниттік кедергі, алып магнитстрикция құбылыстары және магнитэлектрондық фазалық ауысулардың кең ауқымына байланысты тотықтардың ең өзекті топтарының бірі болып қала береді.

Ванадаттар, купраттар және манганиттердің термодинамикалық қасиеттерін зерттеу маңызды, өйткені бұл материалдар температураның, қысымның және басқа да сыртқы әсерлердің өзгеруіне өте сезімтал келеді. Осындай өзгерістер кезінде оларда фазалық ауысулар және электрондық құрылымның өзгерістері болуы мүмкін, бұл олардық физикалық және электрондық қасиеттеріне әсер етеді [1-3].

Олардың термодинамикалық сипаттамалары (жылу сыйымдылығы, энтальпиясы) зерттеу магниттік және электрондық реттелу механизмдерін түсіндіру үшін, сондай-ақ алдын ала берілген функциональдық қасиеттері бар материалдарды әзірлеу үшін аса маңызды [4-6].

Жұмыстың мақсаты болып $LaSrCuVMnO_{7.5}$ құрамды қосылыстың термодинамикалық және электрфизикалық сипаттамаларын зерттеу болып табылады.

Зерттеу әдістері

$LaSrCuVMnO_{7.5}$ қосылысы қатты фазалы әдіспен La_2O_3 («айрықша таза»), CuO, V_2O_5, Mn_2O_3 тотықтары және $SrCO_3$ («талдау үшін таза») негізінде синтезделді. Бастапқы реагенттер

©Б.Қ. Қасенов, Ш.Б. Қасенова, Ж.И. Сағынтаева, Е.Е. Қуанышбеков, М.А. Исабаева, 2026

адсорбциялық ылғалды жою мақсатында алдын ала 300 °C-та күйдірілді. Стехиометриялық мөлшерлер мұқият араластырылып, агат келіде ұнтақталды. Қоспа алдын ала күйдірілген алунд тигельдерде «SNOL» муфель пешінде кезең-кезеңімен 600°C (5 сағ), 700°C (10 сағ), 800°C (15 сағ) және 1000°C (15 сағ) температураларда термиялық өңдеуден өткізілді. Әр кезеңнен кейін қоспа салқындатылып, қайта араластырылып және ұнтақталды. Соңғы кезеңде тепе-тең фазаны қалыптастыру мақсатында 400°C температурада 10 сағат бойы төмен температуралы күйдіру жүргізілді.

Алынған фазалардың рентгенфазалық талдауы ДРОН-2,0 қондырғысында жүргізілді. Түсірілім шарттары: CuKα сәулеленуі, U = 30 кВ, I = 10 мА, айналу жылдамдығы – секундына 100 импульс, уақыт тұрақтысы τ = 5 с, 2θ бұрыштарының аралығы 10-90°. Дифракциялық максимумдардың интенсивтілігі 100 балдық шкала бойынша бағаланды.

Рентгенограммаларды индицирлеу аналитикалық әдіспен жүргізілді [7] (1-кесте).

Кесте 1 – $LaSrCuVMnO_{7.5}$ қосылысы рентгенограммасын индицирлеу

I/I_0	d/Å	$10^4/d^2_{эксп.}$	hkl	$10^4/d^2_{выч.}$	I/I_0	d/Å	$10^4/d^2_{эксп.}$	hkl	$10^4/d^2_{выч.}$
24	3,85	674.65	520	674.65	28	2,06	2356	10.1.0	2350
100	3,06	1068	631	1070	45	1,92	2713	10.4.1	2722
69	2,80	1275	633	1256	26	1,83	2986	880	2978
99	2,71	1362	731	1373	16	1,66	3629	11.5.3	3606
31	2,49	1613	742	1605	31	1,57	4057	13.2.1	4048
16	2,30	1890	900	1884	10	1,45	4756	10.10.2	4746
24	2,23	2011	761	2001	14	1,36	5406	14.6.0	5397
16	2,20	2066	764	2071	14	1,35	5487	10.10.6	5490

$LaSrCuVMnO_{7,5}$ қосылысының беткі морфологиясы мен элементтік құрамы сканерлеуші электрондық микроскопия (SEM) және энергодисперсиялық рентгеноспектралдық талдау (EDS) әдістерімен зерттелді. Зерттеулер AZtec бағдарламалық қамтамасыз етуімен жабдықталған Oxford Instruments EDS микроанализ жүйесі бар Zep Tools ZEM20 (Қытай) сканерлеуші электрондық микроскопында жүргізілді.

$LaSrCuVMnO_{7,5}$ қосылысының жылу сыйымдылығы 298,15-673 К аралығында ИТ-С-400 сериялық калориметрінде зерттелді [8, 9]. Өлшеулер динамикалық салыстырмалы калориметрия әдісімен жүргізілді. Үлгі 25 К қадаммен қыздырылып, температуралық кешігу негізінде жылу сыйымдылығы есептелді. Құрылғының рұқсат етілген қателік шегі ±10%-дан аспайды. Әр температурада бес параллель өлшеу жүргізіліп, нәтижелер математикалық статистика әдістерімен өңделді. Құрылғының дұрыстығы α-Al_2O_3 эталондық үлгісі арқылы тексеріліп, алынған нәтижелер әдебиеттік деректермен жақсы сәйкестік көрсетті [10] (2-кесте). Мольдік жылу сыйымдылық молярлық масса ескеріліп есептелді, сондай-ақ орташа квадраттық ауытқулар ($\bar{\delta}$) мен кездейсоқ қателік құрамдастары ($\overset{\circ}{\Delta}$) анықталды. Зерттеу нәтижелері 3-кесте мен 1-суретте келтірілген.

Кесте 2 – Құрылғы жұмысының дұрыстығын тексеру үшін пайдаланылған α-Al_2O_3-тың жылу сыйымдылығының тәжірибелік мәндерінің әдебиет деректерімен [10] салыстыруы.

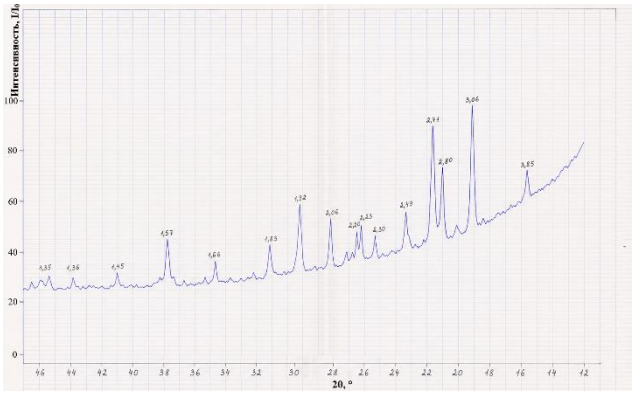
Т, К	$C_p°$(Т), Дж/(моль·К)		S, %	Т, К	$C_p°$(Т), Дж/(моль·К)		S, %
	Біздің деректер	[10] деректер			Біздің деректер	[10] деректер	
300	76,31±3	79,41	3,90	500	105,47±5	106,1	0,59
350	86,49±4	88,86	2,67	550	110,09±5	109,7	0,36
400	94,12±4	95,21	1,15	600	114,29±5	112,5	1,59
450	100,26±4	101,8	1,51	650	118,20±5	114,9	2,87

Термиялық талдау NETZSCH DSC 300 Supreme деп аталатын құрылғыда азота атмосферасында қыздыру жылдамдығы 10 К/мин болатын – 80-550°C температураларда жүргізілді.

$LaSrCuVMnO_{7,5}$ қосылысының TG-DTA талдауы аргон атмосферасында NETZSCH STA 449 F3 синхронды термиялық анализаторында 30-1400°C температура аралығында 10 К/мин қыздыру жылдамдығымен жүргізілді. Талдау нәтижелері «Нәтижелер мен талқылау» бөлімінде 5, 6 – суреттерде келтірілген.

Кесте 3 – $LaSrCuVMnO_{7,5}$ құрамды қосылысы жылу сыйымдылығының тәжірибелік мәндері [$C_p \pm \overline{\delta}$, Дж/(К·г); $C_p^0 \pm \overset{o}{\Delta}$, Дж/(моль·К)]

Т, К	$C_P \pm \overline{\delta}$	$C_P^o \pm \overset{o}{\Delta}$	Т, К	$C_P \pm \overline{\delta}$	$C_P^o \pm \overset{o}{\Delta}$
298.15	0,5207±0,0055	269±8	498	0,6705±0,0093	346±13
323	0,5453±0,0077	281±11	523	0,7059±0,0094	364±14
348	0,6108±0,0054	315±8	548	0,5186±0,0103	268±15
373	0,6573±0,0069	339±10	573	0,4105±0,0086	212±12
398	0,5811±0,0046	300±7	598	0,3304±0,0069	170±10
423	0,4722±0,0111	244±16	623	0,2853±0,0072	147±10
448	0,5975±0,0076	308±11	648	0,4793±0,0098	247±14
473	0,6349±0,0119	328±17	673	0,6032±0,0103	311±15



Сурет 1 – $LaSrCuVMnO_{7.5}$ қосылысы рентгенограммасы

Термодинамикалық сипаттамаларды есептеу $S^o(T)$, $H^o(T) - H^o(298,15)$ және $Ф^{xx}(T)$ төмендегі (1-3) теңдеулер негізінде орындалды:

$$H^0(T) - H^0(298,15) = \int_{298,15}^{T} C_p^0 \, dT, \quad (1)$$

$$S^0(T) = S^0(298,15) + \int_{298,15}^{T} \frac{C_p}{T} dT, \quad (2)$$

$$\Phi^{xx}(T) = S^0(T) - \frac{H^0(T) - H^0(298,15)}{T}. \quad (3)$$

Бұл теңдеулер термодинамикалық функцияларды жылу сыйымдылықтың тәжірибелік мәндері негізінде есептеуге қолданылады. Олар фазалық ауысу мен басқа термодинамикалық үрдістерді талдауға маңызды энтропия, энтальпия және еркін энергияны анықтауға мүмкіндік береді. Термодинамикалық функциялардың температураға тәуелділіктеріндегі қателіктер жылу сыйымдылығының орташа кездейсоқ қателігі мен стандартты энтропияны есептеудегі дәлдік (шамамен 3%) ескеріліп анықталды (4-кесте).

$LaSrCuVMnO_{7.5}$ қосылысының электрфизикалық сипаттамаларының температураға тәуелділігі LCR-781 (Тайвань) құрылғысында 1, 5 және 10 кГц жиіліктерде зерттелді [11, 12]. Өлшеулер құрғақ ауада термостаттық режимде жүргізілді. Зерттеу үшін диаметрі 10 мм және қалыңдығы 5-6 мм болатын таблетка түріндегі үлгілер дайындалып, 20 кг/см² қысымда престелді және «SNOL» пешінде 600 °С-та 6 сағат күйдірілді. Диэлектрлік өтімділік үлгінің электрсыйымдылығы, қалыңдығы және электрод ауданы бойынша есептелді. D(E) гистерезис ілмектері Сойер-Тауэр сұлбасы арқылы С1-83 осциллографында бақыланды. Температура хром-алюмель термопарасымен өлшеніп, қыздыру жылдамдығы шамамен 5 К/мин болды.

Әр температурадағы диэлектрлік өтімділік келесі формула бойынша есептелді:

$$\varepsilon = \frac{C}{C_0}, \quad (4)$$

мұндағы $C_0 = \frac{\varepsilon_0 \cdot S}{d}$ зерттелін затсыз (ауамен толтырылған) конденсатордың сыйымдылығы.

Кесте 4 – $LaSrCuVMnO_{7.5}$ құрамды қосылысының термодинамикалық сипаттамаларының температураға тәуелділіктері [$C_P°(T)$, $S°(T)$, $Ф^{xx}(T)$, Дж/(моль·К); $H°(T)-H°(298.15)$, Дж/моль]

Т, К	$C_P°(T)\pm\overset{o}{\Delta}$	$S°(T)\pm\overset{o}{\Delta}$	$H°(T)-H°(298.15)\pm\overset{o}{\Delta}$	$Ф^{xx}(T)\pm\overset{o}{\Delta}$
298.15	269±12	281 ± 8	-	281±21
300	274±12	283±21	540±20	281±21
325	294±13	306±23	7600±340	282±21
350	318±14	328±25	15240±690	285±21
375	341±15	351±26	23470±1060	288±22
400	288±13	371±28	31260±1410	293±22
425	240±11	387±29	37850±1710	298±22
450	296±13	403±30	44690±2020	303±23
475	330±15	420±32	52540±2370	309±23
500	352±16	437±33	61080±2760	315±24
525	365±16	455±34	70060±3170	321±24
550	261±12	470±35	77700±3510	328±25
575	198±9	479±36	83390±3770	334±25
600	161±7	487±37	87840±3970	340±25
625	146±6	493±37	91650±4140	346±26
650	236±11	506±38	99554±4500	353±27
675	318±14	516±39	106470±4810	359±27

LCR (Тайвань) сериялық құрылғысының төлқұжаттық деректеріне сәйкес, салыстырмалы диэлектрлік өтімділік (ε) және электрлік кедергіні (R) өлшеу қателік шегі бар болғаны ± 0,05 %-ды құрайды, бұл алынған нәтижелердің жоғары сенімділігін көрсетеді. Қосымша расталу эталондық $BaTiO_3$ заты бойынша салыстырмалы талдау арқылы жүзеге асырылды: 293 К температурада алынған ε мәні (1296) ұсынылған диапазон шегінде (1400±250) [13, 14] орналасқан, бұл өлшеу әдістемесінің дұрыстығын растайды. Зерттеу нәтижелері 6-кестеде келтірілген.

Нәтижелер мен талқылау

Рентгенограмма индицирлеу нәтижелеріне сүйене отырып, $LaSrCuVMnO_{7,5}$ қосылысының кубтық сингонияда кристалданатыны және оның тор параметрлері келесідей екені анықталды – a=14,50±0,02 Å; V^o=3051,27±0,06 Å^3; Z=4; $V^o_{эл.ұяш.}$=762,82±1,10Å^3 ; $\rho_{рент.}$=4,49; $\rho_{пикн.}$=4,48±0,05 г/см^3

Қосымша құрылымдық верификация. $LaSrCuVMnO_{7,5}$ үшін перовскиттік құрылымның түзілу мүмкіндігін және геометриялық тұрақтылығын бағалау мақсатында толеранттылық факторы (t) есептелді. Есептеу (5) формула бойынша жүргізілді:

$$t = \frac{r_A + r_O}{\sqrt{2}(r_B + r_O)} \quad (5)$$

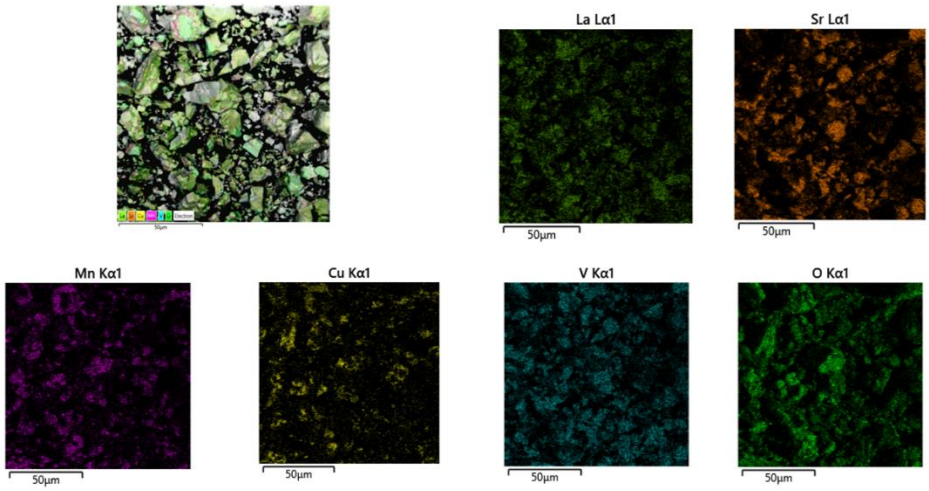
Иондық радиустарды таңдау (Å) (Шеннон бойынша [15, 16], шамамен) A: La^{3+} = 1.36 Å, Sr^{2+} = 1.44 Å. Орташа радиус: r_A = (1,36 + 1,44)/2 = 1,40 Å; B: Cu^{2+} ≈ 0,73 Å, V^{5+}≈ 0,54 Å, Mn^{3+}≈ 0,645 Å. Орташа радиус: r_B = (0,73 + 0,54 + 0,645)/3 ≈ 0,638 Å. Оттегі: rO = 1,40 Å

$$t = \frac{1.40+1.40}{\sqrt{2}(0.638+1.40)} = \frac{2.80}{1.414\times2.038} = \frac{2.80}{2.88} \approx 0.97 \quad (6)$$

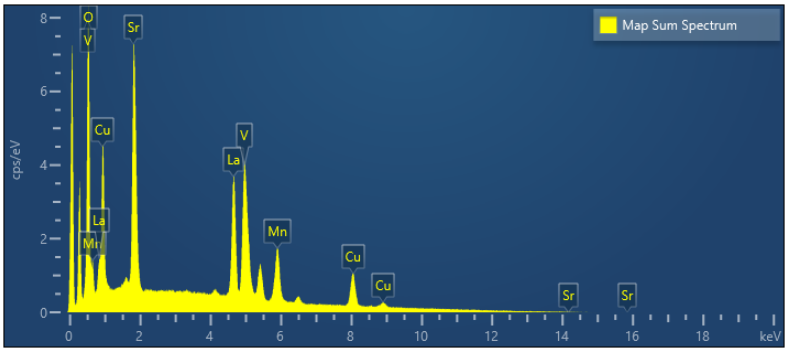
$LaSrCuVMnO_{7,5}$ қосылысы үшін A және B позицияларындағы орташа иондық радиустарды пайдаланып есептелген толеранттылық факторы t ≈ 0.97 құрайды. Алынған мәннің бірге жуық болуы перовскиттік құрылымның түзілуін көрсетеді.

SEM–EDS карталау (2, 3 суреттерде) нәтижелері $LaSrCuVMnO_{7,5}$ үлгісінің агломерацияланған поликристалдық морфологияға ие екенін көрсетті.

Элементтік карталарда La, Sr, Cu, Mn, V және O элементтерінің зерттелген аймақта салыстырмалы түрде біркелкі таралуы байқалады, бұл көпкомпонентті оксидті жүйенің қалыптасуын растайды. Жалпы алғанда, алынған нәтижелер синтез нәтижесінде күрделі оксидті жүйенің түзілгенін және катиондардың көлем бойынша салыстырмалы түрде біркелкі таралғанын көрсетеді.



Сурет 2 – $LaSrCuVMnO_{7,5}$ үлгісі бетінде La, Sr, Cu, Mn, V және O элементтерінің таралу EDS-карталары



Сурет 3 – $LaSrCuVMnO_{7,5}$ үлгісінің энергодисперсиялық рентгендік спектрі (EDS)

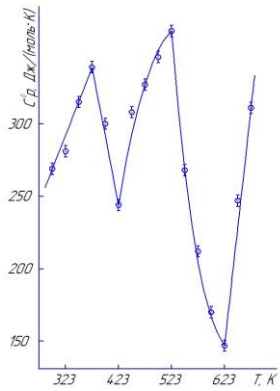
EDS Map Sum Spectrum нәтижелері зерттелген аймақта La, Sr, Cu, Mn, V және O элементтерінің бар екенін растады. Элементтердің салыстырмалы мөлшерлері көпкомпонентті $LaSrCuVMnO_{7,5}$ оксидті жүйесінің қалыптасуына сәйкес келеді.

Талдау нәтижелері бойынша үлгі құрамында оттегінің мөлшері ең жоғары болып, 33,95 масс.% және 72,35 ат.% құрады. Сонымен қатар La, Sr, Cu, Mn және V элементтерінің болуы анықталды: сәйкесінше La – 22,92 масс.% (5,63 ат.%), Sr – 19,64 масс.% (7,64 ат.%), V – 9,50 масс.% (6,36 ат.%), Cu – 7,76 масс.% (4,16 ат.%) және Mn – 6,22 масс.% (3,86 ат.%). Алынған нәтижелер синтезделген үлгі құрамында барлық негізгі элементтердің бар екенін және көпкомпонентті оксидті жүйенің қалыптасқанын растайды.

Кесте 2-де келтірілген деректер бойынша 300-673 К диапазонында α-Al_2O_3-тың жылу сыйымдылығының температураға тәуелділігі бойынша біздің зерттеулеріміздің нәтижелері ИТ-С-400 калориметрінің жұмыс дәлдігі шегінде [10]-нің нәтижелерімен қанағаттанарлықтай сәйкес келеді. Әдістеменің дәлдігі (S) тәжірибелік және әдеби мәндердің салыстырмалы айырмасы арқылы есептеліп, кестеде қосымша баған түрінде берілді. Алынған дәлдік көрсеткіші S 0,36-3,90% аралығында өзгеріп, калориметрдің паспорттық қателік шегіне сәйкес келеді, бұл өлшеулердің сенімділігін растайды.

Температураға тәуелділік қисығында (4 сурет) жылу сыйымдылықтың λ-тәрізді әсері 373 және 523 К температураларда анықталды, бұл II-текті фазалық ауысуға жатады.

Осындай фазалық ауысу, ықтимал түрде, жартылай өткізгіштік күйден металлдық өткізгіштікке өтуімен қатар жүреді. Сонымен қатар, ол сыйымдылықтың өзгеруімен, диэлектрлік өтімділіктің түрленуімен (мысалы, сегнетоэлектрлік ауысулар – Кюри және Неель нүктелері) және басқа да ілеспе физикалық құбылыстармен байланысты болуы мүмкін.



Сурет 4 – $LaSrCuVMnO_{7,5}$ құрамды қосылысы жылу сыйымдылығының температураға тәуелділігі

Фазалық ауысу температурасы ескеріле отырып, $C^o_p \sim f(T)$ [Дж/(мольК)] тәуелділіктерін сипаттайтын теңдеулер (7-11) есептеп шығарылды:

$$C_p^0 = -(11\pm0{,}5)+(939{,}3\pm42{,}4)\cdot10^{-3}T,\ (298{,}15\text{-}373\ К), \quad (7)$$

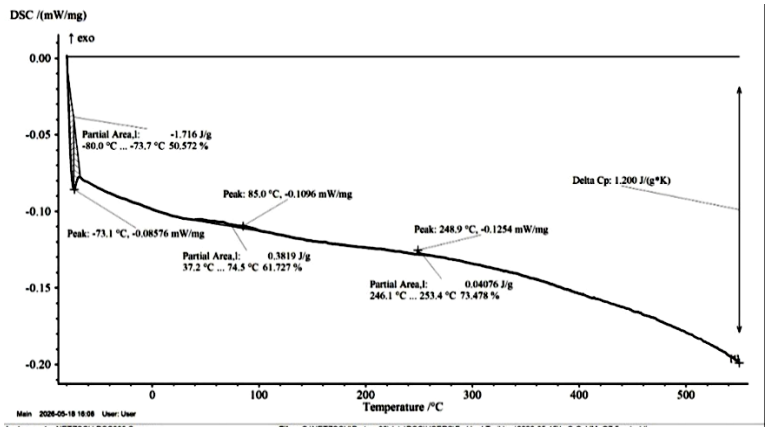
$$C_p^0 = (1051\pm48) - (1910\pm86{,}3)\cdot10^{-3}T,\ (373\text{-}423\ К), \quad (8)$$

$$C_p^0 = -(1867\pm84) - (1790{,}7\pm809)\cdot10^{-3}T - (1550{,}39\pm70{,}07)\cdot10^{5}T^{-2},\ (423\text{-}523\ К), \quad (9)$$

$$C_p^0 = -(5531\pm250) + (5988\pm270{,}58)\cdot10^{-3}T + (7557{,}97\pm341{,}50)\cdot10^{5}T^{-2},\ (523\text{-}623\ К), \quad (10)$$

$$C_p^0 = -(1896\pm86) + (3280{,}2\pm148{,}2)\cdot10^{-3}T,\ (623\text{-}673\ К). \quad (11)$$

5 -суретте азот атмосферасында 10 К/мин қыздыру жылдамдығымен −80-нен 550 °C-қа дейінгі температура аралығында алынған $LaSrCuVMnO_{7,5}$ үлгісінің DSC-қисығы (дифференциалдық сканерлеуші калориметрия) көрсетілген. Экзотермиялық эффектілердің бағыты жоғары қарай бағытталған (↑ exo).



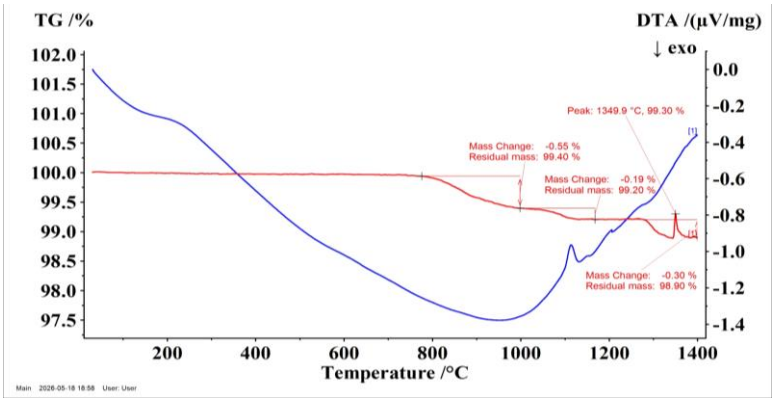
Сурет 5 – N_2 атмосферасында тіркелген $LaSrCuVMnO_{7.5}$ қосылысының DSC-қисығы

248,9 °C (≈522 K) аймағында байқалған DSC-эффект $Cp^o(T)$ тәуелділігінде анықталған 523 K маңындағы λ-тәрізді аномалиямен жақсы сәйкес келеді. Сонымен қатар 85,0 °C (≈358 K) температурасындағы әлсіз термиялық эффект 373 K аймағындағы жылу сыйымдылығы ерекшелігімен корреляцияланады. DSC және жылу сыйымдылығы деректерінің өзара сәйкестігі көрсетілген температуралық интервалдарда үлгі құрылымында термиялық белсендірілген фазалық немесе құрылымдық қайта құрылулардың жүретінін көрсетеді. Бақыланған λ-тәрізді ерекшеліктер бұл ауытқулардың II-текті фазалық ауысуларға тән белгілермен байланысты болуы мүмкін екенін жанама түрде растайды.

DSC-қисық бойынша анықталған ΔCp = 1,200 Дж/(г·К) мәні ИТ-С-400 калориметрінде алынған тәжірибелік Cp мәндерінен (0,285–0,706 Дж/(г·К)) жоғары болды. Мысалы, 373 K және 523 K температураларында Cp сәйкесінше 0,6573 және 0,7059 Дж/(г·К) құрады. Бұл айырмашылық DSC әдісінде ΔCp мәнінің абсолютті жылу сыйымдылық емес, жылу ағынының салыстырмалы өзгерісі ретінде анықталуымен, сондай-ақ өлшеу шарттарының ерекшеліктерімен байланысты болуы мүмкін.

Соған қарамастан DSC нәтижелері ИТ-С-400 калориметрінде байқалған 373 және 523 К аймақтарындағы жылу сыйымдылық аномалияларын қосымша түрде растайды.

TG-DTA талдауы $LaSrCuVMnO_{7,5}$ (6-сурет) қосылысының 1000°С-қа дейін жоғары термиялық тұрақтылыққа ие екенін көрсетті. TG-қисығында 30-1000°С аралығында айқын фазалық ыдырау немесе күрт массалық жоғалту байқалмайды. Бұл синтез нәтижесінде түзілген оксидті жүйенің тұрақты екенін және құрылымның берілген температуралық диапазонда сақталатынын көрсетеді.



Сурет 6 – Ar атмосферасында тіркелген $LaSrCuVMnO_{7,5}$ қосылысының TG-DTA қисықтары

800-1000°С аралығында байқалатын әлсіз массалық жоғалту (≈0,55 %) қалдық карбонат фазаларының ыдырауы кезінде CO_2 бөлінуімен және оттектік дефектілердің қайта құрылуымен байланысты болуы мүмкін. Жалпы массалық өзгерістің аз болуы $LaSrCuVMnO_{7,5}$ қосылысының жоғары термиялық тұрақтылығын көрсетеді.

Иондық энтропиялық инкремент жүйелерін [17] пайдалана отырып $LaSrCuVMnO_{7.5}$ құрамды қосылысының стандартты энтропиясы S°(298,15) есептелді. Содан кейін, жылу сыйымдылықтары бойынша тәжірибелік деректер және стандартты энтропияның есептелген мәндері негізінде $LaSrCuVMnO_{7.5}$ құрамды қосылысының $C_P°(T)$, термодинамикалық функцияларының S°(T), H°(T)-H°(298,15), $Ф^{xx}(T)$ температураға тәуелділіктері есептелді (5-кесте).

Кесте 5 – $BaTiO_3$ және $LaSrCuVMnO_{7.5}$ құрамды қосылысының 293-483 К үшін электрсыйымдылық (С), электрлік кедергі (R) және диэлектрлік өтімділіктің (ε) температураға тәуелділіктері (1 кГц жиілікте)

Т, К	С, nF	R, Ом	ε	lgε	lgR	С, nF	R, Ом	ε	lgε	lgR
	$BaTiO_3$					$LaSrCuVMnO_{7.5}$				
293	0,27278	13400	1296	3,11	4,13	12,107	66080	104562	5,02	4,82
303	0,27426	13270	1303	3,11	4,12	16,36	45850	141293	5,15	4,66
313	0,27715	12910	1316	3,12	4,11	20,681	34230	178612	5,25	4,53
323	0,28125	12560	1336	3,13	4,10	27,683	24700	239085	5,38	4,39
333	0,2872	11890	1367	3,14	4,08	36,385	18340	314239	5,50	4,26
343	0,29313	11210	1392	3,14	4,05	46,275	14250	399655	5,60	4,15
353	0,29916	10290	1421	3,15	4,01	56,324	11640	486443	5,69	4,07
363	0,30751	9383	1461	3,16	3,97	60,357	11110	521274	5,72	4,05
373	0,31202	8834	1482	3,17	3,95	34,79	23630	300464	5,48	4,37
383	0,31702	9061	1506	3,18	3,96	28,202	40700	243567	5,39	4,61
393	0,32255	8814	1532	3,19	3,95	30,637	49170	264597	5,42	4,69
403	0,32967	7881	1566	3,19	3,90	41,087	52290	354848	5,55	4,72
413	0,3423	7098	1626	3,21	3,85	185,94	37080	1605873	6,21	4,57
423	0,35119	6902	1668	3,22	3,84	217,19	32680	1875764	6,27	4,51
433	0,36668	6153	1742	3,24	3,79	773,66	21980	6681723	6,82	4,34
443	0,38018	6317	1806	3,26	3,80	1841,8	14850	15906726	7,20	4,17
453	0,39802	6010	1891	3,28	3,78	4462,9	9798	38543884	7,59	3,99
463	0,4169	5584	1980	3,30	3,75	10379	6382	89638346	7,95	3,80
473	0,43147	5149	2050	3,31	3,71	20158	4488	174094786	8,24	3,65
483	0,45456	4656	2159	3,33	3,67	34325	4042	296448235	8,47	3,61

5-кестеде келтірілген деректер зерттеліп отырған $LaSrCuVMnO_{7.5}$ құрамды қосылысының электрфизикалық сипаттамаларының температураға айқын тәуелділігін көрсетеді. Температураның артуымен диэлектрлік өтімділік өседі, бұл өз кезегінде үлгінің электр сыйымдылығының ұлғаюына алып келеді. Сонымен қатар, электрлік кедергінің жалпы төмендеуі байқалады, бұл заряд тасымалдаушыларының қозғалғыштығының артуымен байланысты болуы мүмкін. Жоғары температура аймағында (шамамен 413 К және одан жоғары) электрлік сипаттамалардың күрт өзгеруі тіркелді, бұл фазалық ауысудың бар екендігін көрсетуі мүмкін, сондай-ақ өткізгіштік механизмдерінің және поляризациялық процестердің өзгеруімен қатар жүреді.

373 К маңында диэлектрлік параметрлердің айқын өзгерісі байқалады: ε мәні 521274-тен 300464-ке дейін төмендеп, ал электрлік кедергі 11110 Ом-нан 23630 Ом-ға дейін артады. Бұл поляризациялық процестер мен заряд тасымалдау механизмдерінің өзгеретінін көрсетеді. Сонымен қатар 413-483 К аралығында диэлектрлік өтімділік күрт өсіп (1.61×10^{6}-ден 2.96×10^{8}-ге дейін), кедергі төмендейді, бұл жоғары температуралық құрылымдық немесе поляризациялық қайта құрылулармен байланысты болуы мүмкін және 523 К маңындағы λ-тәрізді аномалиямен сәйкес келеді.

Алынған нәтижелер λ-тәрізді жылулық эффектілердің фазалық ауысумен байланысын жанама түрде растайды. $LaSrCuVMnO_{7.5}$ жүйесін $LaCaCuZnMnO_6$-пен [13] салыстыру катиондық құрамның өзгеруі (Ca→Sr және Zn→V) аномалиялар температурасының ығысуына және диэлектрлік сипаттамалардың өзгеруіне әкелетінін көрсетті. Бұл перовскиттік тордың құрылымдық бұрмаланулары мен катиондық қоршау термодинамикалық және электрфизикалық қасиеттерге тікелей әсер ететінін көрсетеді, бұл перовскиттік оксидтердегі құрылым–қасиет өзара байланысы туралы әдеби деректермен сәйкес келеді [18].

Сонымен қатар $LaSrCuVMnO_{7.5}$ қосылысының диэлектрлік өтімділігі эталондық $BaTiO_3$-пен салыстырғанда бірнеше ондағаннан 10^5 есеге дейін жоғары мәндер көрсетеді, бұл оны жоғары диэлектрлік және перспективалы полифункционалды материал ретінде қарастыруға мүмкіндік береді.

Қорытынды

Алғаш рет 298,15-673 К температура аралығында $LaSrCuVMnO_{7.5}$ құрамды қосылысының термодинамикалық және электрфизикалық сипаттамаларына зерттеулер жүргізілді.

Жылу сыйымдылығы бойынша алынған тәжірибелік деректер негізінде оның температураға тәуелділік теңдеулері анықталды, сондай-ақ негізгі термодинамикалық функциялары – энтальпия H°(T) – H°(298,15), энтропия S°(T) және келтірілген термодинамикалық потенциал Ф**(T) мәндері есептелінді. Қосылыс 373 және 523 К температураларда, мүмкін II-текті ауысуға жататын λ-тәрізді әсерлер байқалады. Иондық инкременттер негізінде стандартты энтропиясы анықталды. Электрфизикалық сипаттамаларының температураға тәуелділіктері зерттелді. Алынған деректер жиынтығы термодинамикалық қасиеттерді болжауға арналған модельдеу үшін бастапқы база құрып, аталған қосылысты әрі қарай құжаттау үшін негіз бола алады және зерттеліп отырған қосылысты электроника саласында полифункционалды материал ретінде қолдану перспективаларын ашады.

Әдебиеттер тізімі

1. Calorimetric investigation of ternary oxides in the CuO-V_2O_5 system / P.M. Aiswarya et al // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2025. – Vol.150, № 7. – P. 16307-16323. https://doi.org/10.1007/s10973-025-14727-2.
2. Thermodynamic analysis of magnetocaloric properties of ferromagnet undergoing structural phase transition near Curie temperature / Victor A. L'vov et al // Scientific Reports. – 2025. – 15. – P. 31002 8. https://doi.org/10.1038/s41598-025-15896-8.
3. Thermodynamic properties of MnV_2O_6 and $Mn_2V_2O_7$ at high temperatures / Zhuoyang Li et al // Journal of Alloys and Compounds. – 2024. – Vol. 1005. – P. 175937. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.175937.
4. Millis A.J. Lattice effects in manganites / A.J. Millis //Nature. – 1998 – Vol. 392. – P. 147-150.
5. Specific heat studies on the charge and magnetic ordering in manganites / H.D. Yang et al **//** Phys. B: Condensed Matter. – 2003. – Vol. 329-333, Part 2. – P. 801-802. https://doi.org/10.1016/S0921-4526(02)02562-0.

6. Zhang Y. Thermodynamics of perovskite oxides / Y. Zhang, W. Chen // Progress in Materials Science. – 2018. – Vol. 98. – P. 1-67. https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2018.05.003.
7. Вест А. Химия твердого тела. – М.: Мир, 1988. – Ч. 1. – 588 с.
8. Техническое описание и инструкции по эксплуатации ИТ-С-400. – Актюбинск. Актюбинский завод «Эталон», 1986. – 48 с.
9. Теплофизические измерения и приборы / Е.С. Платунов и др. – Л.: Машиностроение, 1986. – 256 с.
10. Бодряков В.Ю. Корреляционные характеристики температурного коэффициента объемного расширения и теплоемкости корунда/ В.Ю. Бодряков // Стекло и керамика. – 2015. – № 2. – С. 30.
11. Окадзаки К. Технология керамических диэлектриков / К. Окадзаки. – М.: Энергия, 1976. – 327 с.
12. Руководство по эксплуатации. Измеритель RLC (LCR-781). – М.: ЗАО «ПриСТ», 2012. – С. 3.
13. Thermodynamic and Electrophysics of New $LaCaCuZnMnO_6$ Copper – Zinc Manganite of Lanthanum and Calcium / B.K. Kasenov et al // High Temperature. – 2022. – Vol. 60, № 4. – P. 474-478. https://doi.org/10.1134/S0018151X22020225.
14. Фесенко Е.Г. Семейство перовскита и сегнетоэлектричество / Е.Г. Фесенко. – М.: Атомиздат, 1972. – 248 с.
15. Shannon R.D. Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides / R.D. Shannon // Acta Crystallographica Section A. – 1976. – Vol. 32(5). – P. 751-767. https://doi.org/10.1107/s0567739476001551.
16. Database of Ionic Radii http://abulafia.mt.ic.ac.uk›shannon/
17. Кумок В.Н. Проблема согласования методов оценки термодинамических характеристик / В.Н. Кумок // В сб.: Прямые и обратные задачи химической термодинамики. – Новосибирск: Наука, 1987. – С. 108.
18. Exploring the interplay of lattice distortion, magnetic ordering, and dielectric behavior in $Dy_2NiFeO_{6-\delta}$ synthesized via solution chemistry / S. Punj et al // Scientific Reports, 2026. – Vol.16**.** – P. 9709. https://doi.org/10.1038/s41598-026-38284-2.

References

1. Calorimetric investigation of ternary oxides in the CuO-V2O5 system / P.M. Aiswarya et al // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2025. – Vol.150, № 7. – P. 16307-16323. https://doi.org/10.1007/s10973-025-14727-2. (In English).
2. Thermodynamic analysis of magnetocaloric properties of ferromagnet undergoing structural phase transition near Curie temperature / Victor A. L'vov et al // Scientific Reports. – 2025. – 15. – R. 31002 8. https://doi.org/10.1038/s41598-025-15896-8. (In English).
3. Thermodynamic properties of MnV2O6 and Mn2V2O7 at high temperatures / Zhuoyang Li et al // Journal of Alloys and Compounds. – 2024. – Vol. 1005. – P. 175937. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.175937. (In English).
4. Millis A.J. Lattice effects in manganites / A.J. Millis //Nature. – 1998 – Vol. 392. – P. 147-150. (In English).
5. Specific heat studies on the charge and magnetic ordering in manganites / H.D. Yang et al // Phys. V: Sondensed Matter. – 2003. – Vol. 329-333, Part 2. – P. 801-802. https://doi.org/10.1016/S0921-4526(02)02562-0. (In English).
6. Zhang Y. Thermodynamics of perovskite oxides / Y. Zhang, W. Chen // Progress in Materials Science. – 2018. – Vol. 98. – P. 1-67. https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2018.05.003. (In English).
7. Vest A. Khimiya tverdogo tela. – M.: Mir, 1988. – Ch. 1. – 588 s. (In Russian).
8. Tekhnicheskoe opisanie i instruktsii po ehkspluatatsii IT-S-400. – Aktyubinsk. Aktyubinskii zavod «Ehtalon», 1986. – 48 s. (In Russian).
9. Teplofizicheskie izmereniya i pribory / E.S. Platunov i dr. – L.: Mashinostroenie, 1986. – 256 s. (In Russian).
10. Bodryakov V.Yu. Korrelyatsionnye kharakteristiki temperaturnogo koehffitsienta ob"emnogo rasshireniya i teploemkosti korunda/ V.Yu. Bodryakov // Steklo i keramika. – 2015. – № 2. – S. 30. (In Russian).

11. Okadzaki K. Tekhnologiya keramicheskikh diehlektrikov / K. Okadzaki. – M.: Ehnergiya, 1976. – 327 s. (In Russian).
12. Rukovodstvo po ehkspluatatsii. Izmeritel' RLC (LCR-781). – M.: ZAO «PriST», 2012. – S. 3. (In Russian).
13. Thermodynamic and Electrophysics of New LaCaCuZnMnO6 Copper – Zinc Manganite of Lanthanum and Calcium / B.K. Kasenov et al // High Temperature. – 2022. – Vol. 60, № 4. – P. 474-478. https://doi.org/10.1134/S0018151X22020225. (In English).
14. Fesenko E.G. Semeistvo perovskita i segnetoehlektrichestvo / E.G. Fesenko. – M.: Atomizdat, 1972. – 248 s. (In Russian).
15. Shannon R.D. Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides / R.D. Shannon // Acta Crystallographica Section A. – 1976. – Vol. 32(5). – R. 751-767. https://doi.org/10.1107/s0567739476001551. (In English).
16. Database of Ionic Radii http://abulafia.mt.ic.ac.uk›shannon/ (In English).
17. Kumok V.N. Problema soglasovaniya metodov otsenki termodinamicheskikh kharakteristik / V.N. Kumok // V sb.: Pryamye i obratnye zadachi khimicheskoi termodinamiki. – Novosibirsk: Nauka, 1987. – S. 108. (In Russian).
18. Exploring the interplay of lattice distortion, magnetic ordering, and dielectric behavior in Dy2NiFeO6−δ synthesized via solution chemistry / S. Punj et al // Scientific Reports, 2026. – Vol.16. – P. 9709. https://doi.org/10.1038/s41598-026-38284-2. (In English).

Қаржыландыру туралы ақпарат

Бұл зерттеу Қазақстан Республикасы Өнеркәсіп және құрылыс министрлігінің Өнеркәсіп комитеті қаржыландыратын 2024-2026 жылдары BR23991563 «Минералдық және техногендік шикізатты өндірудің және кешенді өңдеудің инновациялық ресурс үнемдейтін технологияларын құру» бағдарламасы шеңберінде жүргізілді.

Б.К. Касенов[1], Ш.Б. Касенова[*], Ж.И. Сагинтаева[1], Е.Е. Куанышбеков[1], М.А. Исабаева[2]
[1]Химико-металлургический институт им. Ж. Абишева,
100009, Казахстан, г. Караганда, ул. Ермекова, 63
[2]Торайгыров университет, 140008, г. Павлодар, Казахстан
[*]e-mail: kasenovashuga@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СОЕДИНЕНИЯ СОСТАВА $LaSrCuVMnO_{7,5}$

*В статье представлены результаты исследования термодинамических и электрофизических характеристик соединения состава $LaSrCuVMnO_{7.5}$. Температурная зависимость теплоемкости соединения состава $LaSrCuVMnO_{7.5}$ исследована на серийном калориметре ИТ-С-400 в пределах температур 298.15–673 К. Полиномиальные уравнения, характеризующие температурную зависимость теплоемкости, определялись с учетом фазовых переходов. Результаты исследования показали, что при температурах 373 и 523 К наблюдаются λ-образные эффекты, которые, возможно, подлежат переходу II рода. На основе ионных инкрементов была определена стандартная энтропия и определены температурные зависимости термодинамических функций H°(T) – H°(298,15), S°(T), Ф**(T) исследуемого соединения с помощью уравнений теплоемкости.*

Исследование температурных зависимостей электрофизических характеристик (диэлектрической проницаемости и электросопротивления) проводилось путем измерения электроемкости соединения состава $LaSrCuVMnO_{7.5}$ на устройстве LCR-781 (Тайвань) на рабочих частотах 1, 5 и 10 кГц, непрерывно в сухом воздухе, в термостатическом режиме с выдержкой в течение определенного времени при каждой фиксированной температуре.

В зоне высоких температур (около 413 К и выше) зафиксировано резкое изменение электрических характеристик, что может свидетельствовать о наличии фазового перехода, а также сопровождается изменением механизмов проводимости и поляризационных процессов.

Набор данных, достигнутый в ходе исследования, служит первичной основной моделирования для прогнозирования теродинамических свойств соединения $LaSrCuVMnO_{7.5}$, а также важной информационной базой, необходимой для паспортизации лабораторного опытного образца соединения.

Ключевые слова: *Термодинамические характеристики, теплоемкость, электропроницаемость, сопротивление, температурная зависимость.*

B.K. Kasenov[1], Sh.B. Kasenova[*], Zh.I. Sagintaeva[1]., E.E. Kuanyshbekov[1], M.A. Isabaeva[2]
[1]Chemical -Metallurgical Institute named after J. Abishev,
100009, Kazakhstan, Karaganda, Yermekova street, 63
[2]Toraigyrov University, 140008, Pavlodar, Kazakhstan
[*]e-mail: kasenovashuga@mail.ru

INVESTIGATION OF THE THERMODYNAMIC AND ELECTROPHYSICAL CHARACTERISTICS OF THE COMPOUND $LaSrCuVMnO_{7.5}$.

*The article presents the results of a comprehensive study of the thermodynamic and electrophysical properties of the $LaSrCuVMnO_{7.5}$. compound. The temperature dependence of the heat capacity was investigated in the range 298.15–673 K using a serial IT-C-400 calorimeter. Polynomial equations describing the Cp(T) dependence were derived with consideration of the observed thermal anomalies. The experimental results revealed λ-shaped anomalies near 373 and 523 K, which may be associated with possible second-order phase transitions or thermally activated structural rearrangements. Based on the ionic increment method, the standard entropy was estimated, and the temperature dependences of the thermodynamic functions H°(T) − H°(298.15), S°(T), and Φ**(T) were calculated.*

The electrophysical properties of $LaSrCuVMnO_{7.5}$., including dielectric permittivity and electrical resistance, were studied using an LCR-781 meter (Taiwan) at frequencies of 1, 5, and 10 kHz under dry air conditions in a thermostatically controlled режиме. A pronounced change in the electrical characteristics was observed in the high-temperature region above ~413 K, indicating possible changes in charge transport and polarization mechanisms, which may be related to structural or phase transformations in the material.

The obtained results provide important thermodynamic and electrophysical data for understanding the behavior of the $LaSrCuVMnO_{7.5}$. compound and may serve as a basis for further modeling of its functional properties and certification of the synthesized material.

***Key words**: Thermodynamic characteristics, heat capacity, electrical permeability, resistance, temperature dependence.*

Авторлар жөнінде мәлімет

Болат Қоңырұлы Қасенов– химия ғылымдарының докторы, профессор, Ж. Әбішев атындағы Химия-металлургия институты термохимиялық процестер зертханасының меңгерушісі болған, Қарағанды қ., Қазақстан; e-mail: kasenov1946@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9394-0592.

Шұға Болатқызы Қасенова*– химия ғылымдарының докторы, профессор, Ж. Әбішев атындағы Химия-металлургия институты термохимиялық процестер зертханасының меңгерушісі, Қарағанды қ., Қазақстан; e-mail: kasenovashuga@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9755-7478.

Жеңісгүл Иманғалиқызы Сағынтаева – химия ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, Ж. Әбішев атындағы Химия-металлургия институты термохимиялық процестер зертханасының жетекші ғылыми қызметкері, Қарағанды қ., Қазақстан; e-mail: kai_sagintaeva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8655-356x.

Ерболат Ермекұлы Қуанышбеков – техника ғылымдарының магистрі Ж. Әбішев атындағы Химия-металлургия институты термохимиялық процестер зертханасының ғылыми қызметкері, Қарағанды қ., Қазақстан; e-mail: mr.ero1986@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9172-9566.

Манар Амангелдіқызы Исабаева – химия ғылымдарының кандидаты, КЕАҚ «Торайғыров университеті» химия және химиялық технология кафедрасыны профессоры, Павлодар, Қазақстан; e-mail: isabaeva.manar@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8119-3865.

Сведения об авторах

Булат Кунурович Касенов – доктор химических наук, профессор, был заведующим лабораторией термохимических процессов Химико-металлургического института им. Ж.Абишева, Караганда, Казахстан; e-mail: kasenov1946@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9394-0592.

Шуга Булатовна Касенова*– доктор химических наук, профессор, заведующая лабораторией термохимических процессов Химико-металлургического института им. Ж.Абишева, Караганда, Казахстан; e-mail: kasenovashuga@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9755-7478.

Женисгуль Имангалиевна Сагинтаева – кандидат химических наук, ассоциированный профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории термохимических процессов Химико-металлургического института им. Ж.Абишева, Караганда, Казахстан; e-mail: kai_sagintaeva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8655-356x.

Ерболат Ермекович Куанышбеков – магистр технических наук, ведущий инженер лаборатории термохимических процессов Химико-металлургического института им. Ж.Абишева, Караганда, Казахстан; e-mail: mr.ero1986@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9172-9566.

Манар Амангельдиевна Исабаева – кандидат химических наук, профессор кафедры химии и химических технологии НАО «Торайгыров университет», Павлодар, Казахстан; e-mail: isabaeva.manar@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8119-3865.

Information about authors

Bulat Kunurovich Kasenov – Doctor of chemical sciences, professor, was the head of the laboratory of thermochemical processes of Abishev Chemical-Metallurgical Institute, Karaganda, Kazakhstan; e-mail: kasenov1946@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9394-0592.

Shuga Bulatovna Kasenova* – Doctor of chemical sciences, professor, head of the laboratory of thermochemical processes of Abishev Chemical-Metallurgical Institute, Karaganda, Kazakhstan; e-mail: kasenovashuga@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9755-7478.

Zhenisgul Imangalievna Sagintaeva – candidate of chemical sciences, associate professor, leading researcher of the laboratory of thermochemical processes of Abishev Chemical-Metallurgical Institute, Karaganda, Kazakhstan; e-mail: kai_sagintaeva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8655-356x.

Erbolat Ermekovich Kuanyshbekov – Master of engineering, senior researcher of the laboratory of thermochemical processes of Abishev Chemical-Metallurgical Institute, Karaganda, Kazakhstan; e-mail: mr.ero1986@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9172-9566.

Manar Amangeldievna Isabayeva – Candidate of Chemical Sciences, Professor of the Department of Chemistry and Chemical Technology of Toraigyrov University, Pavlodar, Kazakhstan; e-mail: isabaeva.manar@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8119-3865.

Редакцияға енуі 03.04.2026
Өңдеуден кейін түсуі 21.05.2026
Жариялауға қабылданды 16.06.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-80

ҒТАХР: 31.15.31

CC BY 4.0
Check for updates

А.Қ. Әбдрәсіл[1], А.Ж. Керимкулова[1]*, Х.С. Рафикова[1], М.А. Кожайсакова[2], Д.Б. Адиканова[1]
[1]Satbayev University,
050000, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Сәтбаев көшесі 22
[2]Алматы технологиялық университеті,
050012, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Төле би көшесі 100
*e-mail: aigul.kerimkulova@satbayev.university

ТАЗА ТЕХНОЛОГИЯЛАР, ЖАСЫЛ ХИМИЯ ЖӘНЕ ТҰРАҚТЫ ДАМУ ҮШІН ТЕРЕҢ ЭВТЕКТИКАЛЫҚ ЕРІТКІШТЕРДІ ӘЗІРЛЕУ

Аңдатпа: *Терең эвтектикалық еріткіштер (ТЭЕ) – экологиялық қауіпсіздігі, төмен уыттылығы және физика-химиялық қасиеттерін бағытты реттеу мүмкіндігі арқасында жасыл химия мен тұрақты дамуда кеңінен қолданылатын жаңа буын жүйелер. Жұмыстың мақсаты – глицерин негізіндегі ТЭЕ жүйелерін синтездеп, олардың физика-химиялық, спектрлік және термиялық сипаттамаларына компоненттер табиғаты мен молярлық қатынастың әсерін кешенді зерттеу.*

Зерттеу барысында глицерин-лимон қышқылы (1:1-1:4) және глицерин-малон қышқылы (1:2-1:4) негізінде барлығы 7 эвтектикалық жүйе синтезделді. 1:2 молярлық қатынасы тұтқырлық пен термиялық тұрақтылықтың қолайлы теңгерімін көрсетті. Тығыздық ρ = 1,30-1,36 г/см³, тұтқырлық (25 °C) η = 550-1100 мПа·с аралығында өзгереді.

ИҚ-спектрлер гидроксил жолағының Δν = −30…−70 см⁻¹ төмен жиілікке ығысуы арқылы күшті сутектік байланыстардың түзілгенін көрсетті.

TGA/DTG/DSC зерттеулері ең жоғары термиялық тұрақтылықты глицерин–лимон қышқылы 1:2 жүйесі көрсеткенін анықтады (T_{onset} = 230 °C). Таиста таза қышқылдармен салыстырғанда балқу температурасының төмендеуі ΔT_m = −114…−125 °C құрап, эвтектикалық жүйелердің түзілуін растады.

Түйін сөздер: *терең эвтектикалық еріткіштер, ультракүлгін спектроскопия, инфрақызыл спектроскопия, молярлық қатынас, эвтектика.*

©А.Қ. Әбдрәсіл, А.Ж. Керимкулова, Х.С. Рафикова, М.А. Кожайсакова, Д.Б. Адиканова, 2026

Кіріспе

Жаһандық экологиялық проблемалар мен табиғи ресурстардың шектеулілігі жасыл химия қағидаттарына негізделген еріткіштерді іздеуді ғылымның басым бағытына айналдырды [1, 2]. Дәстүрлі органикалық еріткіштер – ацетон, бензол, метанол – жоғары уыттылығы, ұшқыштығы мен жарылыс қауіпімен шектелген [2]. Иондық сұйықтықтар балама ретінде жеткілікті зерттелгенімен, жоғары синтез құны мен токсикалық мәселелері кеңінен қолданылуына кедергі болуда [15, 17].

Терең эвтектикалық еріткіштер (ТЭЕ) – сутектік байланыс доноры (HBD) мен акцепторы (HBA) арасындағы күшті молекулааралық өзара әрекеттесу нәтижесінде жеке компоненттердің балқу температурасынан едәуір төмен балқу нүктесі бар қоспалар класы [10, 14]. 2004 жылы Abbott және т.б. холин хлориді–карбон қышқылдары жүйесі мысалында ТЭЕ тұжырымдамасын ұсынды [13]. Содан бері жарияланымдар саны жылына 2011 жылғы 20-дан аз мақаладан 2023 жылы 500-ден астамға дейін өсті [9]. ТЭЕ-тің негізгі артықшылықтары: биологиялық ыдырайтындылығы, синтездеудің қарапайымдылығы, төмен уыттылығы және физика-химиялық қасиеттерін бағыттап реттеу мүмкіндігі [4, 5, 10, 18, 21]. Бұл қасиеттер ТЭЕ жүйелерін катализ, экстракция, электрохимия, фармацевтика және агрохимия салаларында қолданылуға келешегі мол етеді [11, 15, 16].

Глицерин – биодизель өндірісінің жанама өнімі және жыл сайын миллиондаған тонна көлемінде алынатындықтан, қолжетімді HBD ретінде қарастырылады [13]. Оның құрамында үш –OH тобы бар болғандықтан, түрлі HBA-мен берік сутектік байланыс торларын құруға қабілетті [12, 13]. Глицерин негізіндегі ТЭЕ жүйелерін зерттеу олардың экологиялық тиімділігі мен шикізат көзінің тұрақтылығына байланысты ерекше ғылыми мәнге ие [6, 12, 18].

Алдыңғы зерттеулерге сүйенсек, Rybakova және басқалар [7] глицерин-карбон қышқылы жүйелерінің тек экстракциялық қасиеттерін қарастырған, ал Dunn және басқалар [8] холин хлориді-глицерин жүйесінің термодинамикасын зерттеген. Di Gioia және басқалары [9] осы жүйелерді кешенді спектроскопиялық тұрғыдан салыстыру жұмыстарының жетіспейтінін көрсеткен.

Ғылыми жаңалық. Глицерин негізіндегі екі ТЭЕ жүйесінің (лимон және малон қышқылдарымен) компоненттері әдебиетте белгілі болғанымен, барлық 7 молярлық қатынас (лимон қышқылы үшін 1:1-1:4, малон қышқылы үшін 1:2-1:4) үшін физика-химиялық, спектроскопиялық және термиялық параметрлер бір методология бойынша алғаш рет жүйелі салыстырылып, фазалық диаграммалар тұрғызылды. Бұл жұмыста алғаш рет әрбір қатынас үшін балқу температуралары анықталып, эвтектикалық нүктелер нақты локализацияланды.

Мақсаты – глицерин негізіндегі ТЭЕ синтездеу және олардың физика-химиялық, спектроскопиялық, термиялық сипаттамаларын кешенді зерттеу.

Зерттеу әдістері

Реактивтер мен материалдар: HBD ретінде глицерин (≥99%, Sigma-Aldrich), HBA ретінде лимон қышқылы (≥99%) және малон қышқылы (≥99%) пайдаланылды. Барлық реактивтер қосымша тазартусыз қолданылды.

ТЭЕ синтезі: классикалық қыздыру-араластыру әдісі [3] бойынша компоненттер қажетті молярлық қатынаста өлшеніп (аналитикалық таразы, ±0,0001 г), магнитті араластырғышта 40-50 °C-та мөлдір біртекті сұйық фаза түзілгенше (30-60 мин) араластырылды. Зерттелген қатынастар: глицерин:лимон қышқылы = 1:1, 1:2, 1:3, 1:4; глицерин:малон қышқылы = 1:2, 1:3, 1:4.

Физика-химиялық параметрлер. Тығыздық (ρ) пикнометриялық әдіспен 25, 40 және 60 °C-та анықталды. Тұтқырлық (η) Оствальд вискозиметрімен ASTM D445 бойынша өлшенді. Балқу температурасы Linkam THMS600 микроскопиялық термоүстелінде (5 °C/мин, –50…+200 °C) анықталды, әр үлгі үшін 3 рет өлшеу жүргізіліп, орташа мән алынды.

Зерттеу барысында келесі формулалар пайдаланылды:

Молярлық үлес (қышқыл үшін): $x=\frac{n_{(\text{қышқыл})}}{n_{(\text{қышқыл})}+n_{(\text{глицерин})}}$

Динамикалық тұтқырлық: $\eta=v\cdot\rho$

ИҚ-спектрлердегі гидроксил жолағының ығысуы: $\Delta v=v_{\text{ТЭЕ}}-v_{\text{реагент}}$

мұндағы $v_{\text{ТЭЕ}}$ – ТЭЕ құрамындағы –OH тербеліс жиілігі, $v_{\text{реагент}}$ – таза қышқылдағы –OH жиілігі.

Термиялық ыдыраудың басталу температурасы (T_{onset}) массаның 5% жоғалуына сәйкес анықталды.

ИҚ-спектроскопия. FTIR спектрлері Smart iTX (Diamond) қондырғысында 400-4000 $см^{-1}$, 32 сканерлеу, 4 $см^{-1}$ ажыратымдылықпен, бөлме температурасында алынды.

УК-спектроскопия. Peak Instruments C-7000UV спектрофотометрінде 200-400 нм, кварц кюветада (l = 1 см). Әрбір үлгі 3 рет өлшеніп, орташа ± SD түрінде берілді.

Термиялық талдау. TGA/DTG/DSC TG-DSC термоанализаторында ауа атмосферасында (50 мл/мин), 25-400 °C, 10 °C/мин жүргізілді.

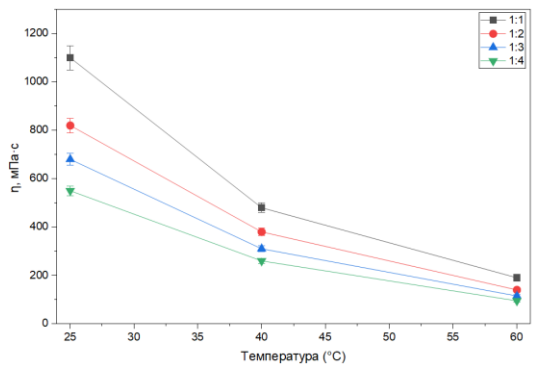
Барлық өлшеулер n=3, нәтижелер орташа ± SD. Молярлық қатынастың әсері бір факторлы ANOVA және Student's t-test арқылы бағаланды, статистикалық маңыздылық $p < 0,05$ деп белгіленді.

Зерттеу нәтижелері

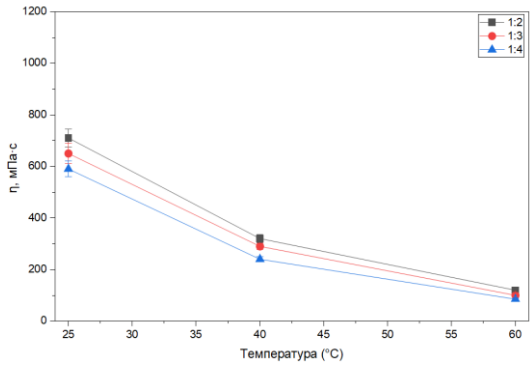
1-кестеде синтезделген 7 ТЭЕ жүйесінің тығыздығы мен тұтқырлығының температуралық тәуелділігі келтірілген. Тұтқырлық пен тығыздық температура өскен сайын экспоненциалды төмендейді. 1:1 қатынасында глицерин-лимон қышқылы жүйесінің тұтқырлығы (1100 мПа·с) таза глицериннен (934 мПа·с) жоғары, ал қышқыл үлесі артқан сайын тұтқырлық төмендейді (1:4 – 550 мПа·с). Малон қышқылы негізіндегі ТЭЕ тұтқырлығы глицериннен төмен (710 мПа·с, 1:2). Лимон қышқылы негізіндегі жүйелер үшін ANOVA нәтижесі молярлық қатынастың тұтқырлыққа ($F(3,8) = 12,47$; $p < 0,01$) және тығыздыққа ($F(3,8) = 8,93$; $p < 0,01$) әсері статистикалық маңызды екенін көрсетті. Қосымша t-test бойынша 1:2 және 1:4 арасындағы айырмашылық $p < 0,05$ деңгейінде маңызды (сурет 1, 2).

Кесте 1 – ТЭЕ жүйелерінің физика-химиялық қасиеттері

Жүйе	Молярлық қатынас	η, мПа·с (25°C)	η, мПа·с (40°C)	η, мПа·с (60°C)	ρ, г/см³ (25°C)	ρ, г/см³ (40°C)	ρ, г/см³ (60°C)
Глицерин	–	934 ± 10	310 ± 20	95 ± 10	1,261 ± 0.003	1,252 ± 0.002	1,239 ± 0.003
Лимон қышқылы	–	–	–	–	1.66 ± 0.03	–	–
Малон қышқылы	–	–	–	–	1.61 ± 0.02	–	–
Глицерин + лимон қышқылы	1:1	1100 ± 50	480 ± 20	190 ± 10	1,36 ± 0,01	1,33 ± 0,01	1,29 ± 0,01
	1:2	820 ± 30	380 ± 15	140 ± 8	1,34 ± 0,01	1,31 ± 0,01	1,27 ± 0,01
	1:3	680 ± 25	310 ± 12	115 ± 6	1,33 ± 0,01	1,30 ± 0,01	1,26 ± 0,01
Глицерин + малон қышқылы	1:2	710 ± 35	320 ± 15	120 ± 6	1,32 ± 0,01	1,29 ± 0,01	1,25 ± 0,01
	1:3	650 ± 40	290 ± 12	100 ± 5	1,31 ± 0,01	1,28 ± 0,01	1,24 ± 0,01
	1:4	590 ± 30	240 ± 10	85 ± 4	1,30 ± 0,01	1,27 ± 0,01	1,23 ± 0,01



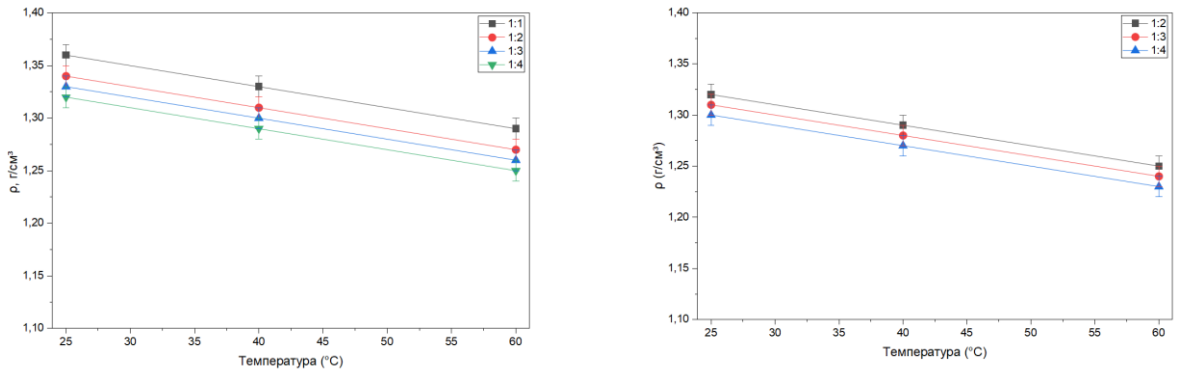
а) Лимон қышқылы+глицерин



ә) Малон қышқылы+глицерин

Сурет 1 – Синтезделген ТЭЕ жүйелерінің молярлық қатынасына байланысты динамикалық тұтқырлығының (η) температуралық тәуелділік қисықтары

Балқу температуралары және фазалық диаграммалар. 2-кестеде барлық жүйелердің балқу температуралары, 3-суретте ликвидус қисықтары көрсетілген. Екі жүйеде де 1:2 молярлық қатынас (x=0,67) эвтектикалық нүктеге сәйкес келеді: лимон қышқылы үшін 28°C, малон қышқылы үшін 22°C. Таза компоненттермен салыстырғанда балқу температурасының төмендеуі ΔT_m = -114…-125 °C құрайды.

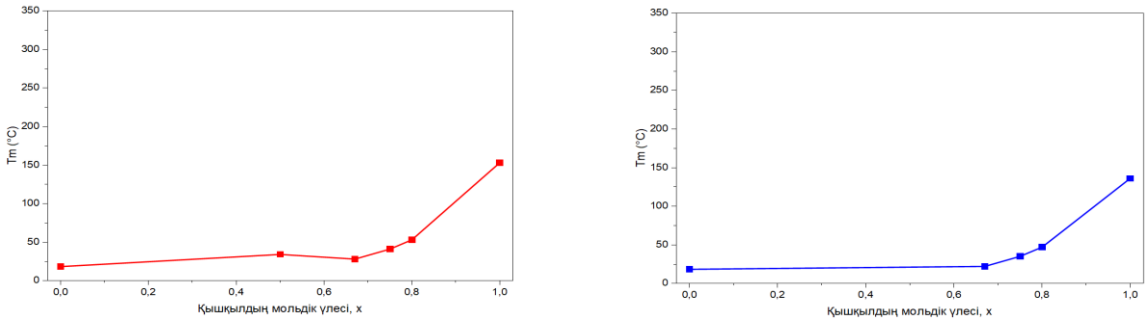


а) Лимон қышқылы+глицерин ә) Малон қышқылы+глицерин

Сурет 2 – Синтезделген ТЭЕ жүйелерінің молярлық қатынасына байланысты тығыздығының (ρ) температуралық тәуелділік қисықтары

Кесте 2 – ТЭЕ жүйелерінің балқу температуралары

Жүйе	Молярлық қатынас	Қышқылдың үлесі (x)	T_m(орташа), °C
Глицерин	–	0.00	18.2 ± 0.3
Лимон қышқылы	–	1.00	153.0 ± 0.5
Малон қышқылы	–	1.00	136.0 ± 0.5
Глицерин + лимон қышқылы	1:1	0.50	34.0 ± 0.4
	1:2 (эвтектика)	0.67	28.0 ± 0.2
	1:3	0.75	41.0 ± 0.5
	1:4	0.80	53.0 ± 0.4
Глицерин + малон қышқылы	1:2 (эвтектика)	0.67	22.0 ± 0.2
	1:3	0.75	35.0 ± 0.4
	1:4	0.80	47.0 ± 0.4



а) Лимон қышқылы+глицерин ә) Малон қышқылы+глицерин

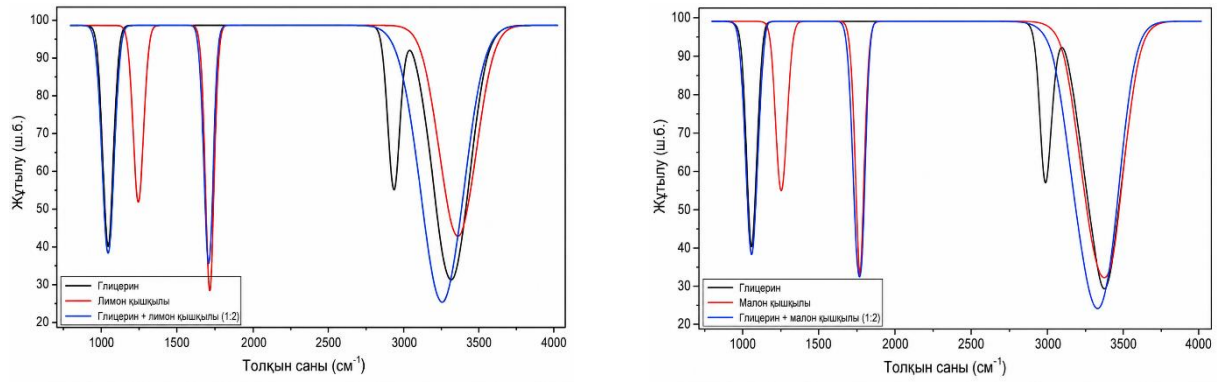
Сурет 3 – Глицерин негізіндегі ТЭЕ жүйелерінің фазалық күй диаграммасы (Liquidus қисықтары)

Мұнда x осі – қышқылдың мольдік үлесі, y осі – балқу температурасы.

3-кестеде FTIR деректері жинақталған, 4-суретте спектрлер берілген. Гидроксил жолағының төмен жиілікке ығысуы (Δν = −30…−70 $см^{-1}$) күшті сутектік байланыстардың түзілуін көрсетеді. C=O және C–O тербелістеріне сәйкес жолақтардың сақталуы бастапқы функционалдық топтардың жүйе түзілуі барысында сақталғанын көрсетеді.

Кесте 3 – FTIR спектрлеріндегі негізгі жұтылу жолақтарының сәйкестендірілуі және ТЭЕ түзілуінің спектрлік белгілері

Жүйе	ν(O–H), $см^{-1}$	Δν(O–H), $см^{-1}$	ν(C=O), $см^{-1}$	ν(C–O), $см^{-1}$	Негізгі спектрлік өзгеріс	Молекулааралық әсерлесу сипаты
Глицерин	3290-3320	-	-	1040-1060	Кең O–H жолағы	Ішкі сутектік байланыстар
Лимон қышқылы	3300-3400	-	1715-1725	1240-1260	Айқын C=O жолағы	Кристалдық димерлік құрылым
Малон қышқылы	3250-3350	-	1690-1710	1240-1260	Кең O–H және C=O жолақтары	Молекулааралық байланыстар
Глицерин + лимон қышқылы (1:2)	3230-3260	-50…-70	1710-1715	1040-1060	O–H төмен жиілікке ығысқан	Күшті сутектік байланыс
Глицерин + малон қышқылы (1:2)	3240-3270	-30…-50	1710-1720	1040-1060	O–H ығысуы байқалады	Орташа молекулааралық байланыс



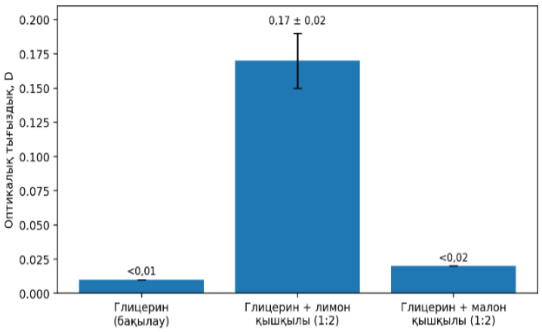
а) Лимон қышқылы+глицерин ә) Малон қышқылы+глицерин

Сурет 4 – Синтезделген ТЭЕ үлгілері мен бастапқы компоненттердің ИҚ-спектрлері

УК-спектроскопия. 4-кесте мен 5-суретте УК-деректерінің сандық көрсеткіштері берілген. Глицерин-лимон қышқылы (1:2) жүйесі λ=290 нм-де D=0,17±0,02 мәнін көрсетеді, бұл карбоксил тобының n→π* ауысуына сәйкес [19, 20]. Глицерин-малон қышқылы жүйесінде оптикалық тығыздық D<0,02.

Кесте 4 – ТЭЕ жүйелерінің УК-спектроскопиялық көрсеткіштері

Жүйе / Үлгі	Молярлық қатынас	λmax, нм	Оптикалық тығыздық, D (орташа ± SD)	Электрондық ауысу түрі	Оптикалық сипаттамасы
Глицерин (бақылау)	–	–	< 0.01	–	УК-аймақта толық мөлдір
Глицерин + лимон қышқылы	1:2	290	0.17 ± 0.02	n→π*	Карбоксил тобының хромофорлы белсенділігі
Глицерин + малон қышқылы	1:2	–	< 0.02	–	Оптикалық таза, инертті орта

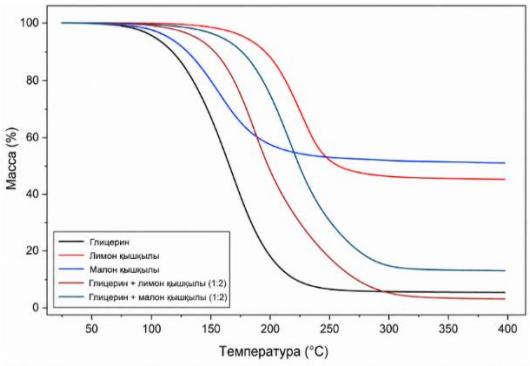


Сурет 5 – ТЭЕ жүйелерінің УК-спектроскопиядағы негізгі оптикалық көрсеткіштері

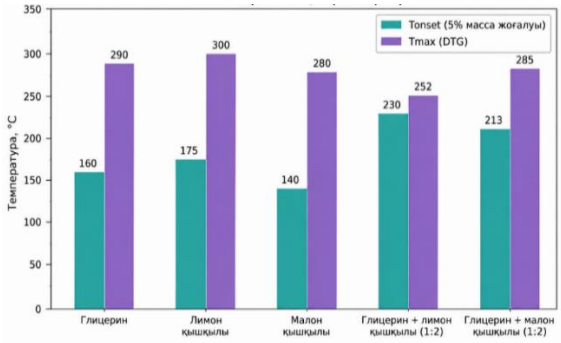
5-кестеде негізгі термиялық параметрлер, 6-суретте TGA қисығы, ал 7-суретте TGA/DTG талдауларынан алынған негізгі термиялық параметрлердің салыстырмасы берілген. Глицерин-лимон қышқылы (1:2) жүйесі 230°C, ал глицерин-малон қышқылы (1:2) 213°C T_{onset} мәндерін көрсетті. DSC бойынша ТЭЕ балқу температуралары 22°C және 28°C болып анықталған, бұл эвтектикалық жүйелердің түзілуін қолдайды.

Кесте 5 – Бастапқы реагенттер мен оптималды ТЭЕ (1:2) жүйелерінің термиялық сипаттамалары

Жүйе	Tonset (5% масса жоғалту), °C	Максималды ыдырау температурасы T_{max} (DTG), °C	400 °C-тағы көмірленген қалдық, %	DSC бойынша негізгі эндотермиялық ауысулар, °C
Глицерин	160	290	~5.0	18.2 (балқу), 290 (қайнау/ыдырау)
Лимон қышқылы	175	300	~45.0	153.0 (балқу), 225 (декарбоксилдену)
Малон қышқылы	140	280	~50.0	136.0 (балқу), 185 (декарбоксилдену)
Глицерин + Лимон қышқылы (1:2)	230	252	4.25	28.0 (ТЭЕ балқуы), 235 (ыдырау басы)
Глицерин + Малон қышқылы (1:2)	213	285	14.27	22.0 (ТЭЕ балқуы), 215 (ыдырау басы)



Сурет 6 – Үлгілердің термиялық ыдырау (TGA) қисықтары



Сурет 7 – TGA/DTG/DSC талдауларынан алынған негізгі термиялық параметрлердің салыстырмасы

Қорытынды

1. Глицерин мен карбон қышқылдары (лимон, малон) негізінде 7 ТЭЕ жүйесі сәтті синтезделіп, температураның жоғарылауымен тығыздық пен тұтқырлықтың төмендейтіні анықталды.
2. Linkam THMS600 көмегімен толық фазалық диаграммалар құрылып, 1:2 молярлық қатынаста (x = 0,67) эвтектикалық нүктелер анықталды: лимон қышқылы үшін 28 °C, малон қышқылы үшін 22 °C. Тиісті таза қышқылдармен салыстырғанда балқу температурасының төмендеуі ΔT_m = −114…−125 °C құрап, эвтектикалық жүйелердің түзілуін растады.
3. FTIR талдауы гидроксил жолағының Δν = −30…−70 $см^{-1}$ төмен жиілікке ығысуын көрсетіп, күшті сутектік байланыстардың қалыптасқанын растады.
4. УК-спектроскопияда глицерин-лимон қышқылы жүйесі 290 нм-де n→π* ауысуына сәйкес жұтылу (D=0,17) көрсетсе, глицерин-малон қышқылы жүйесі УК-аймақта толық мөлдір (D<0,02).
5. TGA/DTG/DSC зерттеулері жүйелердің 213–230 °C аралығындағы T_{onset} мәндері бойынша жоғары термиялық тұрақтылық көрсететінін анықтады, бұл олардың жасыл химия процестерінде қолдануға перспективалы екенін көрсетеді.
6. Алынған нәтижелерді әдебиеттегі ұқсас жүйелермен салыстырғанда [7, 8, 12], біздің жұмыста алғаш рет барлық 7 молярлық қатынас үшін кешенді физика-химиялық, спектроскопиялық және термиялық деректер біріктірілді, фазалық диаграммалар тұрғызылып, эвтектикалық нүктелер нақтыланды.

Әдебиеттер тізімі

1. Glubokie ehvtekticheskie rastvoriteli v biotekhnologii / O.V. Morozova i dr. – 2023. https://www.fbras.ru/wp-content/uploads/2023/01/9-Morozova.pdf. (in Russian).
2. Deep eutectic solvents in green chemistry: A review / B. Barman et al // Journal of Ravishankar University. Ser. B. – 2025. – Vol. 38, № 1. https://doi.org/10.52228/jrub.2025-38-1-7.
3. Ferreira S. A comprehensive review of deep eutectic solvents and their applications for the extraction of bioactive compounds of pharmaceutical interest / S. Ferreira, M. Sarraguca // Pharmaceuticals. – 2024. – Vol. 17, № 1. – Art. 124. https://doi.org/10.3390/ph17010124.
4. Deep eutectic solvents towards eco-friendly polymeric materials / U.A. Virasinghe et al // Green Chemistry. – 2024. – Vol. 26. – P. 8497-8527. https://doi.org/10.1039/D4GC00532E.

5. Coutinho J.A.P. A comprehensive overview of deep eutectic solvents: Properties, applications, and future perspectives / J.A.P. Coutinho, A.R. Ferreira, M.G. Freire // Green Chemistry. – 2023. – Vol. 25. – P. 3542-3570. https://doi.org/10.1039/D2GC04715C.
6. Deep eutectic solvents (DESs) and natural deep eutectic solvents (NADESs): Designer solvents for green extraction of anthocyanins / M. Minu et al // Sustainable Chemistry and Pharmacy. – 2023. – Vol. 34. – Art. 101168. https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101168.
7. Rybakova A. Deep eutectic solvents based on carboxylic acids and glycerol or propylene glycol as green media for extraction of bioactive substances / A. Rybakova, N. Kudrina, E. Losev // Molecules. – 2023. – Vol. 28. – Art. 6978. https://doi.org/10.3390/molecules28196978.
8. Dunn J. Thermodynamic study of choline chloride-based deep eutectic solvents with water and methanol / J. Dunn, C. Hawkins, S.D. Sherrod // Journal of Chemical & Engineering Data. – 2020. – Vol. 65. – P. 1540-1549. https://doi.org/10.1021/acs.jced.9b01113.
9. Di Gioia M.L. Advances in the development and application of deep eutectic solvents / M.L. Di Gioia, A.R.C. Duarte, M.B. Gawande // Frontiers in Chemistry. – 2023. – Vol. 11. – Art. 1258718. https://doi.org/10.3389/fchem.2023.1258718.
10. Ijardar S.P. Revisiting the physicochemical properties and applications of deep eutectic solvents / S.P. Ijardar, V. Singh, R.L. Gardas // Molecules. – 2022. – Vol. 27, № 4. – Art. 1368. https://doi.org/10.3390/molecules27041368.
11. Deep eutectic solvents: A review of fundamentals and applications / B.B. Hansen et al // Chemical Reviews. – 2021. – Vol. 121, № 3. – P. 1232-1285. https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.0c00385.
12. Makris D.P. Glycerol and glycerol-based deep eutectic mixtures as emerging green solvents for polyphenol extraction: The evidence so far / D.P. Makris, S. Lalas // Molecules. – 2020. – Vol. 25, № 24. – Art. 5842. https://doi.org/10.3390/molecules25245842.
13. Deep eutectic solvents formed between choline chloride and carboxylic acids: versatile alternatives to ionic liquids / A.P. Abbott et al // Journal of the American Chemical Society. – 2004. – Vol. 126, № 29. – P. 9142-9147. https://doi.org/10.1021/ja048266j.
14. Smith E.L. Deep eutectic solvents (DESs) and their applications / E.L. Smith, A.P. Abbott, K.S. Ryder // Chemical Reviews. – 2014. – Vol. 114, № 21. – P. 11060-11082. https://doi.org/10.1021/cr300162p.
15. Potential applications of deep eutectic solvents in nanotechnology / A. Abo-Hamad et al // Chemical Engineering Journal. – 2015. – Vol. 273. – P. 551-567. https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.03.091.
16. Chen Y. Revisiting greenness of ionic liquids and deep eutectic solvents / Y. Chen, T. Mu // Green Chemical Engineering. – 2021. – Vol. 2, № 2. – P. 174-186. https://doi.org/10.1016/j.gce.2021.01.004.
17. Martins M.A.R. Insights into the nature of eutectic and deep eutectic mixtures / M.A.R. Martins, S.P. Pinho, J.A.P. Coutinho // Journal of Solution Chemistry. – 2019. – Vol. 48, № 7. – P. 962-982. https://doi.org/10.1007/s10953-018-0793-1.
18. Perna F.M. Deep eutectic solvents and their applications as green solvents / F.M. Perna, P. Vitale, V. Capriati // Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry. – 2020. – Vol. 21. – P. 27-33. https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2019.10.002.
19. Silverstein R.M. Spectrometric Identification of Organic Compounds / R.M. Silverstein, F.X. Webster, D.J. Kiemle. – 8th ed. – Wiley, 2015. – 450 p.
20. Pretsch E. Structure Determination of Organic Compounds / E. Pretsch, P. Bühlmann, M. Badertscher. – 5th ed. – Springer, 2020. – 430 p.
21. Deep eutectic solvents: syntheses, properties and applications / Q. Zhang et al // Chemical Society Reviews. – 2025. – Vol. 54. – P. 1-25. https://doi.org/10.1039/D4CS00123K.

А.Қ Әбдрәсіл[1], А.Ж. Керимкулова[1]*, Х.С. Рафикова[1], М.А. Кожайсакова[2], Д.Б. Адиканова[1]
[1]Satbayev University, 050000, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22
[2]Алматинский технологический университет,
050012, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Толе би, 100
*e-mail: aigul.kerimkulova@satbayev.university

РАЗРАБОТКА ГЛУБОКИХ ЭВТЕКТИЧЕСКИХ РАСТВОРИТЕЛЕЙ ДЛЯ ЧИСТЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ЗЕЛЁНОЙ ХИМИИ И УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ

Глубокие эвтектические растворители (ГЭР) – это системы нового поколения, широко применяемые в зелёной химии и устойчивом развитии благодаря экологической безопасности, низкой токсичности и возможности целенаправленного регулирования физико-химических свойств. Цель работы – синтез ГЭР -систем на основе глицерина и комплексное исследование влияния природы компонентов и молярного соотношения на их физико-химические, спектральные и термические характеристики.

В ходе исследования синтезировано 7 эвтектических систем на основе глицерин-лимонной кислоты (1:1-1:4) и глицерин-малоновой кислоты (1:2-1:4). Молярное соотношение 1:2 показало благоприятный баланс вязкости и термической стабильности. Плотность составляет ρ = 1,30-1,36 г/см³, вязкость (при 25 °C) варьируется в интервале η = 550-1100 мПа·с.

ИК-спектры показали образование сильных водородных связей, о чём свидетельствует смещение гидроксильной полосы на Δν = −30…−70 см⁻¹ в низкочастотную область.

Исследования TGA/DTG/DSC показали, что наивысшей термической стабильностью обладает система глицерин–лимонная кислота 1:2 (T_{onset} = 230 °C). По сравнению с соответствующими чистыми кислотами температура плавления снизилась на ΔT_m = −114…−125 °C, что подтверждает образование эвтектических систем.

Ключевые слова: *глубокие эвтектические растворители, ультрафиолетовая спектроскопия, инфракрасная спектроскопия, молярное соотношение, эвтектика.*

A.K. Abdrasil[1], A.Zh. Kerimkulova[1]*, H.S. Rafikova[1], M.A. Kozhaisakova[2], D.B. Adikanova[1]
[1]Satbayev University,
050000, Republic of Kazakhstan, Almaty, Satpayev Street 22
[2]Almaty University of Technology,
050012, Republic of Kazakhstan, Almaty, Tole Bi Street 100
*e-mail: aigul.kerimkulova@satbayev.university

DEVELOPMENT OF DEEP EUTECTIC SOLVENTS FOR CLEAN TECHNOLOGIES, GREEN CHEMISTRY, AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT

Deep Eutectic Solvents (DES) are a new generation of systems widely used in green chemistry and sustainable development due to their environmental safety, low toxicity, and the ability to tune their physicochemical properties in a targeted manner. The aim of this work is to synthesize DES systems based on glycerol and to comprehensively study the effect of component nature and molar ratio on their physicochemical, spectral, and thermal characteristics.

During the study, a total of 7 eutectic systems were synthesized based on glycerol-citric acid (1:1-1:4) and glycerol-malonic acid (1:2-1:4). The 1:2 molar ratio showed a favorable balance between viscosity and thermal stability. The density ranges from ρ = 1.30-1.36 g/cm³, and the viscosity (at 25 °C) varies in the range η = 550-1100 mPa·s.

IR spectra showed the formation of strong hydrogen bonds, as evidenced by a shift of the hydroxyl band by Δν = −30…−70 cm⁻¹ toward lower wavenumbers.

TGA/DTG/DSC studies revealed that the highest thermal stability was exhibited by the glycerol–citric acid 1:2 system (T_{onset} = 230 °C). Compared with the corresponding pure acids, the melting temperature decreased by ΔT_m = −114…−125 °C, confirming the formation of eutectic systems.

Key words: *deep eutectic solvents, ultraviolet spectroscopy, infrared spectroscopy, molar ratio, eutectics.*

Авторлар туралы мәлімет

Алина Қанатқызы Әбдрәсіл – 1 курс магистранты, Satbayev University; e-mail: alinaabdrassil@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-7643-5483.

Айгуль Жадраевна Керимкулова* – қауымдастырылған профессор, Satbayev University; e-mail: aigul.kerimkulova@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4167-8921.

Хадичахан Сабыржановна Рафикова – профессор, Satbayev University; e-mail: kh.rafikova@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8028-2244.

Мадина Амановна Кожайсакова – сеньор-лектор, Алматы технологиялық университеті; e-mail: madinaamanovna@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4414-3287.

Динара Бакытбековна Адиканова – аға оқытушы, Satbayev University; e-mail: adikanovadinara@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1445-1553.

Сведения об авторах

Алина Қанатқызы Әбдрәсіл – магистрант 1-го курса, Satbayev University; e-mail: alinaabdrassil@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-7643-5483.

Айгуль Жадраевна Керимкулова* – ассоциированный профессор, Satbayev University; e-mail: aigul.kerimkulova@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4167-8921.
Хадичахан Сабыржановна Рафикова – профессор, Satbayev University; e-mail: kh.rafikova@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8028-2244.
Мадина Амановна Кожайсакова – сеньор-лектор, Алматинский технологический университет; e-mail: madinaamanovna@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4414-3287.
Динара Бакытбековна Адиканова – старший преподаватель, Satbayev University; e-mail: adikanovadinara@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1445-1553.

Information about the authors
Alina Kanatkyzy Abdrassil – 1st-year master's student, Satbayev University; e-mail: alinaabdrassil@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-7643-5483.
Aigul Zhadraevna Kerimkulova* – Associate professor, Satbayev University; e-mail: aigul.kerimkulova@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4167-8921.
Khadichakhan Sabyrzhanovna Rafikova – Professor of Chemical and Biochemical Engineering Department, Satbayev University; e-mail: kh.rafikova@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8028-2244.
Madina Amanovna Kozhaisakova – Senior Lecturer, Almaty Technological University; e-mail: madinaamanovna@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4414-3287.
Dinara Bakytbekovna Adikanova – Senior Lecturer Satbayev University; e-mail: adikanovadinara@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1445-1553.

Редакцияға енуі 07.04.2026
Өңдеуден кейін түсуі 17.08.2026
Жариялауға қабылданды 18.08.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-81

IRSTI: 67.09.43

S. Ashimova [1], T. Mukanov[2,3], Y. Amirbayev[4], D. Alizhanov[4], G. Aitkaliyeva[2]
[1]JSC "Kazakhstan Road Research Institute", 050061, Kazakhstan, Almaty, 2A Nurpeisov Street
[2]JV "CASPI BITUM" LLP, 130000, Kazakhstan, Aktau, Promzona 5
[3]Satbayev University, 050013, Kazakhstan, Almaty, Satbayev Street 22
[4]Kazakhstan Highway Research Institute, 010000, Kazakhstan, Astana, 37 Jekebatyr Street
*e-mail: g.aitkaliyeva@satbayev.university

BIO-BASED REJUVENATOR FOR RESTORING THE PROPERTIES OF AGED BITUMEN

Annotation: *The aging of bitumen during production and service life leads to the formation of oxygen-containing functional groups, increased stiffness, and deterioration of pavement performance. Therefore, the development of effective and environmentally friendly rejuvenators for restoring aged bitumen remains an important task in asphalt recycling technologies.*

In this study, a bio-based rejuvenator was synthesized using oleic acid and imidazoline and applied to RTFOT-aged BND 70/100 bitumen at concentrations of 1, 3, and 5 wt.%. The influence of the rejuvenator on the properties of aged bitumen was evaluated using Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), thermogravimetric analysis (TG), and conventional physical tests.

FTIR analysis revealed changes in the intensity of carbonyl and sulfoxide absorption bands, indicating interaction between the rejuvenator and the aged bitumen matrix. TG analysis showed that the modified binders maintained high thermal stability up to 400 °C. The addition of the rejuvenator improved the physical properties of aged bitumen by increasing penetration and ductility while reducing the softening point. The most significant effect was achieved at a rejuvenator content of 5 wt.%.

The results demonstrate the potential of the developed bio-based rejuvenator for restoring the performance characteristics of aged bituminous binders and enhancing the sustainability of asphalt recycling technologies.

Key words: *aged bitumen; bio-based rejuvenator; oleic acid; imidazoline; asphalt recycling; FTIR; thermogravimetric analysis.*

©S. Ashimova, T. Mukanov, Y. Amirbayev, D. Alizhanov, G. Aitkaliyeva, 2026

Introduction

Asphalt pavements are widely used in road construction due to their excellent performance, ease of application, and cost-effectiveness. However, during service, bituminous binders are exposed to various environmental factors, including elevated temperatures, atmospheric oxygen, ultraviolet radiation, and moisture, which lead to their gradual aging [1]. As a result of thermo-oxidative processes, the chemical composition of bitumen changes, accompanied by an increase in the content of oxygen-containing functional groups, primarily carbonyl and sulfoxide compounds. These changes lead to increased stiffness, reduced ductility, and deterioration of the performance properties of asphalt pavements [2, 3].

Current understanding considers bitumen aging as a complex physicochemical process involving oxidation, evaporation of light fractions, changes in the colloidal structure, and asphaltene aggregation. Disruption of the balance between the maltene and asphaltene phases leads to increased brittleness of the bituminous binder and reduced resistance to cracking [4, 5]. Therefore, restoring the properties of aged bitumen has become one of the key challenges in the production of recycled asphalt mixtures and in extending the service life of asphalt pavements.

One of the most effective approaches to restoring the performance characteristics of aged bitumen is the use of rejuvenators. Their primary function is to replenish the lost light fractions, reduce viscosity, and partially restore the structural–colloidal state of the bituminous system [6]. Traditionally, petroleum-derived products have been used as rejuvenators; however, their application is associated with a high dependence on non-renewable resources, significant volatility, and limited environmental sustainability [7].

In recent years, considerable attention has been devoted to the development of bio-based rejuvenators derived from renewable plant resources. According to the literature, vegetable oils and their derivatives can effectively restore the properties of aged bitumen due to the presence of long-chain aliphatic moieties and polar functional groups, which promote interactions with the components of the bitumen matrix [8,9]. Furthermore, the use of bio-based rejuvenators is consistent with the principles of sustainable development and resource conservation in modern road construction [10].

Despite numerous reports on the successful use of vegetable oils as rejuvenators, most studies have focused on individual bio-oils, whereas the mechanisms governing their interactions with the components of aged bitumen remain insufficiently understood. Particular interest has recently been directed toward plant-derived fatty acids containing long-chain aliphatic moieties and polar functional groups, which can exert a plasticizing effect and contribute to the restoration of the structural-colloidal state of the bituminous system.

Therefore, the aim of this study was to synthesize a bio-based rejuvenator derived from oleic acid and imidazoline and to investigate its effect on the properties of aged bitumen using Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy and thermogravimetric analysis (TGA).

Experimental

Method for Obtaining the Bio-Based Rejuvenator

The bio-based rejuvenator was synthesized using oleic acid and imidazoline as the main components. Oleic acid (approximately 89 wt.%) was used as the primary component, while imidazoline (approximately 11 wt.%) served as a functional modifying additive.

Prior to preparation of the rejuvenator, oleic acid was preheated to 40-50°C to reduce its viscosity. Imidazoline was then gradually added under continuous mechanical stirring. The resulting mixture was stirred for 40-60 min until a homogeneous composition was obtained. To improve the stability of the formulation and promote interactions between the components, the mixture was further maintained at 60-70°C for 1 h. After completion of the preparation process, the product was cooled to room temperature and stored in a sealed container.

The resulting bio-based additive was a homogeneous viscous formulation intended for restoring the performance properties of aged bituminous binders.

Imidazoline was introduced into the composition as a surface-active and structure-stabilizing component. Its presence promotes improved compatibility of the organic components with the bitumen matrix, enhanced dispersion of asphaltene aggregates, and a more uniform distribution of the rejuvenator within the structure of aged bitumen. In addition, imidazoline can reduce the interfacial tension and improve the adhesion properties of the modified binder.

Application of the bio-based rejuvenator

The effectiveness of the prepared bio-based rejuvenator was evaluated using aged BND 70/100 bitumen. The original bitumen was subjected to preliminary aging using the Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT), which simulates the short-term aging of bituminous binders during asphalt mixture production.

After aging, the bio-based rejuvenator was incorporated into the bitumen at concentrations of 1, 3, and 5 wt.% based on the bitumen mass. The modification process was carried out by heating the bitumen to a working temperature of 140–160 °C, followed by mechanical stirring until a homogeneous composition was obtained. The resulting samples were designated as AB-1, AB-3, and AB-5, respectively.

Evaluation of the effectiveness of the bio-based rejuvenator

The aged bitumen samples modified with 1, 3, and 5 wt.% of the bio-based rejuvenator were characterized using Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy and thermogravimetric (TG) analysis.

FTIR analysis was performed using a Bruker ALPHA II Fourier transform infrared spectrometer in attenuated total reflectance (ATR) mode over the wavenumber range of 4000–400 cm^{-1}. The analysis was conducted to evaluate changes in the functional group composition and to confirm the interactions between the rejuvenator components and the aged bitumen matrix after modification.

TG analysis was carried out using a NETZSCH STA 449 F3 thermal analyzer under a nitrogen atmosphere over the temperature range of 30-800 °C at a heating rate of 10 °C min^{-1}. TG analysis was used to evaluate the thermal stability of the modified bituminous binders and to determine the influence of the bio-based rejuvenator on the thermal decomposition behavior of aged bitumen.

Evaluation of the effect of the bio-based additive on the physical and mechanical properties of bitumen

To evaluate the effectiveness of the developed rejuvenator, the main physical and mechanical properties of the original, aged, and modified bitumen were determined, including penetration at 25 °C, softening point determined by the Ring-and-Ball method, and ductility at 25 °C.

Penetration was determined in accordance with ASTM D5 at 25 °C. This parameter characterizes the consistency and stiffness of the bituminous binder. The softening point was determined using the Ring-and-Ball method in accordance with ASTM D36. This parameter was used to evaluate the temperature susceptibility of the bitumen and its ability to maintain its performance properties at elevated temperatures. Ductility was determined at 25 °C according to ASTM D113. The test was performed to evaluate the ability of the bitumen to undergo deformation without failure and to assess its plastic properties.

The obtained results were used to evaluate the degree of restoration of the performance properties of aged bitumen after the incorporation of the bio-based rejuvenator and to determine the optimum content of the modifying additive.

Results and discussion

Effect of the bio-based additive on the composition of aged bituminous binder

The FTIR spectrum of the synthesized bio-based rejuvenator is presented in Figure 1. The spectrum is characterized by absorption bands corresponding to the functional groups of oleic acid and the imidazoline component constituting the formulation. Intense absorption bands at approximately 2920 and 2850 cm^{-1} are assigned to the asymmetric and symmetric stretching vibrations of the aliphatic $–CH_2$ and $–CH_3$ groups, which are characteristic of the long-chain hydrocarbon moieties of oleic acid.

A pronounced absorption band in the 1700–1715 cm^{-1} region is attributed to the stretching vibrations of the carbonyl (C=O) group, confirming the presence of oxygen-containing fatty acid-derived compounds in the bio-based rejuvenator.

Absorption bands in the 1450–1370 cm^{-1} region are associated with the bending vibrations of methylene ($–CH_2$) and methyl ($–CH_3$) groups in aliphatic chains. In the 1250–1000 cm^{-1} region, absorption bands assigned to the stretching vibrations of C–N and C=N bonds, characteristic of the imidazoline component, are observed.

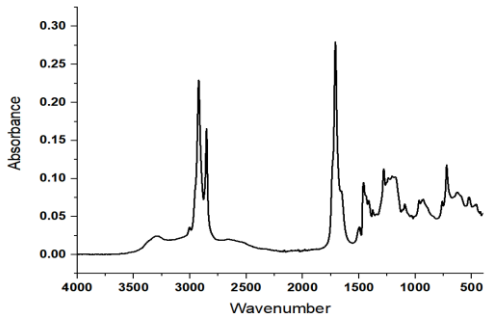


Figure 1 – FTIR spectrum of the prepared bio-based rejuvenator

The presence of long-chain aliphatic moieties together with oxygen- and nitrogen-containing functional groups indicates the potential ability of the prepared bio-based rejuvenator to interact with the components of aged bitumen. According to the literature [11], the formation of carbonyl and sulfoxide groups during the aging process increases the polarity of bitumen and disrupts its structural-colloidal state owing to enhanced aggregation of asphaltene structures. Therefore, the incorporation of compounds containing long aliphatic chains and polar functional groups may improve the compatibility between the maltene and asphaltene phases of aged bitumen [12].

The FTIR spectrum of the aged BND 70/100 bitumen is presented in Figure 2. The spectrum exhibits absorption bands characteristic of hydrocarbon-based bituminous systems.

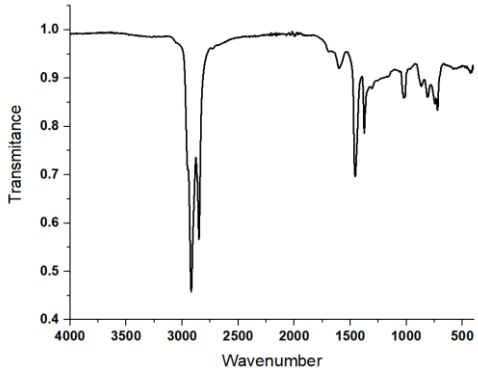


Figure 2 – FTIR spectrum of the aged bituminous binder

Intense absorption bands at approximately 2920 and 2850 cm^{-1} are assigned to the asymmetric and symmetric stretching vibrations of the aliphatic $–CH_2$ and $–CH_3$ groups present in the hydrocarbon components of bitumen. The absorption band at approximately 1600 cm^{-1} is attributed to the stretching vibrations of aromatic C=C bonds, characteristic of the aromatic structures of the bituminous binder. Absorption bands in the 1450-1370 cm^{-1} region correspond to the bending vibrations of aliphatic groups.

An absorption band observed at approximately 1030 cm^{-1} is assigned to sulfoxide (S=O) groups, the formation of which is associated with the thermo-oxidative aging of bitumen. According to the literature, bitumen aging is accompanied by the formation of oxygen-containing functional groups, including carbonyl and sulfoxide compounds, which increase the polarity of the system and disrupt the structural–colloidal balance of the bitumen [13]. These results confirm the presence of characteristic features of oxidative aging in the bitumen after treatment by RTFOT.

Following the incorporation of the bio-based rejuvenator, changes in the intensity of several absorption bands were observed in the FTIR spectra of the modified samples (Figure 3) compared with the aged bitumen. The most pronounced changes were detected in the 1700-1715 cm^{-1} region, where a more intense absorption band assigned to the stretching vibrations of the carbonyl (C=O) group appeared. The appearance of this band is attributed to the presence of oxygen-containing compounds derived from oleic acid, which is one of the main components of the prepared bio-based rejuvenator.

In addition, a decrease in the intensity of the absorption band at approximately 1030 cm^{-1}, assigned to sulfoxide (S=O) groups formed during the oxidative aging of bitumen, was observed. These changes may indicate a partial modification of the structural-colloidal state of the aged bituminous binder following the incorporation of the bio-based rejuvenator.

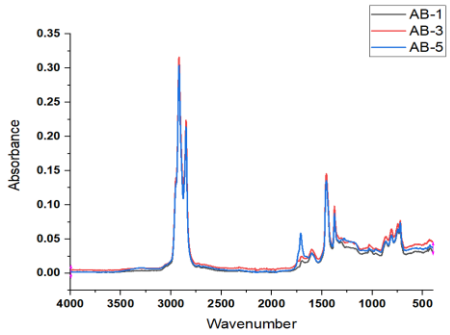


Figure 3 – FTIR spectra of aged BND 70/100 bitumen modified with AB-1, AB-3, and AB-5

Overall, the FTIR results confirm the successful incorporation of the prepared bio-based rejuvenator into the aged bitumen. The observed changes in the intensity of the characteristic absorption bands associated with oxygen-containing, aliphatic, and sulfoxide functional groups indicate interactions between the rejuvenator components and the bitumen matrix and suggest a possible partial restoration of the structural–colloidal state of the aged bituminous binder.

Effect of the bio-based rejuvenator on the thermal stability of bitumen

Thermogravimetric analysis was performed to evaluate the effect of the bio-based rejuvenator content on the thermal behavior of the modified bituminous binders. As shown in Figure 4, all the investigated samples exhibited only a slight mass loss below 200 °C, indicating sufficient thermal stability within the temperature range typically used for the production and modification of bituminous materials.

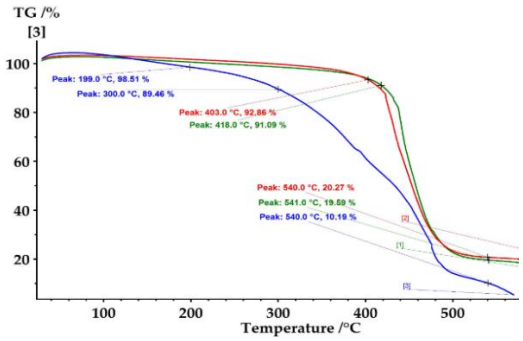


Figure 4 – TG curves of aged BND 70/100 bitumen modified with AB-1 (1), AB-3 (2), and AB-5 (3)

With further increasing temperature, a gradual mass loss was observed for all samples. More pronounced changes began at approximately 250-300°C, which may be attributed to the evaporation and thermal decomposition of the less thermally stable organic components present in the bio-based rejuvenator.

As shown in Figure 4, all the investigated samples exhibited high thermal stability up to approximately 400°C, with only a slight mass loss observed in this temperature range. A more pronounced decrease in mass occurred at approximately 420-450°C and was associated with the thermal decomposition of the organic components of the bituminous binder.

The most pronounced mass loss was observed in the 450-550°C temperature range, corresponding to the thermal decomposition of high-molecular-weight resin-asphaltene structures. With further increasing temperature, the rate of mass loss gradually decreased, while the remaining residue can be attributed to the most thermally stable components of the bituminous system.

An increase in the bio-based rejuvenator content resulted in a shift of the onset of intensive mass loss toward lower temperatures. The most pronounced effect was observed for the AB-5 sample, which may be attributed to the higher proportion of the organic components of the rejuvenator in the bituminous binder. A similar trend has been reported in the literature for

rejuvenated bitumen, where the incorporation of rejuvenators leads to an earlier onset of thermal decomposition owing to the presence of lighter and more mobile organic compounds [14].

The reduction in thermal stability with increasing rejuvenator content is attributed to the plasticizing effect of the bio-based rejuvenator and the presence of aliphatic moieties derived from oleic acid, which exhibit lower thermal stability than the high-molecular-weight resin–asphaltene structures of bitumen.

Effect of the bio-based rejuvenator on the physical and mechanical properties of aged bitumen

The results of the physical and mechanical tests (Table 1) demonstrated that the incorporation of the bio-based rejuvenator had a significant effect on the properties of the aged bitumen. After aging by RTFOT, the penetration value decreased from 75 to 56 (0.1 mm), the ductility decreased from 118 to 69 cm, and the softening point increased from 48 to 52 °C, indicating an increase in the stiffness of the bituminous binder.

Table 1 – Effect of RTFOT aging on the physical and mechanical properties of BND 70/100 bitumen

Sample	Penetration at 25 °C	Softening Point (Ring-and-Ball), °C	Ductility at 25 °C
Original bitumen	75	48	118
RTFOT-aged bitumen	56	52	69

The incorporation of the bio-based rejuvenator resulted in a gradual restoration of the performance properties of the bitumen (Table 2).

Table 2 – Physical and mechanical properties of RTFOT-aged bitumen after modification with the bio-based rejuvenator

Bitumen sample after rejuvenator modification	Penetration at 25 °C	Softening Point (Ring-and-Ball), °C	Ductility at 25 °C
AB- 1	59	53	66
AB- 3	78	48	91
AB- 5	88	45	104

The most pronounced effect was observed at a rejuvenator content of 5 wt.%, where the penetration increased to 88 (0.1 mm) and the ductility reached 104 cm. At the same time, the softening point decreased to 45°C. These results demonstrate the plasticizing effect of the bio-based rejuvenator and its ability to partially compensate for the changes induced by the thermo-oxidative aging of bitumen.

Conclusions

In this study, a plant-based rejuvenator based on oleic acid and imidazoline was prepared, and its effect on the properties of aged BND 70/100 bitumen was investigated.

The FTIR analysis confirmed the presence of aliphatic, carbonyl, and nitrogen-containing functional groups in the bio-based rejuvenator. Following its incorporation into the bitumen, changes in the intensity of the absorption bands assigned to carbonyl and sulfoxide functional groups were observed, indicating interactions between the rejuvenator components and the bitumen matrix and suggesting a partial restoration of the structural-colloidal state of the bitumen.

Thermogravimetric analysis showed that the modified samples maintained high thermal stability up to 400°C. With increasing rejuvenator content, a slight reduction in thermal stability was observed, which may be attributed to the presence of plant-derived aliphatic components.

The incorporation of the bio-based rejuvenator contributed to the restoration of the physical and mechanical properties of the aged bitumen. The formulation containing 5 wt.% rejuvenator exhibited the best performance, providing the greatest increase in penetration and ductility while simultaneously reducing the softening point.

The obtained results demonstrate the potential of the developed bio-based rejuvenator for restoring the performance properties of aged bituminous binders.

References

1. Wang R. Review on the Mechanism and Performance Enhancement of Biomass-Based Rejuvenators in Reclaimed Asphalt Recycling / R. Wang, X. Chen, P. Cheng // Polymers. – 2026. – Vol. 18, № 5. – Article 585. https://doi.org/10.3390/polym18050585.
2. State of the art: multiscale evaluation of bitumen ageing behaviour / Y. Hu et al // Fuel. – 2022. – Vol. 326. – Article 125045.
3. Recovering the properties of aged bitumen using bio-rejuvenators derived from municipal wastes / Y. Hu et al // Construction and Building Materials. – 2024. – Vol. 438. – Article 137268. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137268.
4. Evaluating the ageing degrees of bitumen by rheological and chemical indices / Y. Hu et al // Road Materials and Pavement Design. – 2023.
5. Towards an enhanced understanding of the functional groups within bitumen during ageing processes / Y. Hu et al // Advances in Functional Pavements. – Boca Raton: CRC Press, 2024. – P. 83-87.
6. Application of Rejuvenators in Asphalt Binders: Classification and Micro- and Macro-Properties / C. Xing et al // Coatings. – 2025. – Vol. 15. – Article 1177. https://doi.org/10.3390/coatings15101177.
7. Performance evaluation of aged asphalt rejuvenated with various bio-oils based on rheological property index / J. Wang et al // Journal of Cleaner Production. – 2023. – Vol. 385. – Article 135593. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135593.
8. Babagoli R. Bio-binders in sustainable asphalt technologies: A comprehensive bibliometric analysis / R. Babagoli // Results in Engineering. – 2026. – Vol. 29. – Article 109426. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.109426.
9. Evaluating efficacy of bio-based and non-bio rejuvenators for sustainable asphalt restoration and durability / R. Liu et al // Construction and Building Materials. – 2025. – Vol. 505. – Article 144733. – https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.144733.
10. The Rejuvenation Effect of Bio-Oils on Long-Term Aged Asphalt / J. Wang et al // Materials. – 2024. – Vol. 17. – Article 3316. https://doi.org/10.3390/ma17133316.
11. Experimental and molecular simulation insights into rejuvenation mechanism of bio-rejuvenated asphalt binders: Tailoring epoxy groups in bio-rejuvenators / Y. Chen et al // Construction and Building Materials. – 2025. – Vol. 495. – Article 143725. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.143725.
12. Beyond oxidation: a new framework for understanding and effective simulation of asphalt aging in the era of climate-adaptive pavements / F. Ghasemi et al // Road Materials and Pavement Design. – 2026. – P. 1-90. https://doi.org/10.1080/14680629.2026.2660314.
13. Oil Sludge as a Rejuvenator for Aged Bitumen: Structural and Thermal Effect / G. Aitkaliyeva et al // Applied Sciences. – 2025. – Vol. 15. – Article 6757. https://doi.org/10.3390/app15126757.
14. Multi-Characterization of Rejuvenators' Impact on Aged Asphalt Binder Properties / S. Hu et al // Materials. – 2025. – Vol. 18. – Article 4060. https://doi.org/10.3390/ma18174060.

Funding: *This research was funded by Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan, grant number AP26103375 «Green Technologies for Sustainable Road Construction: Development of a Rejuvenating Composition for Asphalt Recycling».*

С. Ашимова[1], Т. Мұқанов[2,3], Е. Әмірбаев[4], Д. Әліжанов[4], Г. Айтқалиева[2]*

[1]«Қазақстан жол ғылыми-зерттеу институты» АҚ, 050061, Қазақстан, Алматы қ., Нұрпейісов көшесі, 2А
[2]«CASPI BITUM» БК ЖШС, 130000, Қазақстан, Ақтау қ., 5-өнекәсіптік аймақ
[3]Сәтпаев университеті, 050013, Қазақстан, Алматы қ., Сәтбаев көшесі, 22
[4]Қазақстан автомобиль жолдары ғылыми-зерттеу институты,
010000, Қазақстан, Астана қ., Жекебатыр көшесі, 37
*e-mail: g.aitkaliyeva@satbayev.university

БИТУМ ҚАСИЕТТЕРІН ЖАҚСАРТУҒА АРНАЛҒАН ӨСІМДІК ТЕКТІ ҚОСПА

Битумның өндіру және пайдалану процесіндегі қартаюы оттекті функционалдық топтардың түзілуіне, қаттылығының артуына және жол жабынының пайдалану қасиеттерінің төмендеуіне алып келеді. Осыған байланысты қартаюға ұшыраған битумның қасиеттерін қалпына

келтіруге арналған тиімді әрі экологиялық қауіпсіз реювенаторларды әзірлеу асфальтбетонды регенерациялау технологияларындағы өзекті мәселелердің бірі болып табылады.

Бұл жұмыста олеин қышқылы мен имидазолин негізінде өсімдік текті реювенатор синтезделіп, оның БНД 70/100 маркалы қартаюға ұшыраған битум қасиеттеріне әсері зерттелді. Биоқоспа RTFOT әдісімен қысқа мерзімді қартаюға ұшыратылған битумға 1, 3 және 5 масс.% мөлшерінде енгізілді. Реювенатордың әсері ИҚ Фурье-спектроскопиясы, термогравиметриялық талдау және стандартты физика-механикалық сынақтар әдістерімен бағаланды.

FTIR талдауы карбонил және сульфоксид топтарына сәйкес келетін жұтылу жолақтарының қарқындылығы өзгеретінін көрсетті, бұл реювенатор компоненттерінің битум матрицасымен өзара әрекеттесуін дәлелдейді. Термогравиметриялық талдау модификацияланған үлгілердің 400°C-қа дейін жоғары термиялық тұрақтылығын сақтайтынын көрсетті. Биоқоспаны енгізу пенетрация мен созылғыштық көрсеткіштерінің артуына және жұмсару температурасының төмендеуіне ықпал етті. Ең жоғары тиімділік реювенатордың 5 масс.% мөлшерінде байқалды.

Алынған нәтижелер әзірленген өсімдік текті реювенаторды қартаюға ұшыраған битум тұтқырларының пайдалану қасиеттерін қалпына келтіру және асфальтбетонды регенерациялау технологияларының тиімділігін арттыру үшін қолданудың перспективалы екенін көрсетті.

Түйін сөздер: *қартаюға ұшыраған битум; өсімдік текті реювенатор; олеин қышқылы; имидазолин;асфальтбетонды қайта өңдеу; ИҚ Фурье-спектроскопиясы; термогравиметриялық талдау.*

С. Ашимова[1], Т. Муканов[2,3], Е. Амирбаев[4], Д. Алижанов[4], Г. Айткалиева[2]*

[1]АО «Казахстанский дорожный научно-исследовательский институт»,
050061, Республика Казахстан, г.Алматы, ул. Нурпеисова , 2А
[2]ТОО СП «CASPI BITUM», 130000, Республика Казахстан, г. Актау, Промышленная зона 5
[3]Сатпаев университет, 050013, Республика Казахстан, г. Алматы, ул.Сатпаева, 22
[4]Казахстанский научно-исследовательский институт автомобильных дорог,
010000, Республика Казахстан, г. Астана, ул. Жекебатыр, 37
*e-mail: g.aitkaliyeva@satbayev.university

РЕЮВЕНАТОР РАСТИТЕЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СВОЙСТВ СОСТАРЕННОГО БИТУМА

Старение битума в процессе производства и эксплуатации сопровождается образованием кислородсодержащих функциональных групп, повышением жесткости и ухудшением эксплуатационных характеристик дорожных покрытий. В связи с этим разработка эффективных и экологически безопасных реювенаторов для восстановления свойств состаренного битума является актуальной задачей технологий регенерации асфальтобетона.

В данной работе синтезирован реювенатор растительного происхождения на основе олеиновой кислоты и имидазолина и исследовано его влияние на свойства состаренного битума марки БНД 70/100. Биодобавку вводили в битум, подвергнутый краткосрочному старению методом RTFOT, в количестве 1, 3 и 5 мас. %. Влияние реювенатора оценивали методами ИК Фурье-спектроскопии, термогравиметрического анализа и стандартных физико-механических испытаний.

Результаты FTIR-анализа показали изменение интенсивности полос поглощения карбонильных и сульфоксидных групп, что свидетельствует о взаимодействии компонентов реювенатора с битумной матрицей. Термогравиметрический анализ установил сохранение высокой термической стабильности модифицированных образцов до 400 °C. Введение биодобавки способствовало улучшению физико-механических характеристик состаренного битума за счет увеличения пенетрации и дуктильности при одновременном снижении температуры размягчения. Наиболее выраженный эффект был достигнут при содержании реювенатора 5 мас. %.

Полученные результаты подтверждают перспективность применения разработанного реювенатора для восстановления эксплуатационных свойств состаренных битумных вяжущих и повышения эффективности технологий регенерации асфальтобетонных материалов.

Ключевые слова: *состаренный битум; реювенатор растительного происхождения; олеиновая кислота; имидазолин; регенерация асфальтобетона; FTIR-спектроскопия; термогравиметрический анализ.*

Авторлар туралы мәліметтер

Салтанат Жандарбекқызы Ашимова – PhD, «Қазақстан жол ғылыми-зерттеу институты» АҚ Алматы қаласындағы филиалының жол-құрылыс материалдары және жаңа технологиялар бөлімінің бастығы, Алматы қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: s.ashimova@qazjolgzi.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4070-6430.

Талғат Дүйсенбіұлы Муканов – Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университетінің докторанты, «СП «CASPI BITUM» ЖШС бас директорының бірінші орынбасары, Ақтау қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: mukanov_talga@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-9253-0284.

Ерік Дихамбайұлы Амирбаев – «Қазақстан жол ғылыми-зерттеу институты» АҚ вице-президенті, Астана қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: e.amirbaev@qazjolgzi.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8508-8803.

Дінмұхамбет Әліжанұлы Әліжанов – «Қазақстан жол ғылыми-зерттеу институты» АҚ Алматы қаласындағы филиалының жол-құрылыс материалдары және жаңа технологиялар бөлімінің кіші ғылыми қызметкері, Алматы қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: d.alizhanov@qazjolgzi.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-3469-3728.

Гүлзат Сляшқызы Айткалиева* – PhD, қауымдастырылған профессор, Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті, Алматы қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: g.aitkaliyeva@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9872-6317.

Information about the authors

Saltanat Ashimova – PhD, Head of the Department of Road Construction Materials and New Technologies, Almaty Branch of JSC Kazakhstan Highway Research Institute, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: s.ashimova@qazjolgzi.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4070-6430.

Talgat Mukanov – PhD student of Satbayev University First Deputy General Director, JV CASPI BITUM LLP, Aktau, Republic of Kazakhstan; e-mail: mukanov_talga@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-9253-0284.

Yerik Amirbayev – Vice President, JSC Kazakhstan Highway Research Institute, Astana, Republic of Kazakhstan; e-mail: e.amirbaev@qazjolgzi.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8508-8803.

Dinmukhambet Alizhanov – Junior Researcher, Department of Road Construction Materials and New Technologies, Almaty Branch of JSC Kazakhstan Highway Research Institute, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: d.alizhanov@qazjolgzi.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-3469-3728.

Gulzat Aitkaliyeva* – PhD, Associate Professor, K.I. Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: g.aitkaliyeva@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9872-6317.

Сведения об авторах

Салтанат Жандарбековна Ашимова – PhD, начальник отдела дорожно-строительных материалов и новых технологий филиала АО «Казахстанский дорожный научно-исследовательский институт» в г.Алматы, Республика Казахстан; e-mail: s.ashimova@qazjolgzi.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4070-6430.

Талгат Дюсенбиевич Муканов – докторант Казахского национального исследовательского технического университета имени К.И. Сатпаева, первый заместитель генерального директора ТОО «СП «CASPI BITUM», г. Актау, Республика Казахстан; e-mail: mukanov_talga@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-9253-0284.

Ерик Дихамбаевич Амирбаев – вице-президент АО «Казахстанский дорожный научно-исследовательский институт», г. Астана, Республика Казахстан; e-mail: e.amirbaev@qazjolgzi.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8508-8803.

Дінмұхамбет Алижанұлы Алижанов – младший научный сотрудник отдела дорожно-строительных материалов и новых технологий филиала АО «Казахстанский дорожный научно-исследовательский институт» в г. Алматы, Республика Казахстан; e-mail: d.alizhanov@qazjolgzi.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-3469-3728.

Гульзат Сляшевна Айткалиева* – PhD, ассоциированный профессор, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, г. Алматы, Республика Казахстан; e-mail: g.aitkaliyeva@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9872-6317.

Received 01.07.2026
Revised 18.08.2026
Accepted 01.09.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-82

BY 4.0
Check for updates

МРНТИ: 52.45.19

С.К. Танирбергенова[1], Қ. Қамұнұр[1,2], Л.К. Бейсембаева[1,2], Л.А. Мусапирова[1,2]*
[1]Институт проблем горения,
050012, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Богенбай батыра, 172
[2]Казахский национальный университет имени аль-Фараби,
050040, Республика Казахстан, г. Алматы, пр. аль-Фараби, 71
*e-mail: lyazzat.mussapyrova@gmail.com

СЕЛЕКТИВНАЯ ФЛОТАЦИЯ ИЛЬМЕНИТА С ПРИМЕНЕНИЕМ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЛИГНОСУЛЬФОНАТОВ

Аннотация: *В работе исследована возможность применения модифицированных лигносульфонатов в качестве флотационных реагентов для селективного обогащения ильменитовой руды Сатпаевского месторождения (Казахстан). Исходная руда характеризовалась высоким содержанием силикатной пустой породы (SiO_2 – 71,5%) и сравнительно низким содержанием TiO_2 (6,8%), что обусловливает необходимость использования селективных собирателей. Были синтезированы три серии модифицированных лигносульфонатов: глубокосульфированные (LS-S), пероксидно-окисленные (LS-O1) и перманганатно-окисленные (LS-O2). Реагенты охарактеризованы методами ИК-Фурье-спектроскопии, измерения поверхностного натяжения и ζ-потенциала.*

Установлено, что наилучшие флотационные показатели обеспечивает реагент LS-O2, полученный перманганатным окислением лигносульфоната натрия. Для данного реагента зафиксированы максимальное извлечение и селективность, наиболее отрицательный ζ-потенциал (−31 мВ) и наименьшее поверхностное натяжение (40,9 мН/м). Проведено исследование влияния pH пульпы, расхода реагента и температуры на эффективность флотации ильменита. Оптимальные условия процесса составили: pH 7,5, расход LS-O2 – 0,25 кг/т и температура 30°C. При данных параметрах достигнуты извлечение ильменита 73,4%, содержание TiO_2 в концентрате 20,8% и селективность 81,0%.

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения модифицированных лигносульфонатов в качестве эффективных и относительно доступных реагентов для флотационного обогащения низкотитанистых ильменитовых руд.

Ключевые слова: *ильменитовая руда; селективная флотация; модифицированные лигносульфонаты; флотореагенты; обогащение титансодержащих руд.*

1. Введение

Ильменитовые руды являются одним из основных источников титансодержащего сырья, используемого для получения диоксида титана, металлического титана, сварочных электродов, защитных покрытий, специальных сплавов и функциональных материалов. В последние годы потребление титансодержащей продукции устойчиво возрастает вследствие развития авиационно-космической техники, химической промышленности, энергетики и машиностроения. Одновременно наблюдается постепенное истощение богатых месторождений, что приводит к необходимости вовлечения в переработку бедных, тонковкраплённых и комплексных ильменитовых руд с высоким содержанием силикатной пустой породы [1-3].

Обогащение подобных руд представляет значительные технологические трудности. Ильменит часто тесно ассоциирован с кварцем, полевыми шпатами и алюмосиликатами, а размеры раскрытия минералов нередко находятся в тонкодисперсной области [4-6]. При этом поверхностные свойства ильменита и сопутствующих силикатных минералов во многих случаях оказываются близкими, что осложняет селективное разделение. Дополнительные сложности связаны с высокой гидрофильностью поверхности кварца, присутствием поверхностных гидроксильных групп и изменением зарядового состояния минералов в зависимости от pH среды.

©С.К. Танирбергенова, Қ. Қамұнұр, Л.К. Бейсембаева, Л.А. Мусапирова, 2026

Наиболее эффективным методом обогащения тонковкраплённых титансодержащих руд остаётся флотация. Для флотации ильменита традиционно применяются анионные собиратели на основе жирных кислот, их солей, гидроксамовых кислот и некоторых фосфорорганических соединений [7-10]. Однако использование таких реагентов сопровождается рядом недостатков: повышенным расходом, ограниченной селективностью, чувствительностью к составу пульпы, а также сравнительно высокой стоимостью отдельных типов реагентов. Кроме того, многие традиционные собиратели характеризуются недостаточной экологической безопасностью и низкой биоразлагаемостью, что ограничивает перспективы их широкого промышленного применения.

В связи с этим значительный интерес представляет разработка флотореагентов на основе доступного возобновляемого сырья, способных обеспечивать селективное взаимодействие с поверхностью титансодержащих минералов. Одним из наиболее перспективных классов подобных веществ являются лигносульфонаты - водорастворимые производные технического лигнина, образующиеся в качестве побочных продуктов сульфитной переработки древесины. Лигносульфонаты содержат развитую систему ароматических, фенольных, карбоксильных и сульфонатных групп, благодаря чему обладают поверхностной активностью и способностью к комплексообразованию с ионами металлов [11-15].

Химическая модификация лигносульфонатов позволяет существенно изменять их физико-химические свойства и направленно повышать флотационную активность. В частности, окислительная модификация способствует образованию карбонильных и хиноидных структур, способных к донорно-акцепторному взаимодействию с координационно-ненасыщенными поверхностными центрами Fe^{3+} и Ti^{4+} на поверхности ильменита [16]. Одновременно сульфонатные группы обеспечивают растворимость реагента и стабилизацию адсорбционного слоя, а фенольные фрагменты могут участвовать в образовании водородных связей с поверхностными гидроксильными группами минералов.

Несмотря на перспективность модифицированных лигносульфонатов, их применение в процессах флотационного обогащения ильменитовых руд изучено недостаточно. В литературе ограниченно представлены данные о влиянии типа модификации лигносульфонатов на показатели извлечения и селективности, а также о механизмах взаимодействия подобных реагентов с поверхностью ильменита и кварца. Особенно актуальным является поиск реагентов, обеспечивающих эффективную флотацию низкотитанистых руд с высоким содержанием силикатной пустой породы.

В настоящей работе исследована возможность применения модифицированных лигносульфонатов в качестве флотационных реагентов для обогащения ильменитовой руды Сатпаевского месторождения. Проведён синтез нескольких серий модифицированных реагентов, включающих глубокосульфированные, пероксидно-окисленные и перманганатно-окисленные образцы. Выполнена их сравнительная характеристика по поверхностно-активным и электрокинетическим свойствам, а также изучено влияние pH пульпы, расхода реагента и температуры на показатели флотации.

Научная новизна настоящей работы заключается в применении перманганатно-окисленного лигносульфоната натрия LS-O2 в качестве селективного флотационного реагента для обогащения низкотитанистой ильменитовой руды Сатпаевского месторождения. В отличие от традиционных собирателей на основе жирных и гидроксамовых кислот, предложенный реагент получен на основе доступного водорастворимого производного технического лигнина и содержит сульфонатные, фенольные, карбонильные и хиноидные функциональные группы. Наличие данных групп обеспечивает возможность селективного взаимодействия с катионными поверхностными центрами Fe^{3+} и Ti^{4+} на поверхности ильменита. В работе впервые для данной руды проведено сопоставление различных типов модификации лигносульфонатов и показано, что перманганатно-окисленный образец LS-O2 обеспечивает наилучшее сочетание извлечения, селективности, поверхностной активности и электрокинетических характеристик.

2. Материалы и методы

2.1. Исходная руда

В качестве объекта исследования использовалась представительная проба ильменитовой руды Сатпаевского месторождения. Проба была высушена при 105°C до

постоянной массы, раздроблена на щековой дробилке до крупности менее 5 мм и измельчена в лабораторной шаровой мельнице до крупности 85% класса −74 мкм.

2.2 Синтез флотореагентов

Исходным сырьём служила натриевая соль технического лигносульфоната (Na-ЛС), получаемая в качестве побочного продукта сульфитной варки древесины. Структурная основа Na-ЛС – полифенилпропановый скелет с сульфонатными группами – SO_3Na, введёнными в ходе варки, и разветвлённой сетью эфирных, карбоксильных и фенольных фрагментов. Перманганатное окисление проводили в водном растворе при следующих параметрах: концентрация Na-ЛС – 5 мас.%, мольное соотношение $KMnO_4$: ЛС = 0,40 (из расчёта на фенольные фрагменты), pH реакционной среды – 9,0 (поддерживался добавлением 0,1 М NaOH), температура – 50°C, продолжительность реакции - 2 ч при интенсивном перемешивании (500 об/мин). По завершении реакции избыток $KMnO_4$ гасили добавлением 30%-го пероксида водорода (0,5 мл на 100 мл раствора), нерастворимый MnO_2 отделяли вакуумным фильтрованием. Для систематического поиска синтезированы три серии: глубокое сульфирование (LS-S), пероксидное окисление H_2O_2 (LS-O1) и перманганатное окисление $KMnO_4$ (LS-O2).

2.3. Методы характеризации руды и реагентов

Химический состав руды определяли методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (ICP-OES, PerkinElmer Optima 8000). Навеску руды разлагали смесью HF + HNO_3 + $HClO_4$ при нагревании, раствор разбавляли до 100 мл и анализировали на содержание Ti, Fe, Si, Al, Mg, Ca и других элементов.

Гранулометрический состав измельчённой руды определяли методом лазерной дифракции на анализаторе Mastersizer 3000 (Malvern Panalytical) в диапазоне 0,1-3500 мкм.

Морфологию поверхности частиц изучали методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на приборе FE MIRA 3 (TESCAN, Чехия). Элементный состав отдельных зёрен определяли методом энергодисперсионного рентгеновского анализа (EDAX) на том же приборе. Образцы напыляли тонким слоем углерода для обеспечения электропроводности.

ИК-спектры руды и реагента регистрировали на ИК-Фурье-спектрометре Bruker Tensor 27 в диапазоне 400-4000 $см^{-1}$ методом нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО). Разрешение составляло 4 $см^{-1}$, число сканирований – 32.

Поверхностное натяжение 0,1%-х водных растворов реагента измеряли методом максимального давления пузырька на приборе MPT2 (Lauda) при температуре 25°C.

ζ-потенциал суспензий минералов в присутствии реагента определяли методом электрофоретического рассеяния света на приборе Zetasizer Nano ZS (Malvern) при pH 7,0 ± 0,1 и температуре 25°C. Концентрация твёрдого составляла 0,05 г/л.

2.4. Флотационные испытания

Флотацию ильменитовой руды проводили на лабораторной механической флотационной машине объёмом 1 $дм^3$. Содержание твёрдого в пульпе составляло 20% (мас.), pH пульпы поддерживали на уровне 6,5-8,5 добавлением NaOH или H_2SO_4. Реагент подавали в пульпу в виде 1%-го водного раствора в дозировке 0,1–0,5 кг/т. В качестве вспенивателя применяли сосновое масло (50 г/т). Время кондиционирования пульпы с реагентом – 3 мин, продолжительность флотации – 5 мин.

Флотационные продукты (концентрат и хвосты) фильтровали, высушивали при 105°C и анализировали на содержание TiO_2 и Fe_2O_3 методом ICP-OES. Каждый эксперимент проводили в трёх повторениях; отклонение не превышало ±5%. Оценку результатов проводили по двум критериям: извлечение ильменита в концентрат η (%) и селективность флотации S (%), рассчитываемая как отношение извлечения ильменита к суммарному извлечению ильменита и кварца в концентрат.

3. Результаты и обсуждение

3.1 Характеристика исходной ильменитовой руды

Химический состав руды представлен в таблице 1. Руда характеризуется высоким содержанием кремнезёма (SiO_2 = 71,5%), что свидетельствует о значительной доле кварца и силикатных минералов в составе пробы. Содержание диоксида титана составляет 6,8%, суммарное содержание оксидов железа – 14,9% (Fe_2O_3 + FeO). Присутствие Al_2O_3 (4,3%) указывает на алюмосиликатные фазы.

Таблица 1 – Химический состав ильменитовой руды (ICP-OES, пересчёт на оксиды)

Оксид	SiO_2	TiO_2	Fe_2O_3	FeO	Al_2O_3	MgO	CaO
Содержание, %	71,5	6,8	11,2	3,7	4,3	1,1	1,2

Фазовый анализ показал, что основными кристаллическими фазами руды являются каолинит $Al_2(Si_2O_5)(OH)_4$, калиевый полевой шпат $K(Al,Fe)Si_3O_8$ и натриевый плагиоклаз $Na(AlSi_3O_8)$, формирующие силикатную пустую породу. Целевой минерал – ильменит $FeTiO_3$ – представлен рефлексами низкой интенсивности, что согласуется с его относительно невысоким содержанием в руде. Присутствие кварца SiO_2 подтверждается характеристическим рефлексом при $2\theta \approx 26{,}6°$ (рис. 1).

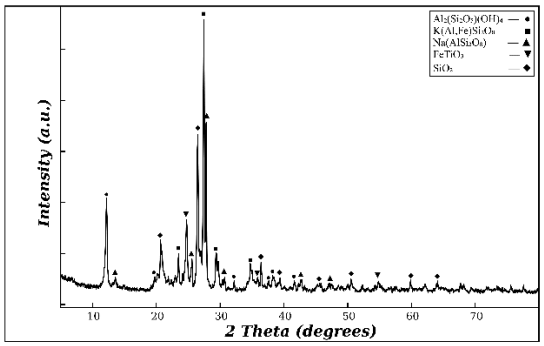


Рисунок 1 – Рентгеновская дифрактограмма исходной руды

Гранулометрический анализ методом лазерной дифракции показал, что частицы измельчённой руды распределены преимущественно в диапазоне 20-80 мкм с максимумом объёмного распределения в области 50-60 мкм (рис. 2).

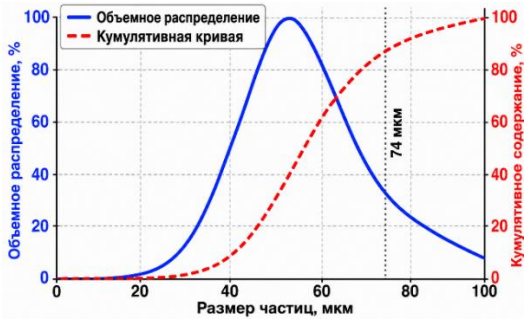
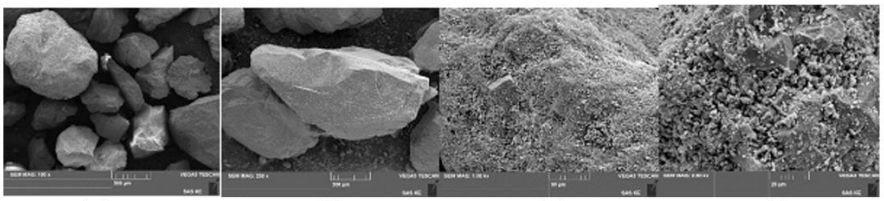


Рисунок 2 – Распределение частиц ильменитовой руды по размерам

Кривая объёмного распределения имеет выраженный однофазный характер без резких пиков и провалов, что указывает на равномерное измельчение и отсутствие значительного переизмельчения. Кумулятивная кривая плавно возрастает и достигает 85% при крупности около 74 мкм, что соответствует заданной степени измельчения и является благоприятным для последующей флотации.

Анализ СЭМ-изображений (рис. 3) показал, что частицы руды представляют собой преимущественно плотные угловатые зёрна изометричной или таблитчатой формы размером 50–150 мкм.



(а) (б) (в) (г)

а – увеличение в 100 раз; б – увеличение в 250 раз; в увеличение в 1000 раз; г – увеличение в 2600 раз

Рисунок 3 – Изображения СЭМ пробы ильменитовой руды

При увеличении ×100 фиксируется гранулометрическая однородность и отсутствие агрегирования частиц. При увеличении ×250 отчётливо видны чёткие границы между зёрнами ильменита и кварца, поверхность которых частично покрыта мелкими дефектами и трещинами. При увеличении ×1000 выявляются зоны частичного окисления и развитие микропористой структуры, характерной для умеренно выветрелого ильменита. При наибольшем увеличении (×2600) наблюдается микрорельеф с выступами и кавернами, отражающий процессы поверхностной деградации минерала.

На ИК-спектре (рис. 4) исходной руды выявлены следующие характерные полосы поглощения: при 560 $см^{-1}$ – валентные колебания Fe–O (ильменит, магнетит); при 670 $см^{-1}$ – колебания Ti-O (ильменит); в области 1000-1100 $см^{-1}$ – интенсивные колебания Si–O (кварц). Широкие полосы при 3400 и 1630 $см^{-1}$ отвечают адсорбированной воде и поверхностным гидроксильным группам –OH.

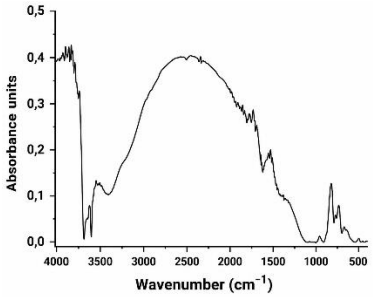


Рисунок 4 – ИК спектр исходной ильменитовой руды

Наличие поверхностных гидроксильных групп имеет ключевое значение для флотации: именно через центры –OH, а также через координационно-ненасыщенные ионы Fe^{3+} и Ti^{4+} на поверхности ильменита реализуется адсорбция реагента.

3.2 Характеризация образцов модифицированных лигносульфонатов

Характеризацию образцов модифицированных лигносульфонатов проводили в модельной системе «барит-кварц», выбранной как система для оценки селективности реагентов по отношению к минералам с катионными поверхностными центрами. Модельная система «барит-кварц» использовалась на предварительном этапе исследования для сравнительного скрининга синтезированных модифицированных лигносульфонатов. Выбор данной системы обусловлен необходимостью оценки селективности реагентов по отношению к минералам с катионными поверхностными центрами и силикатной пустой породе. При этом полученные результаты рассматривались только как предварительный критерий выбора наиболее активного реагента. Основные флотационные испытания были выполнены непосредственно на ильменитовой руде в системе «ильменит-кварц», что соответствует объекту настоящего исследования.

В таблице 2 приведены сводные характеристики лучших образцов каждой серии.

Таблица 2 – Сравнительные характеристики образцов модифицированных лигносульфонатов

Образец	Тип модификации	η (барит), %	S, %	Поверхностное натяжение, мН/м	ζ-потенциал, мВ
LS-S	Глубокое сульфирование	65,4	74,6	42,7	−29
LS-O1	Пероксидное окисление	65,9	76,2	44,1	−27
LS-O2	Перманганатное окисление	69,8	79,6	40,9	−31

Можно видеть, что реагент LS-O2 обеспечивает наибольшее извлечение барита (69,8%) при высокой селективности (79,6%), максимальном по модулю ζ-потенциале (−31 мВ) и низком поверхностном натяжении (40,9 мН/м). Данный факт можно объяснить тем, что образующиеся хиноидные и карбонильные центры способны к специфическому донорно-акцепторному комплексообразованию с ионами Fe^{3+} и Ti^{4+} поверхности ильменита, что обосновывает перенос реагента в ильменитовую флотационную систему. Указанный реагент далее использовался для флотационных испытаний.

3.3 Флотация ильменитовой руды с реагентом LS-O2

Флотационные испытания проводились в системе «ильменит-кварц» на измельчённой руде Сатпаевского ГОП при последовательной оптимизации трёх параметров: pH пульпы, расхода реагента LS-O2 и температуры. Критериями оценки служили извлечение ильменита в концентрат η (%) и селективность флотации S (%).

На рисунке 5 приведено влияние pH пульпы на извлечение целевого компонента и селективность при флотации.

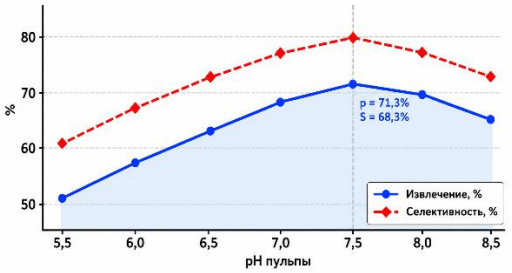


Рисунок 5 – Влияние pH пульпы на показатели флотации ильменита с реагентом LS-O2. Значения представлены как среднее по трём параллельным опытам; погрешность не превышала ±5%

Выраженный оптимум наблюдается при pH 7,5: η = 71,9%, содержание TiO_2 в концентрате – 20,2%, S = 80,3%. При pH < 7,0 показатели снижаются вследствие протонирования хиноидных и карбоксильных групп реагента, уменьшающего их сродство к Fe^{3+} и Ti^{4+}. При pH > 8,0 конкуренция гидроксид-ионов за поверхностные центры ильменита и усиление адсорбции на силанольных группах кварца снижают как извлечение, так и селективность.

При сравнении образцов модифицированных лигносульфонатов по извлечению были получены следующие значения: LS-S – 65,4 ± 0,5%, LS-O1 – 65,9 ± 0,6%, LS-O2 – 69,8 ± 0,6%. Относительное стандартное отклонение составило соответственно 0,75; 0,95 и 0,89%. Для оптимальных условий флотации ильменитовой руды извлечение ильменита составило 73,4 ± 2,1%, содержание TiO_2 в концентрате – 20,8 ± 0,7%, селективность флотации – 81,0 ± 2,4%. Соответствующие значения RSD составили 2,86; 3,37 и 2,96%, что не превышает 5%. Сопоставление средних значений и 95%-х доверительных интервалов показало, что образец LS-O2 характеризуется более высоким извлечением по сравнению с LS-S и LS-O1. При этом различия между LS-S и LS-O1 находятся в пределах экспериментальной погрешности. Дополнительным подтверждением выбора LS-O2 являются его физико-химические характеристики: наименьшее поверхностное натяжение – 40,9 мН/м – и наиболее отрицательный ζ-потциал – −31 мВ.

Влияние расхода реагента на показатели флотации приведено на рисунке 6.

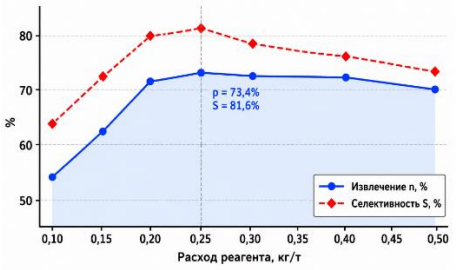


Рисунок 6 – Влияние расхода LS-O2 на показатели флотации ильменита. Значения представлены как среднее по трём параллельным опытам; погрешность не превышала ±5%

В диапазоне 0,10-0,25 кг/т наблюдается монотонный рост η и S, соответствующий постепенному заполнению адсорбционных центров на поверхности ильменита. При расходе 0,25 кг/т, по-видимому, достигается насыщение монослоя. Дальнейшее увеличение дозы не повышает извлечение, однако снижает селективность до 73,4% при 0,50 кг/т вследствие неизбирательной адсорбции избытка реагента на кварце. Оптимальный расход составляет 0,25 кг/т.

Температура пульпы влияет на скорость адсорбции реагента, вязкость жидкой фазы и стабильность пены. Испытания проводились в диапазоне 15-40°C при pH = 7,5 и расходе LS-O2 0,25 кг/т (рис. 7).

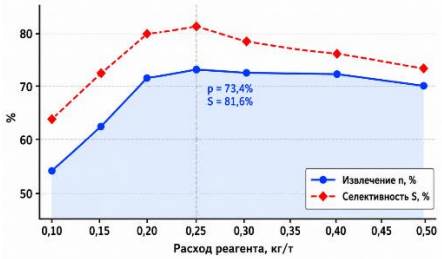


Рисунок 7 – Влияние температуры пульпы на показатели флотации ильменита с реагентом LS-O2 (pH 7,5; расход 0,25 кг/т). Значения представлены как среднее по трём параллельным опытам; погрешность не превышала ±5%

Повышение температуры от 15 до 30°C улучшает показатели за счёт ускорения диффузии молекул реагента и снижения вязкости пульпы. В диапазоне 30-35°C показатели стабилизируются на максимальном уровне. При 40°C наблюдается небольшое снижение вследствие уменьшения устойчивости пены и частичной десорбции реагента. С учётом близких результатов при 25°C и 30°C и соображений энергопотребления оптимальной выбрана температура 30°C.

Оптимальные условия флотации и итоговые показатели сведены в таблицу 3.

Таблица 3 – Оптимальные условия флотации ильменита с реагентом LS-O2 и достигаемые показатели

Параметр	Значение
pH пульпы	7,5
Расход LS-O2	0,25 кг/т
Температура пульпы	30°C
Вспениватель (сосновое масло)	50 г/т
Время кондиционирования	3 мин
Время флотации	5 мин
Извлечение ильменита η	73,4%
Содержание TiO_2 в концентрате	20,8%
Селективность S	81,0%

При оптимальных условиях достигается извлечение ильменита η = 73,4% при содержании TiO_2 в концентрате 20,8% (исходное содержание в руде – 6,8%, обогащение в 3,1 раза) и селективности S = 81,0%. Извлечение кварца в концентрат не превышает 19%, что подтверждает высокую избирательность реагента.

Можно предположить, что механизм действия LS-O2 реализуется через многоточечную адсорбцию на поверхности $FeTiO_3$: хиноидные и карбонильные группы образуют координационные комплексы с Fe^{3+} и Ti^{4+} (хемосорбция), сульфонатные $–SO_3^-$ стабилизируют слой электростатически, фенольные –OH участвуют в водородных связях с поверхностными гидроксилами. На поверхности кварца, лишённой катионных центров Fe^{3+}/Ti^{4+}, специфическая адсорбция реагента значительно слабее, что и определяет наблюдаемую селективность разделения.

Таким образом, реагент LS-O2, синтезированный перманганатным окислением Na-ЛС, при оптимальных условиях (pH 7,5; расход 0,25 кг/т; T = 30°C) обеспечивает извлечение ильменита 73,4% при селективности 81,0%, что свидетельствует о высокой эффективности данного собирателя при флотации ильменитовой руды Сатпаевского ГОП.

3.4 Предварительная экономическая оценка применения LS-O2

Предварительная оценка стоимости синтеза LS-O2 была выполнена с учётом расхода основных реагентов. При условном расчёте на 1 кг исходного лигносульфоната натрия основные затраты включают: 1 кг Na-ЛС – 0,33-0,67 USD; 0,30-0,35 кг $KMnO_4$ – 0,56-1,73 USD;

0,10 кг 30%-го H_2O_2 – менее 0,10 USD. Таким образом, ориентировочная стоимость реагентов для получения 1 кг LS-O2 может составлять примерно 0,99-2,50 USD без учёта затрат на воду, фильтрование MnO_2, сушку, энергию и трудозатраты.

При оптимальном расходе LS-O2 0,25 кг/т руды ориентировочная реагентная стоимость его применения составляет около 0,25-0,63 USD/т руды. Это ниже, чем возможные затраты при использовании ряда гидроксамовых собирателей, стоимость которых обычно выше из-за синтетической природы и специализированного назначения.

4. Заключение

В работе исследована возможность применения модифицированных лигносульфонатов в качестве флотационных реагентов при обогащении ильменитовой руды Сатпаевского месторождения. Показано, что исходная руда характеризуется высоким содержанием силикатной пустой породы, при этом ильменит представлен в тонковкраплённой форме, что требует использования селективных собирателей.

Синтезированы три серии модифицированных лигносульфонатов: глубокосульфированные (LS-S), пероксидно-окисленные (LS-O1) и перманганатно-окисленные (LS-O2). Наиболее эффективным оказался реагент LS-O2, полученный перманганатным окислением лигносульфоната натрия. Для него установлены наибольшие значения извлечения и селективности, а также наиболее отрицательный ζ-потенциал и наименьшее поверхностное натяжение, что свидетельствует о высокой поверхностной активности и способности к селективной адсорбции.

Установлено, что оптимальные условия флотации ильменитовой руды составляют: pH пульпы 7,5; расход реагента LS-O2 – 0,25 кг/т; температура пульпы – 30°C. При данных параметрах достигается извлечение ильменита 73,4%, содержание TiO_2 в концентрате 20,8% и селективность 81,0%. По сравнению с исходной рудой содержание TiO_2 возрастает в 3,1 раза.

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения модифицированных лигносульфонатов в качестве эффективных и относительно доступных реагентов для флотационного обогащения низкотитанистых ильменитовых руд.

Список литературы

1. Methods of extracting TiO_2 and other related compounds from ilmenite / A.J. Sampath et al // Minerals. – 2023. – Vol. 13, № 5. – Art. 662.
2. Processing of titanium-containing ores for the production of titanium products: A comprehensive review / G. Maldybayev et al // Heliyon. – 2024. – Vol. 10, № 3.
3. A review of the solid-state reduction aspects of ilmenite for efficient and sustainable production of TiO_2 slag / D. Nayak et al // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. – 2025. – Vol. 46, № 4. – P. 517–536.
4. Chen Q. Surface oxidation promotes the flotation of ilmenite: A critical review / Q. Chen, Z. Chen, R.M. Kasomo // Minerals and Mineral Materials. – 2024.
5. Research progress of ilmenite surface modification flotation separation technology / J. Yuan et al // Nonferrous Metals Engineering. – 2024. – Vol. 14, № 9.
6. Flotation behavior and mechanism of ilmenite using ferrate as activator / R. Liao et al // Minerals Engineering. – 2022. – Vol. 178. – Art. 107400.
7. Effect of grinding media on surface property and flotation performance of ilmenite / C. Dai et al // Powder Technology. – 2024. – Vol. 447. – Art. 120232.
8. Reagent types and action mechanisms in ilmenite flotation: A review / J. Cai et al // International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials. – 2022. – Vol. 29, № 9. – P. 1656-1669.
9. Novel bifunctional collector for efficient separation of low-grade ilmenite: Selectivity enhancement and mechanistic elucidation / Y. Kang et al // Chemical Engineering Science. – 2026. – Art. 123438.
10. Study on the mineral characteristics and separation performances of a low-TiO_2 ilmenite / Q. Meng et al // Minerals Engineering. – 2022. – Vol. 179. – Art. 107458.
11. Foaming properties of lignosulfonates in the flotation process / J. Chique et al // Polymers. – 2023. – Vol. 15, № 17. – Art. 3575.

12. Guo Y. High-efficiency flotation of smithsonite in the presence of fine chlorite by using dispersant of sodium lignosulfonate / Y. Guo, Z. Fu, S. Ren // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2022. – Vol. 649. – Art. 129543.
13. Differential depression of calcium lignosulfonate on chalcopyrite and molybdenite flotation with collector kerosene / G. Liang et al // Minerals Engineering. – 2023. – Vol. 201. – Art. 108192.
14. A critical review on natural surfactants and their potential for sustainable mineral flotation / A. Oulkhir et al // Reviews in Environmental Science and Bio/Technology. – 2023. – Vol. 22, № 1. – P. 105-131.
15. Study on the mechanism of calcium lignosulfonate in chromium-free flotation separation of chalcopyrite and galena / C. Su et al // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2025. – Vol. 724. – Art. 137445.
16. Zhang Y. A comparison of sodium silicate and ammonium lignosulfonate effects on xenotime and selected gangue mineral microflotation / Y. Zhang, C. Anderson // Minerals Engineering. – 2017. – Vol. 100. – P. 1-8.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки МНВО РК по ПЦФ № BR28713557 «Разработка комплексных технологий переработки ильменитовых песков, баритовых руд и металлосодержащих отходов для повышения ресурсной эффективности горно-металлургической и строительной отраслей Казахстана».

С.К. Танирбергенова[1], Қ. Қамұнұр[1,2], Л.К. Бейсембаева[1,2], Л.А. Мусапирова[1,2]*
[1]Жану проблемалары институты, 050012, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Бөгенбай батыр к., 172
[2]Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,
050040, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., әл-Фараби даңғылы, 71
*e-mail: lyazzat.mussapyrova@gmail.com

ИЛЬМЕНИТТІ МОДИФИКАЦИЯЛАНҒАН ЛИГНОСУЛЬФОНАТТАРДЫ ҚОЛДАНУ АРҚЫЛЫ СЕЛЕКТИВТІ ФЛОТАЦИЯЛАУ

Жұмыста модификацияланған лигносульфонаттарды Сәтбаев кен орнының (Қазақстан) ильменит кенін селективті байытуға арналған флотациялық реагенттер ретінде қолдану мүмкіндігі зерттелді. Бастапқы кен құрамында силикатты бос жыныстардың мөлшері жоғары (SiO_2 – 71,5%) және TiO_2 мөлшері салыстырмалы түрде төмен (6,8%) болғандықтан, селективті жинағыштарды қолдану қажеттілігі туындайды. Модификацияланған лигносульфонаттардың үш сериясы синтезделді: терең сульфирленген (LS-S), пероксидті-тотықтырылған (LS-O1) және перманганатты-тотықтырылған (LS-O2). Реагенттер ИҚ-Фурье-спектроскопиясы, беттік керілу мен ζ-потенциалды өлшеу әдістерімен сипатталды.

Ең жоғары флотациялық көрсеткіштер натрий лигносульфонатын перманганатты тотықтыру арқылы алынған LS-O2 реагенті үшін анықталды. Аталған реагент үшін максималды шығым мен селективтілік, ең теріс ζ-потенциал (−31 мВ) және ең төменгі беттік керілу (40,9 мН/м) тіркелді. Ильменит флотациясының тиімділігіне пульпа pH-ының, реагент шығынының және температураның әсері зерттелді. Процестің оңтайлы шарттары: pH 7,5, LS-O2 шығыны – 0,25 кг/т және температура 30°C болып анықталды. Осы параметрлер кезінде ильменittің шығымы 73,4%, концентраттағы TiO_2 мөлшері 20,8% және селективтілік 81,0% болды.

Алынған нәтижелер модификацияланған лигносульфонаттарды төмен титанды ильменит кендерін флотациялық байыту үшін тиімді әрі салыстырмалы түрде қолжетімді реагенттер ретінде қолданудың перспективалы екенін көрсетеді.

Түйін сөздер: *ильменит кені; селективті флотация; модификацияланған лигносульфонаттар; флотореагенттер; титанды кендерді байыту.*

S.K. Tanirbergenova[1], K. Kamunur[1,2], L.K. Beisembayeva[2], L.A. Mussapyrova[1,2]*
[1]Institute of Combustion Problems, 172, Bogenbay Batyr St., Almaty, 050012, Republic of Kazakhstan
[2]Al-Farabi Kazakh National University, Republic of Kazakhstan,
Almaty 050040, Republic of Kazakhstan, Almaty, 71 Al-Farabi Avenue
*e-mail: lyazzat.mussapyrova@gmail.com

SELECTIVE FLOTATION OF ILMENITE USING MODIFIED LIGNOSULFONATES

This study investigates the feasibility of using modified lignosulfonates as flotation reagents for the selective beneficiation of ilmenite ore from the Satpayev deposit (Kazakhstan). The raw ore was characterized by a high content of silicate gangue minerals (SiO_2 – 71.5%) and a relatively low TiO_2 content (6.8%), which necessitates the use of selective collectors. Three series of modified lignosulfonates were synthesized: deeply sulfonated (LS-S), peroxide-oxidized (LS-O1), and permanganate-oxidized (LS-O2). The reagents were characterized by FTIR spectroscopy, surface tension measurements, and ζ-potential analysis.

The highest flotation performance was achieved with the LS-O2 reagent obtained by permanganate oxidation of sodium lignosulfonate. This reagent exhibited the maximum recovery and selectivity, the most negative ζ-potential (−31 mV), and the lowest surface tension (40.9 mN/m). The effects of pulp pH, reagent dosage, and temperature on the flotation efficiency of ilmenite were investigated. The optimal process conditions were determined as follows: pH 7.5, LS-O2 dosage of 0.25 kg/t, and temperature of 30°C. Under these conditions, an ilmenite recovery of 73.4%, TiO_2 content in the concentrate of 20.8%, and selectivity of 81.0% were achieved.

The obtained results demonstrate the promising potential of modified lignosulfonates as effective and relatively cost-efficient reagents for the flotation beneficiation of low-grade ilmenite ores.

Key words: *ilmenite ore; selective flotation; modified lignosulfonates; flotation reagents; beneficiation of titanium-bearing ores.*

Сведения об авторах

Сандугаш Танирбергенова – кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник, заместитель генерального директора по науке РГП на ПХВ «Институт проблем горения»; e-mail: Sandu2201@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6377-0913.

Кастер Қамұнұр – PhD доктор, ведущий научный сотрудник, РГП на ПХВ «Институт проблем горения»; e-mail: kamunur.k@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-0013-1926.

Луиза Бейсембаева – кандидат химических наук, доцент факультета химии и химической технологии, Казахский национальный университет имени аль-Фараби; e-mail: beisembaeva_l@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7529-673X.

Ляззат Мусапирова* – PhD доктор, ведущий научный сотрудник, РГП на ПХВ «Институт проблем горения»; e-mail: lyazzat.mussapyrova@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9881-1324.

Авторлар туралы мәліметтер

Сандугаш Танирбергенова – химия ғылымдарының кандидаты, жетекші ғылыми қызметкер, ШЖҚ РМК «Жану проблемалары институты» бас директордың ғылым жөніндегі орынбасары; e-mail: sandu2201@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6377-0913.

Кастер Камунур – PhD доктор, жетекші ғылыми қызметкер, ШЖҚ РМК «Жану проблемалары институты»; e-mail: kamunur.k@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-0013-1926.

Луиза Бейсембаева – химия ғылымдарының кандидаты, доцент, химия және химиялық технология факультеті, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті; e-mail: beisembaeva_l@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7529-673X.

Ляззат Мусапирова* – PhD доктор, жетекші ғылыми қызметкер, ШЖҚ РМК «Жану проблемалары институты»; e-mail: lyazzat.mussapyrova@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9881-1324.

Information about the authors

Sandugash Tanirbergenova – Candidate of Chemical Sciences, Leading Researcher, Deputy Director General for Science at the RSE REM «The institute of combusting problems»; e-mail: sandu2201@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6377-0913.

Kaster Kamunur – PhD, Senior Researcher, «Institute of Combustion Problems»; e-mail: kamunur.k@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-0013-1926.

Luisa Beisembayeva – Candidate of Chemical Sciences, Ass. Prof., Faculty of Chemistry and Chemical Technology, al-Farabi KazNU; e-mail: beisembaeva_l@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7529-673X.

Lyazzat Mussapyrova – PhD, leading researcher, «Institute of Combustion Problems»; e-mail: lyazzat.mussapyrova@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9881-1324.

Поступила в редакцию 05.06.2026
Поступила после доработки 30.06.2026
Принята к публикации 03.07.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-83

МРНТИ: 76.31.35, 76.31.29

A.D. Moldashi[1], Y. Sailaukhanuly[2], S. Azat[2], K. Toshtay[3], N. Nurgaliyev[4]*
[1]GEMS International School Al Khail, 246587, Dubai, UAE, Exit 18 Al Khail Road
[2]Satbayev University, 050013, Almaty, Kazakhstan, Satbayev str. 20
[3]Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan, Al-Farabi 97
[4]Shakarim University, 071412, Semey, Kazakhstan, Glinki str. 20
e-mail: adilyamoldash7@gmail.com

DEVELOPMENT AND STANDARDIZATION OF A CARAMEL DOSAGE FORM BASED ON *ARTEMISIA ANNUA L.* MEDICINAL PLANT RAW MATERIALS

Abstract: *Acute respiratory viral infections (ARVIs) represent one of the most prevalent infectious diseases worldwide, with the COVID-19 pandemic further highlighting the critical need for novel therapeutic alternatives. Recent in vitro studies demonstrated inhibitory activity of Artemisia annua L. ethanolic extracts against SARS-CoV-2 through synergistic multi-component mechanisms. This study aimed to develop a standardized medicated caramel lozenge based on bioactive extracts of Artemisia annua L. using isomalt as the pharmaceutical base, in compliance with the State Pharmacopoeia of the Republic of Kazakhstan (SP RK). Raw material was collected during peak flowering in July-August 2025 at the Ile Alatau foothills, Almaty region, Kazakhstan. Physicochemical characterization confirmed mass loss on drying of 6.5%, extractive substance content of 40.2%, and complete absence of heavy metals by atomic absorption spectrometry. Essential oil yield was 0.4% (v/w, dry basis), with 1,8-cineole constituting 8.6% by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). GC-MS profiling of the ethanolic extract identified more than 50 bioactive compounds, with Camphor (9.35%) and 1,8-cineole (8.60%) as predominant constituents. The detection of Squalene, a triterpene hydrocarbon with antimicrobial, antifungal, and immunostimulatory properties, is of particular significance. The optimal 1:2 extract-to-isomalt ratio produced a thermally stable, ethanol-free, diabetic-compatible dosage form meeting all five SP RK standardization parameters: organoleptic properties, mass uniformity (average mass 1.7084 g; maximum deviation <0.05%), disintegration (<10 min), and water content (<2.0%). The developed formulation represents a stable and accessible alternative to tincture-based delivery, suitable for pediatric, elderly, and diabetic populations.*

Key words: *Artemisia annua L., Annual Wormwood, medicated caramel, lozenge, isomalt, 1,8-cineole, phytopreparation, SARS-CoV-2.*

1. Introduction

Acute respiratory viral infections (ARVIs) represent one of the most prevalent and socioeconomically significant groups of infectious diseases worldwide, recording millions of new cases annually and accounting for billions of lost working days each year. Despite decades of pharmaceutical advancement, the range of targeted antiviral treatments for respiratory infections remains narrow, with current approaches largely relying on symptomatic relief. The COVID-19 pandemic, caused by the SARS-CoV-2 coronavirus, brought the limitations of existing antiviral therapies into sharp focus on a global scale.

In this context, medicinal plants have attracted renewed scientific interest as potential sources of novel therapeutic agents. Kazakhstan possesses exceptional reserves of medicinal plant raw materials, with more than 1,300 species documented across its territory, among them 81 species of the genus *Artemisia L.*, characterized by a wide geographical distribution and a substantial raw material base [1]. Among these, *Artemisia annua L.*, or Annual Wormwood, has emerged as a subject of particular scientific interest, valued for its antipyretic, anthelmintic, anti-inflammatory, antifungal, antiparasitic, and cytotoxic properties [2-3]. Its principal bioactive constituents include essential oils, organic acids, fatty acids, and tannins, with an essential oil yield ranging from 0.1 to 0.64% [4]. The variability of the chemical composition of its essential oils has been shown to depend on geographical origin and the developmental stage of the plant at the time of harvest [6-9]. The biological activity of *Artemisia annua L.* essential oils and extracts is well documented in the literature.

©A.D. Moldashi, Y. Sailaukhanuly, S. Azat, K. Toshtay, N. Nurgaliyev, 2026

Of particular relevance, research published in *Scientific Reports* demonstrated that both hot water and ethanol extracts of *Artemisia annua L*. are active against SARS-CoV-2 in vitro, across seven varieties sourced from four continents [10]. Antiviral effectiveness correlated inversely with artemisinin content, suggesting that viral inhibition results from synergistic action among multiple phytochemical constituents rather than a single compound [10].

Despite this therapeutic potential, the most common delivery form – the alcohol water tincture – presents significant practical limitations, including the requirement for precise dosing, dilution, and special storage conditions [11]. Caramel medicinal forms represent a promising alternative, offering gradual release of active substances directly at the site of action, inherent stability without preservatives, and significantly greater convenience of use, particularly for pediatric and elderly patient populations [11-12].

This study aimed to develop a standardized medicated caramel lozenge based on bioactive extracts of *Artemisia annua L.,* using isomalt as the pharmaceutical base. The study encompasses: identification and physicochemical characterization of the raw material; determination of extractive substance content and essential oil yield; quantitative analysis of 1,8-cineole (1); chromatographic profiling by GC-MS; development of the caramel formulation technology; and standardization of the finished dosage form in accordance with the requirements of the State Pharmacopoeia of the Republic of Kazakhstan (SP RK).

2. Experiment

All physicochemical characteristics were recorded using the following instrumentation: a drying oven (Memmert UF55, Germany) for mass loss determination; an atomic absorption spectrometer (AADuo55B/240Z, Analytik Jena, Germany) for heavy metal analysis; and an Agilent Technologies 6890 gas chromatograph equipped with a 5973 mass spectrometric detector (Agilent Technologies, USA) for chromatographic analysis. All reagents were of analytical grade and obtained from commercial suppliers. The SP RK Vol. 1 served as the primary regulatory reference for all analytical procedures [13].

2.1 Collection and Identification of medicinal plant raw materials

Artemisia annua L. raw material was collected during mass flowering in July-August 2025 at the foothills of the Ile Alatau, Almaty region, Republic of Kazakhstan, in accordance with Good Agricultural and Collection Practice (GACP). Above-ground parts were harvested before 10:00 AM by cutting at 10-15 cm from the ground, dried in the shade at 30 ± 5°C in uniform layers of 10-15 cm, and turned periodically. Verification was performed through macroscopic and microscopic analysis in accordance with SP RK Vol. 1, «Herbs» monograph [13].

2.2 Determination of mass loss on drying

Five portions of 1.0 g of crushed raw material (particle size ~10 mm) were placed into pre-dried tared weighing bottles and dried in a drying oven (Memmert UF55) at 100–105°C to constant mass in accordance with SP RK Vol. 1 [13]. Mass loss on drying (X, %) was calculated as:

$$X = \frac{(m_{before} - m_{after}) \times 100}{m_{before}}$$

where m $before$ and m $after$ are the masses of raw material before and after drying (g), respectively. The average mass loss on drying was 6.5%.

2.3 Determination of heavy metals

Heavy metal content was determined by atomic absorption spectrometry (AAS; AADuo55B/240Z, Analytik Jena) in accordance with SP RK Vol. 1, Article 2.2.23 [13]. Test solutions were prepared by microwave digestion of 0.50 g of crushed raw material in 6.0 mL of heavy metal-free HNO_3 and 4.0 mL of heavy metal-free HCl (80% power, 15 min; 100% power, 5 min; 80% power, 20 min), followed by addition of 4.0 mL of heavy metal-free H_2SO_4. Each digest was transferred quantitatively to a 50.0 mL volumetric flask with 1.0 mL of $Mg(NO_3)_2$ solution (10 g/L) and 1.0 mL of $NH_4H_2PO_4$ solution (100 g/L), diluted to volume with deionized water. Seven parallel test solutions were prepared. Calibration curves were constructed from a minimum of three reference solutions per target element; each solution was measured in triplicate. No heavy metals were detected in any analyzed sample.

2.4 Determination of extractive substances in the medicinal plant raw material

Approximately 3.0 g of crushed raw material (passed through a 1 mm sieve) was refluxed with 50.0 mL of 70% EtOH (ethanol; CAS No. 64-17-5; analytical grade, commercial preparation) in

a 250 mL ground-glass flask for 2 hours. Following filtration, 25.0 mL of filtrate was evaporated to dryness in a tared porcelain dish, dried at 102.5 ± 2.5°C to constant mass, and cooled in a desiccator for 30 min. Extractive substance content (X, %) on a dry basis was calculated as:

$$\mathrm{X} = \frac{m \text{ x } 200 \text{ x } 100}{m_1(100 - \mathrm{W})}$$

where m is the mass of the dry residue (g); m_1 is the sample mass (g); and W is the mass loss on drying (%). The average extractive substance content was 40.2%.

2.5 Determination of essential oils

Essential oil content was determined by steam distillation using a Clevenger-type apparatus in accordance with SP RK Vol. 1 [13]. A sample of crushed raw material was placed in a 1000 mL round-bottom flask with 300 mL of deionized water and refluxed for 30 minutes. Xylene (analytical grade, commercial preparation) was used in the graduated receiving tube (graduation scale 0.025 mL) to absorb the distilled oil, with the aqueous phase returned automatically to the flask. Essential oil content (X, %) on a dry basis was calculated as:

$$\mathrm{X} = \frac{V \text{ x } 100 \text{ x } 100}{\mathrm{m}(100 - \mathrm{W})}$$

where V is the volume of essential oil (mL); m is the sample mass (g); W is the mass loss on drying (%). The essential oil yield was determined to be 0.4%, which falls within the documented literature range of 0.1-0.64% for this species [4].

2.6 Quantitative determination of 1,8-cineole in essential oils

1,8-Cineole (1) (eucalyptol; 1,3,3-trimethyl-2-oxabicyclo [2.2.2]octane; CAS No. 470-82-6) was quantified by GC-MS on an Agilent Technologies 6890 gas chromatograph with a 5973 mass spectrometric detector in accordance with SP RK Vol. 1, Article 2.8.11 [13]. Sample preparation: 2.5 mL of essential oil was dissolved in $CHCl_3$ and adjusted to 50.0 mL. Chromatographic conditions: column DB-5 (30 m × 0.25 mm × 0.25 μm); carrier gas He (purity ≥ 99.999%), flow rate 1.2 mL/min; injector temperature 250°C; column temperature program 50→320°C at 4°C/min; splitless mode; Scan detection. Compound identification was performed against the NIST 05 and WILEY libraries (>470,000 spectra) using AMDIS and NIST programs. Content of (1) (X, %) was calculated as:

$$x = \frac{S_x \text{ x } 100}{\sum S_x}$$

where S_x is the peak area value of (**1**); $\sum S_x$ is the sum of the areas of all major peaks in the chromatogram. The content of (**1**) in the essential oil was 8.6%.

2.7 Preparation of extracts from *Artemisia annua L*. herb

Ethanolic extracts were prepared by maceration of raw material (particle size 3-5 mm) in 70% EtOH (ethanol; CAS No. 64-17-5; analytical grade, commercial preparation) at ambient temperature. Following maceration, the extract was decanted, the marc pressed, and the combined extract allowed to settle for 24 hours at ≤ 25 ± 5°C. The clarified extract was filtered through «blue ribbon» filter paper (analytical grade, commercial preparation) and stored at 4°C.

The chemical composition of the extract was determined by GC-MS on an Agilent 7890 gas chromatograph with a 5977 mass spectrometric detector and flame ionization detector (Agilent Technologies, USA) [13-14]. Chromatographic conditions: column HP-5 (30 m × 0.25 mm × 0.25 μm); carrier gas He (purity ≥ 99.999%), flow rate 1.2 mL/min; sample injection heater temperature 250°C; column thermostat temperature program – from 50°C to 320°C at a rate of 4°C/min; splitless injection mode; Scan detection. Compound identification was performed against the NIST 05 and WILEY libraries (>470,000 spectra) using AMDIS and NIST programs [13-14]. Results are presented in Figure 1 and Table 1.

2.8 Caramel formulation development

The optimal formulation ratio of *Artemisia annua L*. extract to isomalt (2) ((3R,4R,5R)-6-[(2S,3R,4S,5S,6R)-3,4,5-trihydroxy-6-(hydroxymethyl)oxan-2-yl]oxyhexane-1,2,3,4,5-pentol; CAS No. 64519-82-0; E953) was established as 1:2 (v/w) – 10.0 mL extract and 20.0 g of 2 per batch – following preparative experiments evaluating crystallization behavior, texture, and organoleptic properties. Isomalt (2) was selected over sucrose due to its reduced crystallization tendency, moisture resistance, low glycemic index, and approval by JECFA, WHO, and the EEC Scientific Committee on Food [15]. Safe daily doses are up to 50 g for adults and 25 g for children [15].

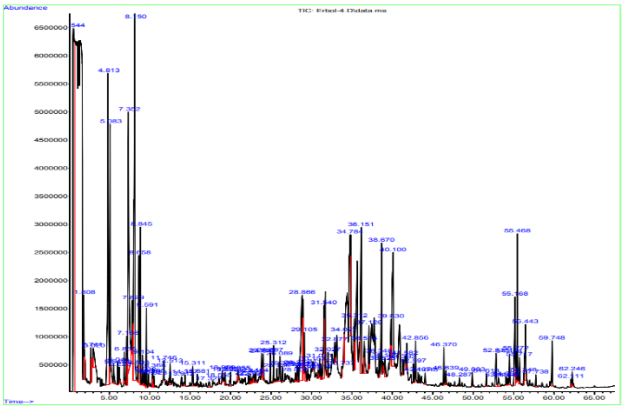


Figure 1 – Chromatogram of the *Artemisia annua* L. annual wormwood extract

Table 1 – Component composition of the annual wormwood extract

№	Retention Time, min	Composition, %	Compound Name	№	Retention Time, min	Composition, %	Compound Name
1	1.8	1.53	Pyrrolidine	24	30.1	0.11	Aromadendrene
2	3.0	0.63	α-Pinene	25	30.8	0.14	Isovelleral
3	4.8	8.6	1,8-Cineole	26	31.0	0.22	Camphene
4	5.5	0.33	Sabinene hydrate	27	31.5	1.77	Hexadecanoic acid
5	6.2	0.22	Terpineol	28	32.0	0.38	Falcarinol
6	6.8	0.29	4-Thujanol	29	35.3	1.22	Longifolene
7	7.1	0.81	Sabinol	30	36.1	3.21	Achillin
8	8.1	9.35	Camphor	31	38.6	1.87	Patchoulane
9	8.5	0.13	Pinocarvone	32	39.1	0.36	α-Cadinol
10	9.1	0.33	terpinen-4-ol	33	41.5	0.48	α-Bisabolene
11	9.3	0.20	Carveol	34	42.5	0.23	1-Heptacosanol
12	9.6	0.89	Fenchol	35	44.0	0.16	Docosanoic Acid
13	10.3	0.25	Dihydrocoumarin	36	48.2	0.11	Squalene
14	10.5	0.15	2,3-Pinanediol	37	51.6	0.16	Brucine
15	11.7	0.24	3,5-dimethylphenol	38	53.1	0.26	α-Tocopherol
16	12.5	0.29	Fumaric acid	39	54.2	0.13	Cirsimaritin
17	13.9	0.20	Citral	40	54.4	0.46	Stigmasterol
18	14.3	0.15	Eugenol	41	55.1	1.86	4,5-dihydroxy-3,6,7-trimethoxyflavone
19	15.3	0.33	Verbenol	42	55.2	0.41	Eriostemin
20	22.4	0.14	α-Selinene	43	55.4	2.12	γ-Sitosterol
21	23.8	0.36	Caryophyllene	44	56.4	1.04	Taraxasterol
22	24.0	0.32	Bisabolol	45	59.7	0.67	Neophytadiene
23	24.8	0.38	Chamazulene				

Silicone molds were cleaned with 70% EtOH and treated with silicone oil. Isomalt (2) (20.0 g) was dissolved in deionized water and heated to 140°C until caramelization, verified by cold water drop test. The mass was cooled to 90°C under running water to prevent crystallization. The *Artemisia annua L*. extract (10.0 mL), pre-heated to 80°C in a water bath to ensure complete evaporation of the ethanol vehicle, was added and stirred until homogeneous. The caramel mass was poured into molds, cooled at ambient temperature until solidification, and demoulded. Although 1,8-cineole and camphor are unstable, they do not completely evaporate and their composition is determined after the dosage form has been obtained. The technological scheme for caramel production is presented in Figure 2.

2.9 Standardization of caramels

Finished caramel medicinal products were standardized in accordance with SP RK Vol. 1 [13], EP, and USP across five quality parameters.

Organoleptic properties were assessed by visual inspection and sensory evaluation. Products presented as round lozenges (~1 cm diameter), brown to dark caramel in color, with a smooth surface and pleasant sweet taste. All characteristics were within acceptable limits.

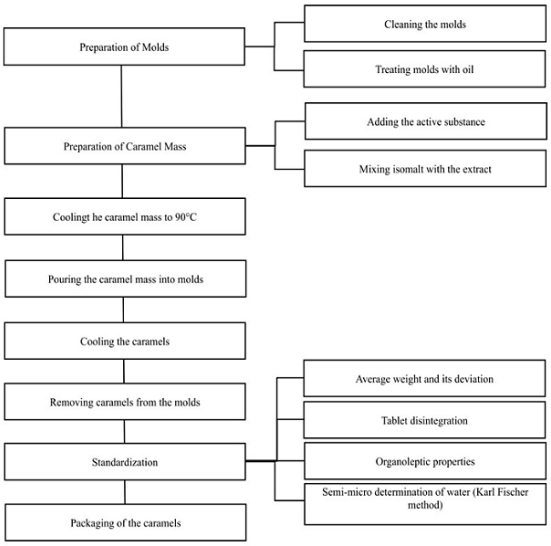


Figure 2 – Technological scheme for obtaining caramels

Mass uniformity was determined using a calibrated analytical balance (±0.0001 g) on 20 individually weighed units in accordance with SP RK Article 2.9.5 [16]. The average mass (M_{avg}) and deviations of minimum (M_{min}) and maximum (M_{max}) individual masses were calculated as:

$$M_{avg} = \frac{M_1 + M_2 + \cdots + M_{20}}{20} \;;\; M_{min} = \frac{M_{min} - M_{avg}}{M_{min}} \text{ x } 100 \;;$$

$$M_{max} = \frac{M_{max} - M_{avg}}{M_{max}} \text{ x } 100$$

Individual masses are presented in Table 2. The average mass was 1.7084 g; no unit deviated by more than 0.05% from the average, well within the 5% acceptance limit of SP RK Article 2.9.5 [13].

Table 2 – Individual masses of 20 units of the caramel dosage form

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1.7083	1.7082	1.7081	1.7085	1.7087	1.7081	1.7086	1.7088	1.7085	1.7082
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1.7083	1.7084	1.7081	1.7082	1.7087	1.7086	1.7088	1.7083	1.7085	1.7083

Disintegration was tested using an Erweka disintegration tester (Erweka GmbH, Germany) in deionized water at 37 ± 0.5°C in accordance with SP RK Article 2.9.1 [16]. All six units disintegrated completely within 10 minutes, within the 15-minute acceptance limit.

Water content was determined by semi-micro Karl Fischer titration in accordance with SP RK Vol. 1 [13], using Karl Fischer reagent and anhydrous MeOH (CAS No. 67-56-1), with amperometric endpoint detection under dry N_2 atmosphere, based on the following reactions:

$$SO_2 + I_2 + H_2O \leftrightarrow SO_3 + 2HI \quad (1)$$

$$C_5H_5N + SO_3 \rightarrow [C_5H_5N]^+[SO_3]^- \quad (2)$$

$$[C_5H_5N]^+[SO_3]^- + MeOH \rightarrow [C_5H_5NH]^+[MeOSO_3]^- \quad (3)$$

Water content was below 2.0% in all samples, confirming compliance with SP RK requirements [13]. The water content of all analyzed caramel samples was determined to be below 2.0%, meeting the acceptance criterion for moisture content in solid dosage forms as specified by SP RK requirements [16]. This result confirms the long-term stability of the formulation with respect to moisture-induced degradation.

Packaging: Hard caramel dosage forms are inherently hygroscopic and highly susceptible to absorption of atmospheric moisture, which can compromise both the physical integrity and chemical

stability of the finished product. To preserve product quality throughout storage, the caramel medicinal products were individually wrapped in cellophane film and subsequently sealed in plastic bags, providing a dual moisture barrier. The finished medicinal products are recommended to be stored in a dry, dark location at ambient temperature, out of reach of children. A mandatory warning statement, «Keep out of reach of children», is required on the packaging, in accordance with pharmaceutical labeling requirements for caramel dosage forms [11].

3. Results and Discussion

Artemisia annua L. raw material collected at the Ile Alatau foothills was verified against SP RK Vol. 1 macroscopic and microscopic standards, conforming fully to the «Herbs» monograph requirements [11], consistent with previously published morphological data [4]. Mass loss on drying was 6.5%, within the acceptable range for dried herbal materials per SP RK Vol. 1 [13] and consistent with previously reported values for *Artemisia annua L*. harvested under analogous conditions [5]. Heavy metal analysis by AAS confirmed complete absence of heavy metals across all seven analyzed samples, consistent with heavy metal screening data for *Artemisia* species from mountainous Central Asian regions [1], confirming the pharmaceutical suitability of the Ile Alatau collection site. Extractive substance content was 40.2% (w/w, dry basis) – notably higher than the 20-35% typically reported for *Artemisia* species [6-9], likely attributable to collection during peak flowering and controlled drying conditions. This suggests the Ile Alatau population of *Artemisia annua L.* represents a particularly rich source of extractable bioactive material. Essential oil yield was 0.4% (v/w, dry basis), consistent with values reported by Ćavar et al. [8] and Li et al. [5] for flowering-phase material, and falling within the upper-middle range of documented literature values of 0.1-0.64% [4]. Essential oil yield variability due to altitude, soil composition, and climate is acknowledged [6-9]. 1,8-Cineole (1) constituted 8.6% of the essential oil fraction, consistent with previously published data for *Artemisia annua L*. across multiple geographical populations [5, 8]. As a monocyclic monoterpene oxide with well-documented expectorant, antiseptic, and bronchodilatory properties [6], (1) is an active ingredient in several approved respiratory pharmaceutical preparations, confirming its direct therapeutic relevance to this formulation. Absolute quantification using an external standard is recommended in future studies to establish precise pharmacopoeial specification limits for *Artemisia annua L*. raw material of Kazakhstani origin.

GC-MS analysis identified 45 quantifiable compounds (Table 1); additional low-abundance peaks of insufficient identification confidence brought the total to more than 50, consistent with the chemically complex profile previously reported for this species [6-10]. The predominant constituents were Camphor (9.35%) and 1,8-Cineole (8.60%), followed by Achillin (3.21%), γ-Sitosterol (2.12%), and Patchoulane (1.87%), consistent with previously published GC-MS profiles of ethanolic *Artemisia annua L.* extracts [5,8]. The detection of Chamazulene (0.38%) is noteworthy, since this sesquiterpene is absent in the intact plant and forms during extraction through thermal decomposition of its precursor matricin [6], confirming correct extraction conditions. Its well-documented anti-inflammatory activity through inhibition of leukotriene biosynthesis further supports the anti-inflammatory therapeutic profile of this extract [6]. Of particular significance is the detection of Squalene (3) ((6E,10E,14E,18E)-2,6,10,15,19,23-hexamethyltetracosa-2,6,10,14,18,22-hexaene; CAS No. 111-02-4; 0.11%; retention time 48.2 min), a triterpene hydrocarbon with documented antimicrobial, antifungal, anticarcinogenic, and immunostimulatory properties, already utilized as an adjuvant in approved vaccine formulations [10]. Its presence opens compelling directions for future antiviral pharmacological investigation.

The diverse chemical profile – spanning terpenoids, sterols, flavonoids, organic acids, and fatty acids – is consistent with the hypothesis of synergistic multi-component antiviral activity proposed by Zhou et al. [10], who demonstrated that *Artemisia annua L.* antiviral effectiveness against SARS-CoV-2 correlated inversely with artemisinin content. The absence of artemisinin (CAS No. 63968-64-9) from the chromatographic profile may reflect its low concentration in the Kazakhstani population or limitations of the GC-MS method; targeted quantification by HPLC is recommended in future studies.

The optimal formulation ratio of *Artemisia annua L*. ethanolic extract to isomalt was established as 1:2 (v/w), corresponding to 10.0 mL of extract and 20.0 g of isomalt per batch. This ratio was selected on the basis of a series of preparative experiments evaluating crystallization behavior, physical texture, and organoleptic properties. Higher extract concentrations resulted in unacceptable viscosity and impaired mold filling, while lower concentrations produced a product with

insufficient therapeutic content. The 1:2 ratio produced a caramel mass of optimal viscosity at 90°C, amenable to clean mold filling and complete solidification at ambient temperature. The selection of isomalt over sucrose was justified by its lower crystallization tendency, critical for maintaining the amorphous glassy structure of hard caramel dosage forms [11-12], and its poor gastrointestinal absorption, rendering the formulation suitable for diabetic patients – clinically important given that respiratory infections disproportionately affect metabolically vulnerable populations [15]. These advantages are consistent with previously published evaluations of isomalt-based lozenge formulations [12]. Complete evaporation of the 70% EtOH vehicle was ensured by sequential thermal treatment – heating the extract to 80°C prior to incorporation, followed by addition to the 90°C caramel mass – confirming that the finished dosage form is ethanol-free. The absence of post-formulation GC-MS analysis to confirm retention of volatile terpenoids, particularly Camphor and 1,8-Cineole, following thermal processing is acknowledged as a limitation; post-formulation characterization is proposed as a future research priority.

All five standardization parameters met SP RK Vol. 1 acceptance criteria [13]. Mass uniformity across 20 units yielded an average mass of 1.7084 g with a maximum deviation of less than 0.05%, substantially below the 5% SP RK limit [13] comparing favorably with analogous isomalt-based lozenge formulations [12] and confirming manufacturing reproducibility. Complete disintegration within 10 minutes, well within the 15-minute SP RK limit, is consistent with the high aqueous solubility of (2), and is pharmacokinetically advantageous for maximizing contact of active constituents with the oral and pharyngeal mucosa. Water content below 2.0% confirmed by Karl Fischer titration is consistent with the known hygroscopic resistance of (2) relative to sucrose-based systems [15], validating the dual cellophane-and-plastic packaging strategy.

4. Conclusion

This study successfully developed a standardized medicated caramel lozenge based on bioactive extracts of *Artemisia annua L*. – a medicinally significant plant species abundantly distributed across Kazakhstan – in compliance with SP RK requirements, addressing the need for accessible therapeutic alternatives in the context of respiratory viral infections including COVID-19.

Physicochemical characterization of the raw material confirmed a mass loss on drying of 6.5%, an extractive substance content of 40.2%, notably higher than values typically reported for *Artemisia* species, and complete absence of heavy metals. Essential oil yield was 0.4% (v/w, dry basis), with 1,8-cineole constituting 8.6% of the essential oil fraction. GC-MS profiling identified more than 50 bioactive compounds in the ethanolic extract, with Camphor (9.35%) and 1,8-cineole (8.60%) as predominant constituents. The detection of Squalene, a triterpene hydrocarbon with antimicrobial, antifungal, and immunostimulatory properties, is of particular significance for future antiviral therapeutic development.

The optimal 1:2 (v/w) extract-to-isomalt formulation produced a thermally stable, ethanol-free, diabetic-compatible dosage form that met all five standardization parameters — organoleptic properties, mass uniformity (average mass 1.7084 g; maximum deviation <0.05%), disintegration (<10 min), and water content (<2.0%) – confirming full pharmacopoeial compliance and manufacturing reproducibility.

The developed formulation represents a practically accessible and stable alternative to conventional tincture-based delivery, with particular suitability for pediatric, elderly, and diabetic patient populations. The comprehensive chemical profile established for *Artemisia annua L*. of Kazakhstani origin contributes to the broader understanding of the phytochemical diversity of this species and provides a basis for future investigation of synergistic multi-component antiviral mechanisms. Future research should prioritize post-formulation GC-MS characterization, accelerated stability studies, artemisinin quantification by HPLC, toxicological evaluation, and clinical trials to establish therapeutic efficacy and dosage recommendations.

References

1. Vozrastnoj spektr, plotnost", chislennost" jendem vida artemisia heptapotamica poljak (age composition, density, number of the endemic species artemisia heptapotamica poljak.) / U. Mukatay I dr. // Experimental Biolog. – 2021. – № 88(3). – P. 76-140. https://doi.org/10.26577/eb.2021.v88.i3.01.

2. Molecular phylogeny of Subtribe Artemisiinae (Asteraceae), including *Artemisia* and its allied and segregate genera / L.E. Watson et al // BMC Evol Biol. – 2022. – № 2. – P. 17. https://doi.org/10.1186/1471-2148-2-17.
3. Pellicer J. Artemisia (Asteraceae): Understanding its evolution using cytogenetic and molecular systematic tools, with emphasis on subgenus Dracunculus / J. Pellicer, T. Garnatje, J. Valles // Transworld Research Network. – 2011. – № 2. – P. 200-221. https://digital.csic.es/bitstream/10261/75218/1/artemisia_asteraceae_understanding.pdf.
4. FLORA Evropejskoj Chasti SSSR / A.E. Bobrov et al // FLORA of the European part of the USSR. – 1974. – Vol. 1. Nauka, Leningrad branch, https://www.booksite.ru/fulltext/783406/text.pdf.
5. Composition and antimicrobial activity of essential oil from the aerial part of Artemisia annua / Y. Li et al // Journal of Medicinal Plants Research. – 2011. – № 5(16). – P. 3629-3633. https://academicjournals.org/article/article1380698865_LI%20et%20al.pdf.
6. Detailed Phytochemical Analysis of High- and Low Artemisinin-Producing Chemotypes of Artemisia annua / T. Czechowski et al // Front. Plant Sci. – 2018. – № 9. – P. 641. https://doi:10.3389/fpls.2018.00641.
7. Secondary metabolites of Artemisia annua and their biological activity / R.S. Bhakuni et al // Current Science. – 2001. – № 80(1). – P. 35-48. http://www.jstor.org/stable/24105552.
8. Chemical composition and antioxidant and antimicrobial activity of essential oil of Artemisia annua L. from Bosnia / S. Ćavar et al // Industrial Crops and Products. – 2012. – № 37(1). – P. 479-485. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.07.024.
9. Antipyretic and anti-inflammatory effects of Artemisia / L. Huang et al // China Journal of Chinese Materia Medica. – 1993. – № 18(1). – P. 44-8.
10. In vitro efficacy of artemisinin-based treatments against SARS-CoV-2 / Y. Zhou et al // Scientific Reports. – 2021. – № 11(1). https://doi.org/10.1038/s41598-021-93361-y.
11. Allen L.V. Farmacevticheskaja tehnologija / L.V. Allen, A.S. Gavrilov // Izgotovlenie lekarstvennyh preparatov (Pharmaceutical technology. Manufacturing of drugs). GEOTAR-Media, 2014. https://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785970427811.html.
12. Obosnovanie sostava i razrabotka tehnologii izgotovlenija ledencov na osnove fitopreparata «dentos» (Justification of the composition and development of manufacturing technology for lozenges based on the phytopreparation «Dentos») / N.R. Varina et al // International Journal of Experimental Education. – 2015. – № 12-4. – P. 492. https://s.expeducation.ru/pdf/2015/2015_12_4.pdf#page=28.
13. Ministry of Health of the Republic of Kazakhstan. State Pharmacopoeia of the Republic of Kazakhstan. – 2008. – Vol. 1, Zhibek Zholy. https://labtorg.kz/downloads/Methods/Gosudarstvennaya-farmakopeya-Respubliki-Kazahstan-tom-I.pdf.
14. Ministry of Health of the Republic of Kazakhstan. State Pharmacopoeia of the Republic of Kazakhstan 2009. – Vol.2, Zhibek Zholy. https://labtorg.kz/downloads/Methods/Gosudarstvennaya-farmakopeya-Respubliki-Kazahstan-tom-II.pdf .
15. Korneeva O.S. Izomal''tuloza – prirodnyj zamenitel'' sahara (Isomaltulose – a natural sugar substitute) / O.S. Korneeva, O.Yu. Bozhko // Fundamental Research. – 2005. – № 10. – P. 34-35. https://s.fundamental-research.ru/pdf/2005/10/8.pdf.

А.Д. Молдаши[1], Е. Сайлауханулы[2], С. Азат[2], К. Тоштай[3], Н. Нургалиев[4]*
[1]GEMS International School Al Khail, 246587, Дубай, ОАЭ, ул. .Al Khail 18
[2]Satbayev University, 050013, Алматы, Казахстан, ул.Сатпаева 20
[3]Казахский национальный университет,
050040, Алматы, Казахстан, Аль-Фараби проспект 71
[4]Шәкәрім университет, 071412, Семей, Казахстан, ул. Глинки, 20
e-mail: adilyamoldash7@gmail.com

РАЗРАБОТКА И СТАНДАРТИЗАЦИЯ ЛЕКАРСТВЕННОЙ ФОРМЫ КАРАМЕЛИ НА ОСНОВЕ ЛЕКАРСТВЕННОГО РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ *ARTEMISIA ANNUA L.*

Острые респираторные вирусные инфекции (ОРВИ) являются одними из наиболее распространённых инфекционных заболеваний в мире, а пандемия COVID-19 дополнительно подчеркнула острую необходимость в разработке новых терапевтических альтернатив. Недавние исследования in vitro продемонстрировали ингибирующую активность этанольных экстрактов

Artemisia annua L. в отношении SARS-CoV-2 посредством синергетических многокомпонентных механизмов. Целью настоящего исследования являлась разработка стандартизированной лекарственной карамели на основе биоактивных экстрактов Artemisia annua L. с использованием изомальта в качестве фармацевтической основы, в соответствии с требованиями Государственной фармакопеи Республики Казахстан (ГФ РК), Европейской фармакопеи и Фармакопеи США. Лекарственное растительное сырьё было собрано в период массового цветения в июле-августе 2025 года у подножия хребта Иле Алатау, Алматинская область, Казахстан. Физико-химическая характеристика подтвердила потерю массы при высушивании 6,5%, содержание экстрактивных веществ 40,2% и полное отсутствие тяжёлых металлов по данным атомно-абсорбционной спектрометрии. Выход эфирного масла составил 0,4% (об./м., в пересчёте на абсолютно сухое сырьё), при этом содержание 1,8-цинеола составило 8,6% по данным газовой хроматографии-масс-спектрометрии (ГХ-МС). Профилирование этанольного экстракта методом ГХ-МС позволило идентифицировать более 50 биологически активных соединений, среди которых преобладали камфора (9,35%) и 1,8-цинеол (8,60%). Особое значение имеет обнаружение сквалена, тритерпенового углеводорода, обладающего антимикробными, противогрибковыми и иммуностимулирующими свойствами. Оптимальное соотношение экстракта и изомальта 1:2 позволило получить термически стабильную, не содержащую этанола, совместимую с диабетом лекарственную форму, отвечающую всем пяти параметрам стандартизации ГФ РК: органолептическим свойствам, однородности массы (средняя масса 1,7084 г; максимальное отклонение <0,05%), распадаемости (<10 мин) и содержанию воды (<2,0%). Разработанная лекарственная форма представляет собой стабильную и доступную альтернативу настойкам, пригодную для применения в педиатрической практике, у пожилых пациентов и больных сахарным диабетом.

***Ключевые слова**: Artemisia annua L., однолетняя полынь, лекарственная карамель, пастилка, изомальт, 1,8-цинеол, фитопрепарат, SARS-CoV-2.*

А.Д. Молдаши[1], Е. Сайлауханұлы[2], С. Азат[2], К. Тоштай[3] , Н. Нургалиев[4]*
[1]GEMS International School Al Khail, 246587, Дубай, ОАЭ, Al Khail көшесі 18
[2]Сәтбаев Университеті, 050013, Алматы, Қазақстан, Сатпаева көшесі 20
[3]Әл-Фараби атындағы Каз¥У, 050040, Алматы, Қазақстан, Әл-Фараби даңғылы 71
[4]Шәкәрім университеті, 071412, Қазақстан Республикасы, Семей, Глинки көшесі, 20
e-mail: adilyamoldash7@gmail.com

ARTEMISIA ANNUA L. ДӘРІЛІК ӨСІМДІК ШИКІЗАТЫ НЕГІЗІНДЕ КАРАМЕЛЬ ДӘРІЛІК ФОРМАСЫН ӘЗІРЛЕУ ЖӘНЕ СТАНДАРТТАУ

Жіті респираторлық вирустық инфекциялар (ЖРВИ) әлем бойынша ең кең таралған жұқпалы аурулардың бірі болып табылады, ал COVID-19 пандемиясы жаңа терапевтік баламаларды әзірлеудің өзекті қажеттілігін одан әрі айқындады. Соңғы in vitro зерттеулер Artemisia annua L. этанолдық экстрактларының SARS-CoV-2-ге қарсы синергетикалық көпкомпонентті механизмдер арқылы тежеуші белсенділігін көрсетті. Осы зерттеудің мақсаты Қазақстан Республикасының Мемлекеттік фармакопеясының (ҚР МФ), Еуропалық фармакопея мен АҚШ фармакопеясының талаптарына сәйкес изомальтты фармацевтикалық негіз ретінде пайдалана отырып, Artemisia annua L. биоактивті экстракттары негізінде стандартталған дәрілік карамель пастилкасын әзірлеу болды. Шикізат 2025 жылғы шілде–тамыз айларында жаппай гүлдеу кезеңінде Алматы облысы, Қазақстан, Іле Алатауының етегінде жиналды. Физика-химиялық сипаттама кептіру кезіндегі массасының жоғалуы 6,5%, экстрактивті заттардың мөлшері 40,2% және атомдық-абсорбциялық спектрометрия бойынша ауыр металдардың толық болмауын растады. Эфир майының шығымы 0,4% (к./м., абсолютті құрғақ шикізатқа қайта есептегенде) құрады, бұл ретте 1,8-цинеолдың мөлшері газды хроматография–масс-спектрометрия (ГХ-МС) әдісімен 8,6% құрады. Этанолдық экстрактты ГХ-МС әдісімен профильдеу 50-ден астам биологиялық белсенді қосылысты анықтауға мүмкіндік берді, олардың ішінде камфора (9,35%) және 1,8-цинеол (8,60%) басым болды. Антимикробтық, саңырауқұлаққа қарсы және иммуностимуляциялық қасиеттері бар тритерпен көмірсутегі, сквален анықталуы ерекше маңызға ие. Экстракт пен изомальттың оңтайлы 1:2 қатынасы ҚР МФ стандарттау параметрлерінің барлық бесеуіне сәйкес келетін термиялық тұрақты, этанолсыз, диабетпен үйлесімді дәрілік форманы алуға мүмкіндік берді: органолептикалық қасиеттер, масса біркелкілігі (орташа масса 1,7084 г; ең жоғары ауытқу <0,05%), ыдырау (<10 мин) және су мөлшері (<2,0%). Әзірленген дәрілік форма педиатриялық, егде жастағы және қант диабеті бар науқастарға қолдануға жарамды, тұрақты және қолжетімді балама болып табылады.

***Түйін сөздер:** Artemisia annua L., жылдық жусан, дәрілік карамель, пастилка, изомальт, 1,8-цинеол, фитопрепарат, SARS-CoV-2.*

Information about authors

Adiliya Dinmuhamedkyzy Moldashi – Student, GEMS International School Al Khail; e-mail: adilyamoldash7@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-5258-4737.

Yerbolat Sailaukhanuly – PhD, Satpayev University, Senior researcher of the Laboratory of Engineering Profile; e-mail: s.erbolat@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8417-4136.

Azat Seitkhan – PhD, Professor, Satpayev University, Head of the Laboratory of Engineering Profile; e-mail: seytkhan.azat@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9705-7438.

Kainaubek Toshtay – PhD, Associate professor, KazNU named after Al-Farabi, Department of Physical Chemistry, Catalysis, and Petrochemistry; e-mail: kainaubek.toshtay@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1182-7460.

Nurzhan Nurlybekovich Nurgaliyev* – PhD, associate professor-researcher, Shakarim University, Department of Chemistry and Ecology; e-mail: n.nurgaliyev@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1216-7150.

Сведения об авторах

Адилия Динмухамедовна Молдаши – студент, Международная школа GEMS Al Khail; e-mail: adilyamoldash7@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-5258-4737.

Ерболат Сайлауханулы – PhD, научный сотрудник лаборатории инженерного профиля, Сатпаев университет; e-mail: s.erbolat@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8417-4136

Азат Сейтхан – PhD, Профессор, Директор лаборатории инженерного профиля, Сатпаев университет; e-mail: seytkhan.azat@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9705-7438.

Кайнаубек Тоштай – PhD, Ассоц. профессор, кафедра физической химии, катализа и нефтехимии; e-mail: kainaubek.toshtay@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1182-7460.

Нуржан Нурлыбекович Нургалиев* – PhD, доцент-исследователь, кафедра химии и экологии, Шәкәрім университет, кафедры химии и экологии; e-mail: n.nurgaliyev@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003 1216-7150.

Авторлар туралы мәліметтер

Адилия Дінмұхамедқызы Молдаши – оқушы, GEMS International School Al Khail; e-mail: adilyamoldash7@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-5258-4737.

Ерболат Сайлауханулы – PhD, аға ғылыми қызметкер, инженерлік бейінді зертханы, Сатпаев университеті; e-mail: s.erbolat@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8417-4136.

Сейтхан Азат – PhD, профессор, Инженерлік бейінді зертханы басшысы, Сатпаев университеті; e-mail: seytkhan.azat@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9705-7438.

Кайнаубек Тоштай – PhD, Қауымдастырылған профессор, физикалық химия, катализ және мұнайхимия кафедрасы, Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті; e-mail: kainaubek.toshtay@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1182-7460.

Нұржан Нұрлыбекұлы Нұрғалиев* – PhD, доцент-зерттеуші, Шәкәрім университеті, Химия және экология кафедрасы; e-mail: n.nurgaliyev@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003 1216-7150.

Received 01.06.2026
Revised 26.06.2026
Accepted 29.06.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-84

МРНТИ: 53.37.29

CC BY 4.0
Check for updates

Н.К. Ахмадиева[1]*, Е.Б. Абикак[1], Н.М. Бурабаева[2], Т.К. Сагынтаева[1], Н. Оракбай[2]

[1]Институт металлургии и обогащения, 050010, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Шевченко 29

[2]Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева,
070004, Республика Казахстан, г. Усть -Каменогорск, ул. Серикбаева, 19

*e-mail: akhmadiyeva141@gmail.com

КАРБОНАТНО-ГИДРОТЕРМАЛЬНАЯ АКТИВАЦИЯ АЛЮМОСИЛИКАТНОГО СЫРЬЯ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ГЛИНОЗЁМА

Аннотация: *В статье приведены результаты исследования карбонатно-гидротермальной активации смеси нефелиновой руды и красного шлама как эффективного способа предварительной активации алюмосиликатного сырья перед щелочным выщелачиванием. Актуальность работы*

©Н.К. Ахмадиева, Е.Б. Абикак, Н.М. Бурабаева, Т.К. Сагынтаева, Н. Оракбай, 2026

обусловлена необходимостью расширения глиноземсодержащей сырьевой базы в Казахстане, в том числе за счет возможного использования небокситового сырья – нефелинов и отходов глиноземного производства – красного шлама. Исследовано влияние обработки смеси нефелиновой руды и красного шлама раствором $NaHCO_3$ при температуре 260 °C на изменение фазового состава. Установлено, что в результате предварительной активации происходят образование канкринита в количестве около 19 % и бемита около 2,8 %, что свидетельствует о частичной перекристаллизации исходных алюмосиликатов. Для дальнейшей переработки активированного материала предложена двухстадийная схема щелочного выщелачивания с добавлением кальция. Целью первой стадии является извлечение калия, с последующим извлечением алюминия на второй. В результате переработки степень извлечения калия составляет 82-87% и извлечения алюминия 92-94%. Полученные результаты подтверждают тесную взаимосвязь между фазовыми преобразованиями и эффективностью извлечения ценных компонентов, создавая научную основу для совершенствования технологий комплексного получения глинозёма из сложных алюмосиликатных материалов и промышленных отходов.

Ключевые слова: *карбонатно-гидротермальная активация, фазовые превращения, щелочное выщелачивание, извлечение глинозёма, удаление калия, нефелиновая руда, красный шлам, канкринит.*

Введение

Устойчивое развитие глинозёмного производства связано с необходимостью расширения сырьевой базы и вовлечения в переработку техногенных отходов. Мировое производство глинозема базируется в основном на переработке высококачественных бокситов с кремниевым модулем выше 7 по способу Байера. Однако постепенное истощение богатых месторождений и ухудшение качества руд, понижение кремниевого модуля, требуют поиска альтернативных природных и техногенных алюмосодержащих материалов [1, 2]. К таким видам сырья относятся нефелины, глины, каолины, алуниты, аргиллиты, бентониты, низкокачественные бокситы, запасы которых имеются в достаточно больших количествах и месторождения их повсеместно распространены. Промышленная переработка данных руд может быть целесообразной при комплексном использовании сырья.

С этой точки зрения актуальна работа по изучению возможности разработки комплексной технологии переработки нефелиновых сиенитов Кубасадырского месторождения Республики Казахстан. Основным методом переработки нефелинов является обжиг из-за высокой устойчивостью его кристаллической структуры в щелочных средах. При традиционном щелочном выщелачивании растворение таких минералов протекает медленно, что требует повышенных температур, высоких концентраций щёлочи или предварительной активации материала [3]. Дополнительной технологической проблемой является присутствие калия, который способен накапливаться в алюминатных растворах и отрицательно влиять на процессы осаждения гидроксида алюминия [4-7].

Красный шлам является отходом глинозёмного производства, образующимся при переработке бокситов по процессу Байера. Извлечение Al_2O_3 в раствор в процессе выщелачивания боксита по способу Байера составляет порядка 70%, остальное количество остается в красном шламе. Помимо глинозема в его составе присутствуют оксиды железа, титана, а также остаточные алюмосиликаты. Красный шлам является трудновскрываемым при гидрохимической переработке в щелочном растворе, поэтому его перерабатывают методом спекания. [8]. Одновременно длительное хранение красного шлама сопровождается экологическими рисками, поэтому разработка способов его комплексной переработки представляет практический интерес [9, 10].

В последние годы большое внимание уделяется термохимической активации алюмосиликатного сырья. Показано, что обработка в карбонатных и гидрокарбонатных средах способствует частичному разрушению исходной структуры минералов и образованию более реакционноспособных фаз [11, 12]. В частности, для нефелиновых материалов характерно формирование канкринита и оксигидроксидов алюминия. Совместная переработка нефелиновой руды и красного шлама представляет отдельный интерес, поскольку взаимодействие компонентов различного состава может способствовать более глубоким фазовым превращениям в процессе термохимической активации. Однако сведения о поведении подобных систем в карбонатно-гидротермальных условиях остаются ограниченными [8, 13].

Помимо извлечения алюминия, важным технологическим фактором является поведение калия в щелочных растворах. Повышенное содержание калия ухудшает стабильность алюминатных растворов и влияет на эффективность технологического цикла [19, 20]. В связи с этим практический интерес представляет разработка схем, обеспечивающих одновременно высокое извлечение алюминия и калия. Целью настоящей работы является исследование фазовых превращений, протекающих при карбонатно-гидротермальной активации смеси нефелиновой руды и красного шлама, а также оценка влияния этих преобразований на эффективность двухстадийного щелочного выщелачивания.

Методы исследования

2.1. Сырьевые материалы

Нефелиновая руда была получена с месторождения Кубасадыр (Казахстан), а красный шлам, образующийся по процессу Байера, предоставлен Павлодарским алюминиевым заводом (Казахстан). Перед проведением экспериментов оба материала высушивали при температуре 105 °C до постоянной массы. Исходные материалы измельчали до крупности менее 74 мкм с использованием лабораторной шаровой мельницы для обеспечения равномерной реакционной способности.

Химический состав нефелиновой руды, красного шлама и их смеси определяли методом рентгенофлуоресцентного анализа (XRF) с использованием волнодисперсионного спектрометра Venus 200 (PANalytical B.V., Алмело, Нидерланды). Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав исходных продуктов

Компонент	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	CaO	Na_2O	K_2O	MgO	TiO_2	SO_3	ппп
Красный шлам (мас.%)	19.83	20.29	29.34	0.69	13.7	0.28	0.24	6.96	2.01	6,66
Нефелинсодержащая руда (мас.%)	20.83	59.45	3.84	3.27	5.08	3.32	0.35	0.51	0.33	1.02
Смесь (мас.%)	21.72	35.87	18.86	1.76	11.52	2.37	0.37	4.71	1.61	1.21

Минералогический состав нефелиновой руды, красного шлама и их смеси определяли методом рентгеновской дифракции (XRD) с использованием дифрактометра D8 Advance (Bruker, Billerica, MA, США) с Cu-Kα излучением при напряжении 40 кВ и токе 40 мА.

Количественный фазовый состав исследуемых материалов приведён в таблице 2.

Таблица 2 – Фазовый состав нефелиновой руды, красного шлама и их смеси

Фаза	Нефелинсодержащая руда (мас.%)	Красный шлам (мас.%)	Смесь (мас.%)
Альбит	16.7		28.8
Гематит	-	24.6	23.5
Микроклин	75.3	-	23.1
Гидроксид диоксида кремния	3.8	-	
Железо-кальциевый оксид	4.2	-	-
Гидрат алюмосиликата натрия	-	21.2	-
Гидрат алюмосиликата натрия с карбонат- и сульфид-ионами	-	-	20.6
Силикат натрия-кальция	-	21.2	
Аллофан	-	16.9	1.9
Анатаз	-	7.7	2.0

2.2. Подготовка смеси

Перед термохимической активацией нефелиновую руду и красный шлам смешивали в массовом соотношении 1:1. Данное соотношение выбрано с целью уравновешивания кремнезёмсодержащего нефелина и железосодержащего красного шлама.

2.3. Термохимическая активация

Термохимическую активацию проводили в автоклаве из нержавеющей стали, оснащённом механическим перемешиванием в растворе $NaHCO_3$ 120 г/дм³, Ж:Т = 3:1. Пульпу

нагревали до температуры 260-280 °С и выдерживали в течение 4-6 ч после достижения заданной температуры. По завершении процесса автоклав охлаждали до комнатной температуры. Твёрдый продукт отделяли фильтрацией, промывали дистиллированной водой до нейтрального pH и сушили при 105°С.

2.4. Двухстадийное щелочное выщелачивание

Двухстадийное щелочное выщелачивание проводили в том же автоклаве из нержавеющей стали, который использовался для термохимической активации.

Стадия 1: селективное удаление калия. Кек, полученный в результате химической активации, обрабатывали оборотным щелочным раствором, содержащим 150 г/л Na_2O, при температуре 200 °С. Количество необходимого кальция был стехеометрически рассчитан для достижения соотношения $CaO:SiO_2$ = 1,5 в пульпе. После выщелачивания пульпу фильтровали для отделения кека от раствора. Раствор упаривали с целью осаждения сульфата калия. Полученный обеднённый по калию алюминатный раствор, обогащённый растворёнными формами алюминия, направляли на вторую стадию процесса.

Стадия 2: извлечение оксида алюминия. Алюминатный раствор после удаления калия подвергали дополнительному выщелачиванию при температуре 260 °С оборотным алюминатным раствором с концентрацией 240-260 г/л Na_2O. В раствор так же добавляли кальций в виде гидроксида кальция, для получения соотношения $CaO:SiO_2$ до 1,5 с учётом кальция, добавленного на первой стадии.

Обсуждение научных результатов

В результате химической активации произошло частичное разрушение алюмосиликатного каркаса нефелина и фаз красного шлама. Одновременно алюминий переходил в растворимые алюминатные формы.

В ходе обработки наблюдалось образование вторичных карбонатсодержащих фаз, главным образом канкринита. Формирование бемита, вероятно, связано с локальным пересыщением раствора по алюминию в процессе гидротермальной обработки. Для оценки фазовых изменений после термохимической активации был проведён рентгенофазовый анализ обработанных образцов. Согласно данным рентгенофазового анализа (рис. 5), после обработки в смеси присутствовали гематит, альбит, микроклин, канкринит и бемит.

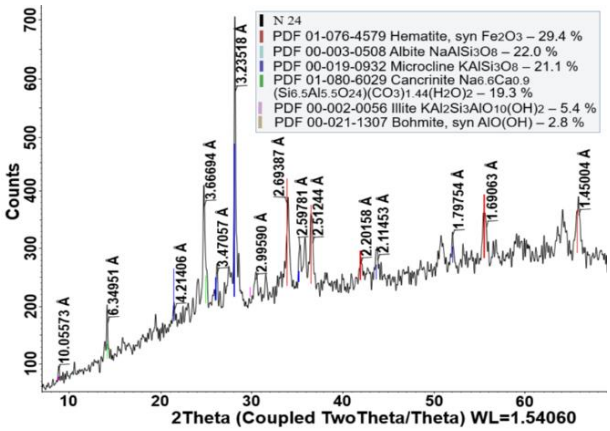
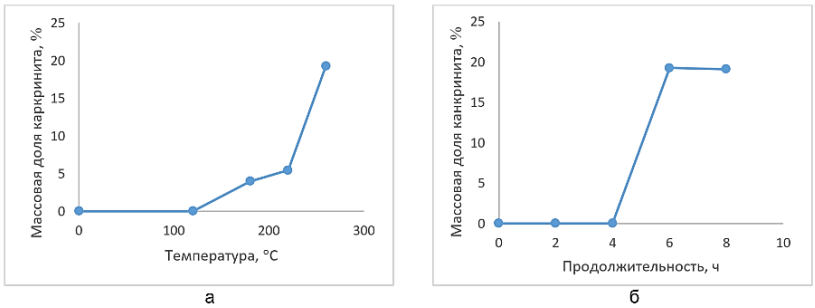


Рисунок 1 – Рентгенограмма смеси нефелиновой руды и красного шлама после термохимической активации

Появление канкринита и бемита, отсутствующих в исходной смеси, указывает на протекание процессов перекристаллизации в карбонатно-гидротермальной среде. При этом часть полевошпатовых минералов сохранялась, что свидетельствует о неполном разрушении алюмосиликатного каркаса. Гематит в исследуемых условиях оставался устойчивой фазой.

Совместная гидротермальная обработка нефелиновой руды и красного шлама приводила к более выраженному перераспределению фаз по сравнению с индивидуальной обработкой компонентов. Исследовано влияние температуры и продолжительности гидротермальной обратотки на содержание канкринита в кеке (рис. 2).



а б

Рисунок 2 – Зависимость содержания канкринита
а) от температуры гидротермальной обработки б) от продолжительности

Повышение температуры до 260°С сопровождалось заметным увеличением содержания канкринита, что свидетельствует об интенсификации процессов перекристаллизации. Дальнейшее повышение температуры практически не изменяло фазовый состав, что может указывать на приближение системы к равновесному состоянию. Увеличение продолжительности гидротермальной обработки до 6 ч также способствовало росту содержания канкринита. После 6 ч фазовый состав изменялся незначительно, что свидетельствует о завершении основной части фазовых превращений.

На основании полученных результатов оптимальные условия активации определены как: 260°С, 6 ч, 120 г/л $NaHCO_3$ и Ж:Т = 3:1. Важно отметить, что совместная активация нефелиновой руды и красного шлама приводит к более высокому содержанию канкринита по сравнению с раздельной обработкой компонентов.

Первая стадия выщелачивания проводилась в щелочном растворе, содержащем 150 г/л Na_2O, при температуре 200°С с добавлением $CaSO_4$ (20-30% от расчётного количества CaO). В этих условиях 82-87% оксида калия и 7-8% оксида алюминия переходит в раствор, а раствор, очищенный от калия идет на вторую стадию выщелачивания для извлечения оксида алюминия. Такой подход предотвращает накопление калия в алюминатном контуре и обеспечивает постепенное обогащение раствора алюминием.

Вторая стадия выщелачивания проводилась в оборотном алюминатном растворе с концентрацией 240 г/л Na_2O при температуре 260°С с добавлением $Ca(OH)_2$ для поддержания соотношения $CaO:SiO_2$ = 1,5. В этих условиях происходит интенсивное растворение бемита и активированных карбонатсодержащих алюмосиликатов. Одновременно связывание кремния в кальциевые силикаты подавляет вторичное осаждение алюминия и способствует его переходу в раствор.

Химический состав твёрдого остатка после второй стадии выщелачивания составляет, мас.%: Al_2O_3 – 1,52; SiO_2 – 31,48; Fe_2O_3 – 16,23; CaO – 39,0; Na_2O – 4,0; K_2O – 0,37; MgO – 0,37; TiO_2 – 4,71; SO_3 – 1,61; прочие – 0,71. Содержание калия в исходной смеси составляло 2,37 мас.% и снижалось до 0,37 мас.% в твёрдом остатке после второй стадии выщелачивания.

Заключение

Проведённые исследования показали, что карбонатно-гидротермальная активация смеси нефелиновой руды и красного шлама приводит к изменению фазового состава алюмосиликатного материала и повышению его реакционной способности при последующем щелочном выщелачивании.

Установлено, что обработка в растворе $NaHCO_3$ при 260-280°С сопровождается образованием канкринита и бемита. Показано, что повышение температуры и продолжительности обработки способствует увеличению содержания канкринита до достижения состояния, близкого к равновесному. Оптимальными условиями активации являются температура 260°С, продолжительность 6 ч, концентрация $NaHCO_3$ 120 г/л и соотношение Ж:Т = 3:1.

Предложенная двухстадийная схема щелочного выщелачивания обеспечивает селективное удаление калия и высокую степень извлечения алюминия. Степень извлечения глинозёма достигает 92-94%, тогда как удаление калия составляет 82-87%.

Полученные результаты подтверждают перспективность совместной переработки нефелиновой руды и красного шлама с использованием предварительной карбонатно-

гидротермальной активации. Предложенный подход может быть использован при разработке технологий комплексной переработки алюмосиликатного сырья и техногенных отходов.

Список литературы

1. Valorisation of bauxite residue (red mud): A review / C.R. Borra et al // Journal of Sustainable Metallurgy. – 2016. – Т. 2. – P. 255-278.
2. Bauxite residue treatment / L. Wang et al // Science of the Total Environment. – 2024. – Т. 912. – P. 168847.
3. Hydrothermal processing of nepheline syenite / J. Samantray et al // Separation Science and Technology. – 2023. – Т. 58. – P. 2505-2518.
4. Behavior of potassium in Bayer process / Y. Gao et al // Mineral Engineering. – 2026. – Т. 235. – P. 109870.
5. Pre-activation of nepheline before enrichment / N. Akhmadiyeva et al // Complex Use of Mineral Resources. – 2023. – № 327. – P. 82-89.
6. Activation of mineral composition via thermochemical disintegration / N. Akhmadiyeva et al // Minerals. – 2025. – Т. 15. – P. 1000.
7. Evans K. The history and challenges of bauxite residue management / K. Evans // Journal of Sustainable Metallurgy. – 2016. – Т. 2. – P. 316-331.
8. Karimi Z. Utilization of red mud via stepwise leaching / Z. Karimi, A. Rahbar-Kelishami // Scientific Reports. – 2023. – Т. 13. – P. 8527.
9. Zhao D. Thermal activation of red mud / D. Zhao, Y. Ma, P. Hou // Journal of Building Engineering. – 2025. – Т. 104. – P. 112376.
10. Phase transformation of aluminosilicates in red mud / X. Wang et al // Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology. – 2022. – Т. 109. – P. 186-193.
11. Red mud-based synergistic fabrication / F. Li et al // Processes. – 2025. – Т. 13. – P. 2249.
12. Grundy H.D. Carbonate-rich cancrinite crystal structure / H.D. Grundy, I. Hassan // Canadian Mineralogist. – 1982. – Т. 20. – P. 239-251.
13. Boehmite solubility and aluminum speciation in hydrothermal solutions / S. Castet et al // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1993. – Т. 57. – P. 4869-4884.
14. Removal of potassium from sodium aluminate solution / J. Liu et al // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2024. – Т. 12. – P. 113330.

Информация о финансировании

Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (AP26100479 «Разработка инновационной гидрохимической технологии совместной переработки бокситов и нефелинов с термохимической активацией красного шлама»).

Н.К. Ахмадиева[1]*, Е.Б. Абикак[1], Н.М. Бурабаева[1], Т.К. Сагынтаева[1], Н. Оракбай[2]

[1]Металлургия және кен байыту институты,
050010, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Шевченко көш., 29
[2]Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті,
070004, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ., Серікбаев көш., 19
*e-mail: akhmadiyeva141@gmail.com

ГЛИНОЗЕМДІ АЛУДЫ ҚАРҚЫНДАТУ ҮШІН АЛЮМОСИЛИКАТТЫ ШИКІЗАТТЫ КАРБОНАТТЫ-ГИДРОТЕРМИЯЛЫҚ АКТИВАЦИЯЛАУ

Мақалада нефелин кені мен қызыл шлам қоспасын карбонатты-гидротермиялық белсендірудің сілтілік шаймалау алдындағы алюмосиликатты шикізатты алдын ала минералогиялық дайындаудың тиімді әдісі ретіндегі зерттеу нәтижелері келтірілген. Зерттеудің өзектілігі алюминийдің алыну дәрежесін арттыру және сілтілік жүйелердегі калийдің мінез-құлқын реттеу мақсатында табиғи және техногендік шикізатты кешенді өңдеу тиімділігін жоғарылату қажеттілігімен негізделеді. Нефелин кені мен қызыл шламның массалық қатынасы 1:1 болатын қоспаны 260 °С температурада натрий гидрокарбонаты ерітіндісімен өңдеудің әсері зерттелді. Белсендіру барысында елеулі минералогиялық түрленулер жүретіні анықталды, олар шамамен 19 масс.% канкринит пен 2,8 масс.% бемиттен тұратын екіншілік фазалардың түзілуімен қатар жүреді, бұл бастапқы алюмосиликаттардың ішінара

қайта кристалданғанын көрсетеді. Белсендірілген материалды одан әрі өңдеу үшін кальций қосылған екі сатылы сілтілік шаймалау сызбасы ұсынылды, ол бірінші сатыда калийді селективті түрде жоюды, ал екінші сатыда алюминийді қарқынды түрде бөліп алуды қамтамасыз етеді. Минералогиялық түрленулер материалдың реакциялық қабілетін арттырып, негізгі компоненттердің қатты және сұйық фазалар арасындағы таралуын өзгертетіні көрсетілді. Қол жеткізілген глиноземді алу дәрежесі 92–94%-ды, ал калийді жою деңгейі 82-87%-ды құрайды. Алынған нәтижелер фазалық түрленулер мен бағалы компоненттерді бөліп алу тиімділігі арасындағы тығыз байланысты растайды және күрделі алюмосиликатты материалдар мен өнеркәсіптік қалдықтардан глинозем өндірудің кешенді технологияларын жетілдірудің ғылыми негізін қалыптастырады.

Түйін сөздер: *карбонатты-гидротермиялық активация, фазалық түрленулер, сілтілік шаймалау, глиноземді алу, калийді бөлу, нефелин кені, қызыл шлам; канкринит.*

N.K. Akhmadiyeva*, E.B. Abikak[1], N.M. Burabayeva[1], T.K. Sagyntayeva[1], N. Orakbay[2]
[1]Institute of Metallurgy and Ore Beneficiation, 29 Shevchenko St., Almaty 050010, Republic of Kazakhstan
[2]D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University,
19 Serikbayev St., Ust-Kamenogorsk 070004, Republic of Kazakhstan
*e-mail: akhmadiyeva141@gmail.com

CARBONATE-HYDROTHERMAL ACTIVATION OF ALUMINOSILICATE RAW MATERIALS FOR INTENSIFIED ALUMINA RECOVERY

The article presents the results of a study on the carbonate-hydrothermal activation of a mixture of nepheline ore and red mud as an effective method of preliminary mineralogical preparation of aluminosilicate raw materials prior to alkaline leaching. The relevance of the work is determined by the need to improve the efficiency of integrated processing of natural and technogenic raw materials in order to increase aluminum recovery and regulate potassium behavior in alkaline systems. The effect of treating a nepheline ore–red mud mixture at a mass ratio of 1:1 with a sodium bicarbonate solution at 260°C was investigated. It was established that significant mineralogical transformations occur during activation, accompanied by the formation of secondary phases, including approximately 19 wt.% cancrinite and 2.8 wt.% boehmite, indicating partial recrystallization of the initial aluminosilicates. For further processing of the activated material, a two-stage alkaline leaching scheme with calcium addition was proposed, providing selective potassium removal at the first stage and intensive aluminum extraction at the second stage. The mineralogical transformations were shown to enhance the reactivity of the material and alter the distribution of major components between the solid and liquid phases. The achieved alumina extraction rate reached 92-94%, while potassium removal attained 82-87%. The obtained results confirm the close relationship between phase transformations and the efficiency of valuable component recovery, providing a scientific basis for improving technologies for the integrated production of alumina from complex aluminosilicate materials and industrial wastes.

Key words: *carbonate-hydrothermal activation; phase transformations; alkaline leaching; alumina recovery; potassium removal; nepheline ore; red mud; cancrinite.*

Сведения об авторах

Назым Канатовна Ахмадиева* – ассоциированный профессор, Институт металлургии и обогащения, г. Алматы, Казахстан; e-mail: akhmadiyeva141@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3154-9816.

Еркежан Баймуратовна Абикак – PhD, Институт металлургии и обогащения, г. Алматы, Казахстан; e-mail: abikak.erkezhan@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8705-4092.

Нурила Муратовна Бурабаева – ассоциированный профессор, Институт металлургии и обогащения, г. Алматы, Казахстан; e-mail: nuri_eng@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2183-2239.

Таңшолпан Қазыбекқызы Сағынтаева – младший научный сотрудник, Институт металлургии и обогащения, г. Алматы, Казахстан; e-mail: tsagyntayeva00@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-5922-4172.

Нуржан Оракбай – «Металлургия және кен байыту институты» инженері, Алматы қ., Қазақстан, докторант, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан; e-mail: n.orakbay@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-6043-0936.

Авторлар туралы мәліметтер

Назым Канатовна Ахмадиева* – қауымдастырылған профессор, Металлургия және кен байыту институты, Алматы қ., Қазақстан; e-mail: akhmadiyeva141@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3154-9816.

Еркежан Баймұратқызы Абиқақ – PhD, Металлургия және кен байыту институты, Алматы қ., Қазақстан; e-mail: abikak.erkezhan@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8705-4092.

Нурила Муратовна Бурабаева – қауымдастырылған профессор, Металлургия және кен байыту институты, Алматы қ., Қазақстан; e-mail: nuri_eng@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2183-2239.

Таншолпан Казыбеккызы Сагынтаева – младший научный сотрудник, магистр, Институт металлургии и обогащения, г. Алматы, Казахстан; e-mail: tsagyntayeva00@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-5922-4172.

Нұржан Орақбай – инженер, Институт металлургии и обогащения, г. Алматы, Казахстан, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті докторанты, Өскемен қ., Қазақстан; e-mail: n.orakbay@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-6043-0936.

Information about the authors

Nazym Kanatovna Akhmadiyeva* – Associate Professor, Institute of Metallurgy and Ore Beneficiation, Almaty, Kazakhstan; e-mail: akhmadiyeva141@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3154-9816.

Yerkezhan Baimuratovna Abikak – phD, Institute of Metallurgy and Ore Beneficiation, Almaty, Kazakhstan; e-mail: abikak.erkezhan@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8705-4092.

Nurila Muratovna Burabayeva – Associate Professor, Institute of Metallurgy and Ore Beneficiation, Almaty, Kazakhstan; e-mail: nuri_eng@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2183-2239.

Tangsholpan Kazybekkyzy Sagyntayeva – junior researcher, master degree, Institute of Metallurgy and Ore Beneficiation, Almaty, Kazakhstan; e-mail: tsagyntayeva00@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-5922-4172.

Nurzhan Orakbay – Engineer of Institute of Metallurgy and Ore Beneficiation, Almaty, Kazakhstan, Doctoral student of D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; e-mail: n.orakbay@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-6043-0936.

Поступила в редакцию 05.06.2026
Поступила после доработки 20.08.2026
Принята к публикации 24.08.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-85

ҒТАХР: 61.31.43

Д. Мұқталы[1,2*], Б.Х. Мусабаева[3], А. Батқал[1], Қ. Қамұнұр[1], А. Абылайхан[2]
[1]Жану проблемалары институты,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Бөгенбай батыр көшесі, 172
[2]Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,
Жаңа химиялық технологиялар мен материалдар ғылыми-зерттеу институты,
050040, Қазақстан Республикасы, Алматы қаласы, Әл-Фараби даңғылы, 71
[3]Астана халықаралық университеті,
Қазақстан Республикасы, Астана қаласы, Қабанбай батыр даңғылы, 8
*e-mail: dinara.muktaly@mail.ru

МЕХАНОХИМИЯЛЫҚ ЖӘНЕ ӨЗДІГІНЕН ТАРАЛАТЫН ЖОҒАРЫ ТЕМПЕРАТУРАЛЫҚ СИНТЕЗ КЕЗІНДЕ БОР КАРБИДІНІҢ ТҮЗІЛУ ЕРЕКШЕЛІКТЕРІ

Аңдатпа: *B_2O_3–Al–C және B_2O_3–Mg–C жүйелерінде механохимиялық және өздігінен таралатын жоғары температуралық синтез (ӨЖС) кезінде бор карбидінің түзілу заңдылықтары зерттелді. B_2O_3–Al–C жүйесін механохимиялық өңдеу планетарлық шарлы диірменде 350–500 айн/мин айналу жылдамдығында, 30–90 мин өңдеу ұзақтығында және шарлар массасының ұнтақ шихта массасына қатынасы (BPR) 10-30 болған жағдайда жүргізілді. Механикалық активтендіру ұнтақ қоспасының ұсақталуы және құрылымдануымен, сондай-ақ бороалюминаттық, оксидтік және карбидтік фазалардың түзілуімен жүретін қатты фазалық түрленулердің дамуымен қатар жүретіні анықталды. 450 айн/мин, 30 мин және BPR = 20 режимінде алынған өнімде рентгендік фазалық талдау арқылы $Al_{12}B_6O_{36}$, Al_2O_3, қалдық Al және алюминий-көміртекті фазамен қатар B_4C фазасы анықталды.*

©Д. Мұқталы, Б.Х. Мусабаева, А. Батқал, Қ. Қамұнұр, А. Абылайхан, 2026

ӨЖС кезінде тотықсыздандырғыш металдың табиғаты жану параметрлері мен фазатүзілуге елеулі әсер ететіні анықталды. B_2O_3–Al–C жүйесі үшін фронт температурасы 2640-2750 °C, таралу жылдамдығы 6,0-8,9 мм/с болды, ал B_2O_3–Mg–C жүйесінде температура шамамен 3000 °C-қа, фронт жылдамдығы 10,9 мм/с-қа дейін жетті. Зерттелген өнімдердегі B_4C-тың ең жоғары мөлшері алюмотермиялық жүйе үшін 4 масс. %, магнийтермиялық жүйе үшін 5 масс. % құрады. ӨЖС өнімдерінде B_4C-пен қатар құрамы тотықсыздандырғыш табиғатына тәуелді оксидтік және бораттық фазалар түзіледі. Көпкомпонентті өнімдерден бор карбидін селективті химиялық өңдеу арқылы кейіннен бөліп алу мүмкіндігі көрсетілді. Алынған нәтижелер B_4C-құрамды материалдарды бағытталған түрде қалыптастыру үшін механикалық активтендіру мен металлотермиялық ӨЖС-ті үйлестірудің перспективалылығын көрсетеді.

Түйін сөздер: *бор карбиді, механохимиялық синтез, механикалық активтендіру, өздігінен таралатын жоғары температуралық синтез, алюмотермия, магниетермия, фазатүзілу.*

Кіріспе

Бор карбиді (B_4C) жоғары қаттылық, төмен тығыздық, химиялық тұрақтылық, тозуға төзімділік және нейтрондарды жұту қабілеті сияқты қасиеттердің үйлесімімен сипатталатын перспективалы оксидсіз керамикалық материалдардың бірі болып табылады. Осы қасиеттері оның конструкциялық керамикада, аэроғарыштық техникада және атом энергетикасында кеңінен қолданылуын қамтамасыз етеді [1-3].

B_4C алудың дәстүрлі әдісі негізінен борқұрамды қосылыстарды жоғары температурада карботермиялық тотықсыздандыруға негізделген. Бұл тәсілдің негізгі шектеулеріне процестің жоғары температурада жүргізілуі, энергия шығындарының көп болуы, бордың жоғалуы, сондай-ақ алынған өнімді кейіннен ұсақтау және тазарту қажеттілігі жатады. Осыған байланысты сыртқы энергия шығындарын төмендетуге және бастапқы компоненттердің реакциялық қабілетін арттыруға мүмкіндік беретін балама әдістер айтарлықтай қызығушылық тудырады [4-5].

Перспективалы тәсілдердің бірі – бор оксидін металлотермиялық тотықсыздандыруды қолдану. Мұндай жүйелерде металл тотықсыздандырғыш екі қызмет атқарады: B_2O_3-ті элементтік борға дейін тотықсыздандырады және түзілген бордың көміртекпен кейінгі әрекеттесуіне қажетті жылудың бөлінуіне ықпал етеді. Тотықсыздандырғыш ретінде алюминий мен магний қолданылуы мүмкін, алайда олардың химиялық белсенділігі мен реакциялардың жылулық әсерлеріндегі айырмашылықтар соңғы өнімдердің әртүрлі сипатта түзілуіне әкеледі [6-7].

Бастапқы шихтаның реакциялық қабілетін басқарудың қосымша мүмкіндіктерін механикалық активтендіру ашады [8-10]. Қарқынды ұнтақтау бөлшектер өлшемінің кішіреюімен, кристалдық құрылым ақауларының түзілуімен, фазаралық жанасу ауданының ұлғаюымен және жоғары белсенді реакциялық аймақтардың қалыптасуымен қатар жүреді. Нәтижесінде механикалық энергия компоненттердің диспергирленуін ғана емес, қатты фазалық химиялық түрленулердің басталуын да қамтамасыз ете алады. B_2O_3–Al–C жүйесі үшін бұл тәсіл ерекше қызығушылық тудырады, өйткені бор оксидінің тотықсыздануы және түзілген бордың көміртекпен әрекеттесуі тікелей механикалық өңдеу барысында жүруі ықтимал.

Энергия тиімді әдістердің тағы бірі – экзотермиялық реакциялардың ішкі жылулық әсерін пайдалануға негізделген ӨЖС [11-15]. Жергілікті инициирлеуден кейін реакциялық аймақ бастапқы шихта көлемі бойынша өздігінен таралады, соның арқасында материалдың бүкіл көлемін ұзақ уақыт сырттан қыздыру қажеттілігі болмайды. B_2O_3–Al–C және B_2O_3–Mg–C жүйелері үшін процесс бор ангидридін металлотермиялық тотықсыздандыру мен тотықсызданған бордың көміртекпен кейінгі әрекеттесуінің жиынтығы болып табылады. Сонымен қатар, металлотермиялық процесс барысында бірфазалы B_4C-ты тікелей алу оксидтік және бораттық қосылыстардың бәсекелес түзілуімен күрделенеді. Сондықтан энергетикалық әсер ету тәсілі, тотықсыздандырғыш табиғаты, процесс параметрлері және түзілетін өнімнің фазалық құрамы арасындағы өзара байланысты анықтау маңызды ғылыми міндет болып табылады.

Осы жұмыстың мақсаты – B_2O_3–Al–C және B_2O_3–Mg–C жүйелерінде механохимиялық және ӨЖС кезінде бор карбидінің түзілу заңдылықтарын зерттеу, сондай-ақ процесс жағдайларының жану сипаттамалары мен алынатын өнімдердің фазалық құрамына әсерін бағалау.

Материалдар мен әдістер

Бастапқы компоненттер ретінде бор оксиді B_2O_3, металл алюминий мен магний ұнтақтары және көміртек қолданылды. Механохимиялық синтез үшін үшкомпонентті B_2O_3–Al–C жүйесі пайдаланылды. Алюминий B_2O_3 тотықсыздандырғышы қызметін атқарды, ал көміртек карбид түзуші компонент болды. Бастапқы эксперименттік деректер бойынша шихта массасы 10 г құрады: 5,52 г B_2O_3, 3,38 г Al және 1,10 г техникалық көміртек.

Механохимиялық өңдеу болат ұнтақтау камерасы және болат шарлары бар планетарлық шарлы диірменде жүргізілді. Өзгермелі параметрлер ретінде планетарлық дискінің айналу жылдамдығы, өңдеу ұзақтығы және шарлар массасының ұнтақ массасына қатынасы (BPR) алынды.

ӨЖС үшін бастапқы реагенттер ретінде жоғары тазалықтағы B_2O_3 (≥99 %), дисперстілігі <100 мкм металл Al немесе Mg ұнтақтары, сондай-ақ ұсақ дисперсті графит түріндегі көміртек қолданылды. Компоненттер біртекті қоспа алынғанша 20-30 мин араластырылды, содан кейін 100 МПа қысымда диаметрі шамамен 20 мм және биіктігі 40-45 мм цилиндрлік үлгілер қалыпталды.

Реакцияны жүргізу үшін ӨЖС-ті инициирлеуге арналған ықшам қондырғы болып табылатын арнайы жасалған зертханалық мини-реактор қолданылды (1-сурет). Құрылғы металл негіз-тұғырдан, керамикалық тигельден, контактілі қысқыштардан және трансформатор түріндегі ток көзінен тұрды.



Сурет 1 – ӨЖС процесін жүргізуге арналған зертханалық қондырғының сызбасы

Престелген үлгілер тигельдің ішіне орналастырылып, одан кейін контактілерге трансформатордан электр сымы жалғанды. Реакция қоспаның жергілікті қызуы мен тұтануын туғызатын қысқа мерзімді электр импульсін беру арқылы инициирленді. Тұтанғаннан кейін реакция фронты үлгінің бүкіл көлемі бойынша таралып, қарқынды жарқырау және жылу бөлінуімен жүрді. Реакция аяқталған соң тигель табиғи түрде салқындатылып, өнім кейінгі талдау үшін алынды.

Ұсынылған қондырғы B_2O_3–Al–C және B_2O_3–Mg–C жүйелеріндегі ӨЖС процесін зертханалық жағдайда инициирлеуге және металлотермиялық тотықсыздану мен карбид түзілу процестерінің жүруін зерттеуге мүмкіндік береді.

Нәтижелер және талқылаулар

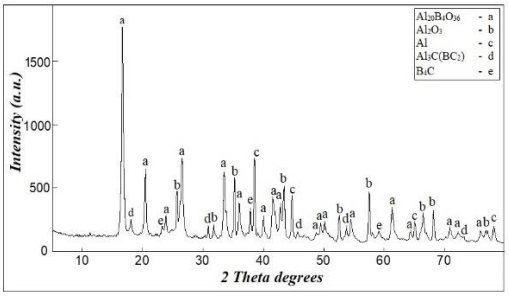
Механикалық активтендіру жағдайларының B_2O_3–Al–C жүйесіндегі өнімдердің түзілуіне әсері

Механикалық әсер қарқындылығының қатты фазалық түрленулерге ықпалын анықтау үшін механикалық өңдеудің алты режимі зерттелді. Планетарлық дискінің айналу жылдамдығы 350-ден 500 айн/мин-ге дейін, өңдеу ұзақтығы 30-дан 90 мин-ге дейін, ал шарлар массасының ұнтақ шихта массасына қатынасы (BPR) 10-нан 30-ға дейін өзгертілді. Эксперименттік жағдайлар 1-кестеде келтірілген.

Кесте 1 – B_2O_3–Al–C қоспасын механикалық активтендіру режимдері

№	Планетарлық дискінің айналу жылдамдығы, айн/мин	Уақыт, мин	BPR
1	350	30	10
2	350	60	20
3	450	30	20
4	450	60	20
5	450	90	20
6	500	60	30

2-суретте № 3 тәжірибе режимінде алынған механосинтез өнімдерінің дифрактограммасы келтірілген.

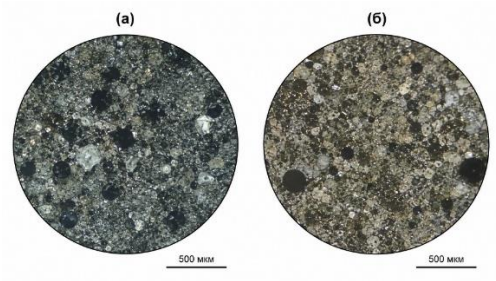


Сурет 2 – B_2O_3–Al–C жүйесіндегі механосинтез өнімдерінің дифрактограммасы

Планетарлық дискінің айналу жылдамдығы – 450 айн/мин, уақыт – 30 мин, BPR – 20.

Қарқынды шыңдардың негізгі бөлігі фазалық құрамда басым болатын және ауа оттегінің қатысуымен B_2O_3-тің алюминиймен әрекеттесуі нәтижесінде түзілетін $Al_{12}B_6O_{36}$ қосылысына («a» индексі) жатады. «b» деп белгіленген қосымша рефлекстер Al_2O_3 алюминий оксидіне тиесілі; бұл фазаның болуы ұнтақтау кезінде алюминийдің бір бөлігінің тотығуымен байланысты. «c» индексі бар сызықтар қоспада реакцияға түспеген күйде сақталған металл алюминийге сәйкес келеді. «d» деп белгіленген шыңдар механикалық әсер жағдайында көміртектің алюминиймен әрекеттесуі нәтижесінде түзілетін Al_4C_3 (немесе қабылданған белгілеуде $Al_4C(BC_2)$) қосылысына жатады. 2θ ≈ 36–38° және 2θ ≈ 45–47° аймақтарында B_4C фазасына тиесілі «e» индексімен белгіленген әлсіз шыңдар байқалады. Олардың төмен қарқындылығы осы жағдайларда бор карбидінің түзілуі шектеулі және тек ішінара жүретінін көрсетеді.

3-суретте B_2O_3–Al–C қоспасының әртүрлі өңдеу режимдерінде алынған механосинтез өнімдерінің оптикалық микрофотографиялары көрсетілген. 3а-суреттегі құрылым ішінара ұсақталған B_2O_3-ке сәйкес келетін ірі ашық түсті фрагменттердің және аз мөлшердегі қара түсті қосындылардың болуымен сипатталады.



а – 1 режим б – 2 режим

Сурет 3 – B_2O_3–Al–C қоспасын әртүрлі режимдерде механикалық активтендіру өнімдерінің оптикалық микрофотографиялары

Ірі шынытәрізді және әлсіз диспергирленген бөлшектердің басым болуы осы режимде қоспаның механикалық активтену дәрежесінің төмен екенін көрсетеді. 3б-суретте неғұрлым қарқынды механикалық өңдеу кезінде түзілетін алюминийқұрамды және оксоборидтік фазаларға сәйкес келетін ұсақ дисперсті түйіршіктер мен қара түсті тығыз агломераттар басым. Бастапқы B_2O_3-тің ірі фрагменттері іс жүзінде байқалмайды, бұл ұсақталу деңгейінің жоғары және реакциялық аймақтардың жақсы дамығанын көрсетеді. Екі үлгі арасындағы морфологиялық айырмашылықтар таңдалған режимдердің энергия жүктемесіне сәйкес келеді және негізінен механикалық ұсақтаудан механикалық активтендірілген қатты фазалық әрекеттесу өнімдерінің түзілуіне өтуді көрсетеді.

B_2O_3–Al–C қоспасын ауа атмосферасында механосинтездеу барысында өнімнің фазалық құрамында көрініс табатын бірқатар қатты фазалық түрленулер жүреді. Алғашқы процесс – бор оксидінің алюминиймен тотықсыздануы нәтижесінде Al_2O_3 және бос бордың түзілуі. Түзілген бор көміртекпен ішінара әрекеттесіп, аз мөлшерде бор карбидін түзеді, бұл рентгенограммадағы B_4C-тың әлсіз рефлекстеріне сәйкес келеді.

Сонымен қатар алюминий көміртекпен әрекеттесіп, алюминий карбидін түзеді. Ауада ұнтақтау жағдайында алюминийдің бір бөлігі оттекпен қосымша тотығып, Al_2O_3 үлесінің артуына әкеледі. Бір мезгілде B_2O_3 және Al_2O_3-тің бір бөлігі $Al_{12}B_6O_{36}$ бороалюминаттық фазасына өтеді, бұл оның механосинтез өнімдері арасында басым болуын түсіндіреді.

Синтез өнімдерінен бор карбидін бөліп алу үшін сілтілік еріту қолданылды. B_4C–Al–Al_2O_3–бороалюминаттар қоспасы 80-100 °C температурада 4–8 М NaOH ерітіндісінде ұсталды. Алюминаттық және бороалюминаттық фазалар $[Al(OH)_4]^-$ кешенді алюминаттары және борат-алюминат аниондары түрінде ерітіндіге өтті. Металл алюминий сутек бөле отырып сілтіде толық еріді. Ерімейтін қалдық тазартылған бор карбидінен тұрды. Сүзуден кейін материал сілті толық жойылғанша бірнеше рет сумен жуылып, кептірілді. Химиялық шаймалау B_4C-ты Mg-, Al-құрамды және бораттық жанама фазалардан бөліп алуды қамтамасыз етті. Осылайша, зертханалық масштабтағы механосинтез дәстүрлі жоғары температуралық процеске қарағанда шамамен 6-8 есе аз сыртқы энергия шығынын талап етеді.

Тотықсыздандырғыштың ӨЖС сипаттамаларына әсері

Алюмотермиялық және магнийтермиялық жүйелер арасында фронттың температурасы мен таралу жылдамдығы бойынша елеулі айырмашылықтар байқалды.

Жанудың тұрақтылығы, ең жоғары температура және фронт жылдамдығы стехиометрия мен тотықсыздандырғыш мөлшеріне тәуелді. Алюмотермиялық жүйеде фронт температурасы 2640-2750°C, ал жылдамдығы 6,0-8,9 мм/с болды. Магнийтермиялық жүйеде температура жоғарырақ болып, 3000 °C-қа дейін, ал жылдамдық 10,7-10,9 мм/с-қа дейін жетті. Тотықсыздандырғыш (Al немесе Mg) мөлшерін арттыру B_4C шығымының ұлғаюына және B_2O_3 толық тотықсызданбағанда түзілетін оксидті-бораттық фазалар мөлшерінің азаюына әкелді (2-кесте).

Кесте 2 – Al және Mg жүйелеріндегі ӨЖС-тің салыстырмалы сипаттамасы

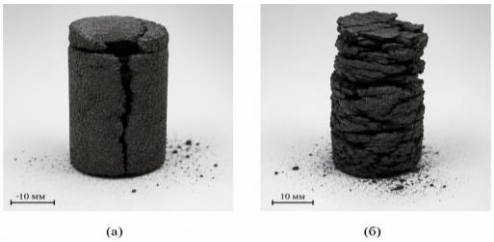
Параметр	B_2O_3–Al–C	B_2O_3–Mg–C
Фронт температурасы, °C	2640-2750	2890–≈3000
Фронт жылдамдығы, мм/с	6,0-8,9	7,5-10,9
Негізгі жанама өнімдер	Al_2O_3, бораты Al	MgO, бораты Mg
Зерттелген үлгілердегі B_4C-тың ең жоғары мөлшері, масс. %	4	5

Кестеден магнийтермиялық тотықсыздану фронттың неғұрлым жоғары температурасы мен жылдамдығын қамтамасыз ететіні көрінеді. Бұл Al_2O_3-пен салыстырғанда MgO түзілуінің экзотермиялық әсерінің жоғары болуымен байланысты. Алюмотермиялық жүйеде процесс жұмсағырақ жүреді, бірақ B_4C–Al_2O_3 композициялық материалдарын алуға ықпал ететін тығыз Al_2O_3 матрицасын қалыптастырады.

4-суретте алюмотермиялық және магнийтермиялық жүйелерде алынған бор карбидінің ӨЖС-синтез өнімдері көрсетілген.

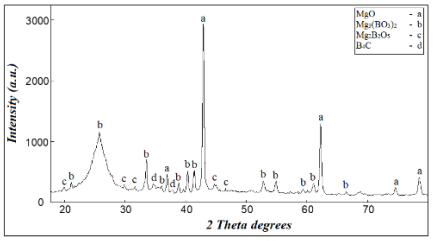
Алюмотермиялық әдіспен синтезделген үлгі айқын шөгу жарықшақтарымен және цилиндрлік пішіннің ішінара бұзылуымен сипатталады. Мұндай морфология тығыз Al_2O_3 оксидтік фазасының түзілуімен және дайындама көлеміндегі елеулі температуралық градиенттермен байланысты. Салқындау кезінде ішкі кернеулер пайда болып, фрагменттердің жарылуы мен қабаттануына әкеледі. Жалпы құрылым ұсақ қабатталған аймақтарсыз, ірі блокты күйде қалады.

Оған қарағанда магнийтермиялық синтез өнімі айқынырақ қабатты-пластинкалы құрылымға ие. Үлгінің жұқа көлденең қабаттарға сегменттелуі реакцияның жоғары экзотермиялылығымен және MgO түзілу кезіндегі қарқынды газ бөлінуімен байланысты.

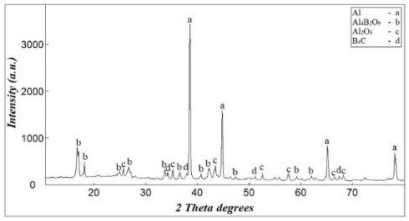


Сурет 4 – Алюмотермиялық және магнийтермиялық әдістермен алынған бор карбиді синтезінің өнімдері: а – алюмотермиядан кейінгі үлгі; б – магнийтермиядан кейінгі үлгі

Фронт температурасының жоғары болуына (3000 °С-қа дейін) және MgO тығыздығының төмендігіне байланысты материал неғұрлым кеуекті болып қалыптасады және қабат бойымен ажырауға бейім келеді. Бұл ретте цилиндрлік пішін алюмотермиялық нұсқамен салыстырғанда жақсырақ сақталады, алайда құрылымның монолиттілігі төмен. 5-суретте B_2O_3–Mg(25%)–C (А) және B_2O_3–Al(40,5%)–C (Б) жүйелеріндегі ӨЖС өнімдерінің дифрактограммалары көрсетілген.



А



Б

Сурет 5 – B_2O_3–Mg(25%)–C (А) және B_2O_3–Al(40,5%)–C (Б) жүйелеріндегі ӨЖС өнімдерінің рентгендік дифрактограммалары

5-суретте магнийтермиялық B_2O_3–Mg(25%)–C және алюмотермиялық B_2O_3–Al(40,5%)–C жүйелерінде алынған ӨЖС өнімдерінің рентгендік дифрактограммалары көрсетілген. Фазалық құрамды салыстыру тотықсыздандырғыш табиғатының жоғары температуралық синтез өнімдеріне елеулі әсерін көрсетеді. Магнийтермиялық жүйеде 2θ ≈ 37°, 43° және 62° аймақтарындағы қарқынды рефлекстермен сипатталатын MgO басым фаза болып табылады. Онымен қатар магний бораттары және 2θ ≈ 38-40° аймағында мақсатты B_4C фазасының әлсіз рефлекстері тіркеледі. MgO мен магнийқұрамды бораттардың болуы B_2O_3-тің металлотермиялық тотықсыздануының аралық оттекқұрамды қосылыстардың бір мезгілде түзілуімен қарқынды жүретінін көрсетеді.

Алюмотермиялық жүйе үшін қалдық металл Al рефлекстерінің басым болуы тән, бұл оның бастапқы шихтадағы артық мөлшерімен және реакция барысында толық жұмсалмауымен байланысты. Фазалық құрамда $Al_4B_2O_9$ бороалюминаты және Al_2O_3 да кездеседі. Магнийтермиялық өнімдегідей, B_4C түзілуі 2θ ≈ 37-40° аралығындағы төмен қарқынды рефлекстермен расталады. Осылайша, зерттелген екі жүйеде де бор карбиді негізінен оксидтік және бораттық қосылыстар түзілуі аясында минорлық фаза ретінде қалыптасады. Mg қолдану MgO және магнийқұрамды бораттардың түзілуіне ықпал етсе, Al қолдану алюминийқұрамды оксидті-бораттық фазалардың түзілуіне және тотықсыздандырғыштың бір бөлігінің реакцияға түспей сақталуына әкеледі. Алынған нәтижелер тотықсыздандырғыш металдың табиғаты мен мөлшері бор карбидінің ӨЖС кезіндегі фазатүзілу бағытын анықтайтын маңызды факторлар екенін растайды.

Жалпы алғанда, өнімдердің фазалық құрамы тотықсыздандырғыш мөлшеріне тәуелді болды (3-кесте). Al немесе Mg жеткілікті болғанда үлгілерде мақсатты B_4C фазасы анықталды, ал тотықсыздандырғыш тапшылығында алюминий немесе магний оксидтері және сәйкес бораттық қосылыстар түзілді. Магнийтермиялық жүйеде $Mg_2B_2O_5$ және $Mg_3B_2O_6$, ал алюмотермиялық жүйеде $Al_4B_2O_9$ және $Al_{20}B_4O_{36}$ фазалары анықталды. Тотықсыздандырғыш үлесі артқан сайын B_4C-тың массалық үлесі ұлғайды.

Екі жүйені салыстыру B_4C түзілуі екі реакцияда да тотықсыздандырғыштың артық мөлшерін қажет ететінін көрсетеді. Al немесе Mg мөлшері 20 %-дан төмен болғанда бор оксидінің тотықсызданууы толық жүрмей, бораттық фазалар түзіледі.

Кесте 3 – B_4C-құрамды ӨЖС өнімдерінің фазалық құрамы

Жүйе	Үлгі	Негізгі фаза, масс. %	Негізгі ілеспе фазалар, масс. %	B_4C, масс. %
B_2O_3–Al–C	Al-1	$Al_{20}B_4O_{36}$ – 60	Al_2O_3 – 26; Al – 8	2
B_2O_3–Al–C	Al-2	Al – 41	$Al_4B_2O_9$ – 38; Al_2O_3 – 17	4
B_2O_3–Mg–C	Mg-1	MgO – 65	$Mg_3B_2O_6$ – 28; $Mg_2B_2O_5$ – 5	2
B_2O_3–Mg–C	Mg-2	MgO – 83	$Mg_3B_2O_6$ – 14	3
B_2O_3–Mg–C	Mg-3	MgO – 89	$Mg_3B_2O_6$ – 6	5

Осылайша, ӨЖС нәтижесінде алынған материалдар көпкомпонентті керамикалық композиттер болып табылады. Фазалық талдау B_4C функционалдық фазалардың бірі ретінде түзілетінін, ал негізгі матрицаны жоғары температуралық оксидтер мен тотықсыздандырғыштың бораттық қосылыстары құрайтынын көрсетті. Магнийтермиялық жүйеде аз мөлшердегі B_4C қатысында MgO, $Mg_3(BO_3)_2$ және $Mg_2B_2O_5$ басым, бұл B_4C–MgO–Mg-борат типті композицияға сәйкес келеді. Алюмотермиялық жүйеде негізгі фазалар Al_2O_3, $Al_4B_2O_9$ және $Al_{20}B_4O_{36}$, ал бор карбиді минорлық фаза түрінде болады.

ӨЖС-синтезінің көпкомпонентті өнімдерінен таза B_4C карбидтік фазасын алу үшін B_4C-тың минералдық қышқылдар мен сілтілерде іс жүзінде ерімеуіне негізделген селективті химиялық тазарту қолданылды. B_2O_3–Mg–C жүйесінің реакциялық өнімдерінде MgO, $Mg_3(BO_3)_2$, $Mg_2B_2O_5$ және аз мөлшерде B_4C, ал B_2O_3–Al–C жүйесінің өнімдерінде Al_2O_3, бороалюминаттар және қалдық Al болды. Бұл ілеспе фазалардың барлығы қышқылдарда немесе сілтілерде жақсы ериді, ал B_4C қатты қалдықта қалады. Магнийтермиялық өнімдер үшін қышқылдық шаймалау қолданылды. Ұсақталған материал 70–90 °C температурада 10–20%-дық HCl ерітіндісімен өңделді. MgO және магний бораттары Mg^{2+} және бор қышқылын түзе отырып ерітіндіге өтті. B_4C ерімейтін қалдық түрінде сақталды. Сүзу және жуудан кейін Mg-құрамды фазаларды толық жою үшін қышқылмен өңдеу циклі қайталанды. Тазартылған қалдық бейтарап pH-қа дейін жуылып, 100–120 °C-та кептірілді. Алюмотермиялық өнімдер үшін таза бор карбидін бөліп алу сызбасы механохимиялық синтездегідей болды.

ҚОРЫТЫНДЫ

Жұмыста B_2O_3–Al–C және B_2O_3–Mg–C жүйелерінде механохимиялық және өздігінен таралатын жоғары температуралық синтез кезінде бор карбидінің түзілу ерекшеліктері зерттелді. Алынған эксперименттік нәтижелер негізінде келесі қорытындылар жасалды.

B_2O_3–Al–C жүйесін механикалық активтендіру компоненттердің қатты фазалық әрекеттесуінің дамуына ықпал етеді. Планетарлық дискінің айналу жылдамдығын 350-500 айн/мин, өңдеу ұзақтығын 30-90 мин және BPR мәнін 10–30 аралығында өзгерткенде өнімдердің дисперстілігі мен морфологиясында айқын өзгерістер байқалады. Өңдеу қарқындылығы артқан сайын ірі, әлсіз диспергирленген бөлшектердің мөлшері азайып, ұсақ дисперсті түйіршіктер мен агломераттардың үлесі артады, бұл фазаралық әрекеттесудің дамуын көрсетеді.

B_4C түзілуі механохимиялық өңдеу барысында-ақ жүреді. 450 айн/мин, 30 мин және BPR = 20 режимінде дифрактограммада $2\theta \approx 36–38°$ және 45-47° аймақтарында B_4C-тың әлсіз рефлекстері тіркелді. Бір мезгілде $Al_{12}B_6O_{36}$, Al_2O_3 және алюминий-көміртекті фаза түзіледі, ал металл Al-дың бір бөлігі реакцияға түспеген күйде сақталады. Бұл ауада механикалық активтендіру кезінде тотықсыздану, тотығу, борат және карбид түзілу процестерінің бәсекелес сипатта жүретінін көрсетеді.

Тотықсыздандырғыш металдың табиғаты ӨЖС параметрлеріне елеулі әсер етеді. Магнийтермиялық процесс алюмотермиялық процеске қарағанда жоғары температурамен және реакциялық фронттың жоғары таралу жылдамдығымен сипатталады. B_2O_3–Mg–C жүйесінде температура шамамен 3000 °C-қа, жылдамдық 10,9 мм/с-қа дейін жетеді, ал B_2O_3–Al–C үшін сәйкес көрсеткіштер 2640-2750 °C және 6,0-8,9 мм/с құрайды.

Рентгендік фазалық талдау екі металлотермиялық жүйеде де B_4C түзілетінін растады, алайда мақсатты карбид басым фаза болып табылмайды. Магнийтермиялық өнімдерде MgO және магнийқұрамды бораттық қосылыстар басым, ал алюмотермиялық жүйеге Al_2O_3 және бороалюминаттық фазалардың түзілуі әрі реакцияға түспеген Al-дың бір бөлігінің сақталуы тән. B_4C-тың ең жоғары массалық үлесі Mg-жүйесінде 5 %, Al-жүйесінде 4 % болды.

Өнімдердің морфологиясы да тотықсыздандырғыш табиғатымен анықталады. Алюмотермиялық өнім айқын жарықшақтылықпен және салыстырмалы ірі блокты құрылыммен сипатталса, магнийтермиялық үлгі неғұрлым дамыған қабатты-пластинкалы және кеуекті құрылымға ие.

B_4C-тың фазалық тазалығын арттыру үшін синтезден кейінгі химиялық өңдеу қажет. Ілеспе Mg-құрамды фазалар қышқылдық шаймалау арқылы жойылады, ал Al-құрамды өнімдер үшін бор карбидін реакциялық массаның еритін компоненттерінен бөлуге мүмкіндік беретін сілтілік өңдеу қарастырылған.

Әдебиеттер тізімі

1. Effects of boron oxide composition, structure, and morphology on B_4C formation via the SHS process in the B_2O_3–Mg–C ternary system / S. Aghili et al // Ceramics International. – 2020. – Vol. 46. – P. 7223-7234. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.11.217.
2. Novel Pathway for the Combustion Synthesis and Consolidation of Boron Carbide / M.K. Zakaryan et al // Materials. – 2022. – Vol. 15. – P. 5042. https://doi.org/10.3390/ma15145042.
3. Influence of Sintering Process Conditions on Microstructural and Mechanical Properties of Boron Carbide Ceramics Synthesized by Spark Plasma Sintering / Y. Liu et al // Materials. – 2021. – № 14. – P. 1100. https://doi.org/10.3390/ma14051100.
4. Avcioglu S. Effect of elemental nano boron on the transformation and morphology of boron carbide (B4C) powders synthesized from polymeric precursors / S. Avcioglu, F. Kaya, C. Kaya // Ceram. Int. – 2020. – № 46. – P. 17938-17950. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.04.104.
5. Construction of a Novel Barium-Free Green-Light Emitting Illuminant Based on Boron Carbide / Z. Huang et al // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. – 2021. – Т. 46, № 9. – P. 1480-1488. https://doi.org/10.1002/prep.202100038.
6. Walters I.T. Environmentally friendly boron-based pyrotechnic delays: an additive manufacturing approach / I.T. Walters, L.J. Groven // ACS Sustainable Chemistry & Engineering. – 2019. – Т. 7, № 4. – P. 4360-4367. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b06204.
7. Horiuchi K. Reactivity of boron carbide and metal oxide mixtures / K. Horiuchi, A. Huynh, J. Kalman // Proceedings of the Combustion Institute. – 2023. – Т. 39, № 3. – P. 3313-3321. https://doi.org/10.1016/j.proci.2022.07.107.
8. Yaghoubi M. Effect of the magnesium content on the mechanochemical behavior in ternary system Mg–B2O3–C / M. Yaghoubi, O. Torabi // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2014. – P. 132-140. https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2013.11.014.
9. Combustion and Radiation Properties of B4C/PTFE Based Pyrolants Under the Influence of Various Oxidants / B. Zhou et al //Combustion Science and Technology. – 2025. – P. 1-23. https://doi.org/10.1080/00102202.2025.2536218.
10. Boron Carbide Composites Produced by Self-Propagating High-Temperature Synthesis / R.G. Abdulkarimova et al // Revista Ingeniería UC. – 2021. – Vol. 28, № 1. https://doi.org/10.54139/revinguc.v28i1.5.
11. Influences of mechanical activation and tartaric acid addition on the efficiency of B_4C synthesis / S.F. Feiz et al // Synthesis and Sintering. – 2023. – Vol. 3. – P. 54-59. https://doi.org/10.53063/synsint.2023.31140.
12. Influence of Kinetic Factors on Preparation of Boron Carbide by Magnesiothermic Self-Propagation Synthesis / H. Shi et al // J. Cent. South Univ. – 2023. – № 30. – P. 735-748. https://journal.hep.com.cn/jocsu/EN/10.1007/s11771-023-5264-1.
13. Wang Self-propagating high-temperature synthesis of B4C: integrating combustion wave features and crystallization kinetics / Wang, D. Zhihe, Zh. Tingan // Ceramics International. – 2025. – Issue 30. – P. 65856-65870. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.11.265.
14. The synthesis and characterization of B6O, B4C and ZrB2 at a pressure of 6 GPa / D. Chu et al // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2025. – P. 107070. https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2025.107070.
15. Wang C. Effect of carbon sources on morphology of B4C powders synthesized by magnesiothermic SHS / C. Wang, Zh. Dou, T. Zhang // Powder Technology. – 2026. – P. 122524. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2026.122524.

Қаржыландыру

Жұмыс BR28712843 «Технологиялық жағуда, пиротехникалық құрамдарда және аэрозольдық композицияларды бүркемелеуде қолдану үшін екіншілік алюминий қорытпалары мен металл-органикалық материалдар негізінде көп компонентті жүйелердің технологияларын әзірлеу және сынау» жоба аясында орындалды.

Д. Мұқталы[1,2*], Б.Х. Мусабаева[3], А. Батқал[1], Қ. Қамұнұр[1], А. Абылайхан[2]
[1]Институт проблем горения, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Богенбай батыра, 172
[2]Научно-исследовательский институт новых химических технологий и материалов
КазНУ имени аль-Фараби, 050040, Республика Казахстан, Алматы, пр. Аль-Фараби, 71
[3]Международный университет Астана,
Республика Казахстан, г. Астана, проспект Кабанбай батыра, 8
*e-mail:dinara.muktaly@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ КАРБИДА БОРА ПРИ МЕХАНОХИМИЧЕСКОМ И САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕМСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ СИНТЕЗЕ

Исследованы закономерности формирования карбида бора в системах B_2O_3–Al–C и B_2O_3–Mg–C при механохимическом и самораспространяющемся высокотемпературном синтезе (СВС). Механохимическую обработку системы B_2O_3–Al–C проводили в планетарной шаровой мельнице при скорости вращения 350–500 об/мин, продолжительности 30–90 мин и отношении массы шаров к массе порошковой шихты (BPR) 10–30. Установлено, что механическая активация сопровождается измельчением и структурированием порошковой смеси, а также развитием твердофазных превращений с образованием бороалюминатных, оксидных и карбидных фаз. В продукте, полученном при 450 об/мин, продолжительности обработки 30 мин и BPR = 20, методом рентгенофазового анализа обнаружена фаза B_4C, присутствующая наряду с $Al_{12}B_6O_{36}$, Al_2O_3, остаточным Al и алюминий-углеродсодержащей фазой.

При СВС установлено существенное влияние природы металла-восстановителя на параметры горения и фазообразование. Для системы B_2O_3–Al–C температура фронта составляла 2640-2750°C при скорости распространения 6,0–8,9 мм/с, тогда как для B_2O_3–Mg–C температура достигала около 3000°C, а скорость фронта – 10,9 мм/с. Максимальное содержание B_4C в исследованных продуктах составляло 4 мас. % для алюмотермической и 5 мас. % для магнийтермической системы. В продуктах СВС наряду с B_4C формируются оксидные и боратные фазы, состав которых определяется природой восстановителя. Показана возможность последующего выделения карбида бора из многокомпонентных продуктов путем селективной химической обработки. Полученные результаты показывают перспективность сочетания механической активации и металлотермического СВС для направленного формирования B_4C-содержащих материалов.

Ключевые слова: *карбид бора, механохимический синтез, механическая активация, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, алюмотермия, магниетермия, фазообразование.*

D. Muktaly[1,2*], B.X. Musabayeva[3], A. Batkal[1], K. Kamunur[1], A.Abylaikhan[1,2]
[1]Institute of Combustion Problems,
Republic of Kazakhstan, Almaty, Bogenbai Batyr St., 172
[2]Scientific Research Institute for New Chemical Technologies and Materials at Al-Farabi Kazakh National University, 050040, Republic of Kazakhstan, Almaty, Al-Farabi, 71
[3]Astana International University, Republic of Kazakhstan, Astana, Kabanbai Batyr, 8
*e-mail: dinara.muktaly@mail.ru

FEATURES OF BORON CARBIDE FORMATION DURING MECHANOCHEMICAL AND SELF-PROPAGATING HIGH-TEMPERATURE SYNTHESIS

The formation behavior of boron carbide in the B_2O_3–Al–C and B_2O_3–Mg–C systems during mechanochemical and self-propagating high-temperature synthesis (SHS) was investigated. Mechanochemical treatment of the B_2O_3–Al–C system was carried out in a planetary ball mill at rotational speeds of 350-500 rpm, treatment times of 30-90 min, and ball-to-powder mass ratios (BPR) of 10-30. Mechanical activation was found to promote particle size reduction and structural modification of the powder mixture, as well as solid-state transformations accompanied by the formation of boroaluminate, oxide, and carbide phases. X-ray diffraction analysis of the product obtained at 450 rpm, a treatment time of 30 min, and BPR = 20 revealed the presence of the B_4C phase along with $Al_{12}B_6O_{36}$, Al_2O_3, residual Al, and an Al–C-containing phase.

During SHS, the nature of the metallic reducing agent was found to have a significant effect on the combustion parameters and phase formation. For the B_2O_3–Al–C system, the combustion-front temperature ranged from 2640 to 2750 °C, with a propagation velocity of 6.0-8.9 mm/s, whereas in the B_2O_3–Mg–C system, the temperature reached approximately 3000 °C and the front velocity reached 10.9 mm/s. The maximum B_4C

content in the investigated products was 4 wt.% for the aluminothermic system and 5 wt.% for the magnesiothermic system. In addition to B_4C, oxide and borate phases were formed in the SHS products, with their composition being determined by the nature of the reducing agent. The possibility of subsequently isolating boron carbide from the multicomponent products by selective chemical treatment was demonstrated. The obtained results indicate that combining mechanical activation with metallothermic SHS is a promising approach for the controlled formation of B_4C-containing materials.

Key words: *boron carbide, mechanochemical synthesis, mechanical activation, self-propagating high-temperature synthesis, aluminothermy, magnesiothermy, phase formation.*

Авторлар туралы мәліметтер

Динара Мұқталы✉ – PhD, қауымдастырылған профессор. Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ Жаңа химиялық технологиялар мен материалдар ғылыми-зерттеу институтының жетекші ғылыми қызметкері; e-mail: dinara.muktaly@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1139-5488.

Бинур Хабасовна Мусабаева – х.ғ.к., профессор, Астана Халықаралық университеті; e-mail: mussabayevabinur@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2209-1209.

Айсулу Батқал – Жану проблемалары институтының ғылыми қызметкері; e-mail: abatkalova@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2271-6953.

Қастер Қамұнұр – PhD, қауымдастырылған профессор. Жану проблемалары институтының жетекші ғылыми қызметкері; e-mail: kamunur.k@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-0013-1926.

Ақерке Абылайхан – х.ғ.к., Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ Жаңа химиялық технологиялар мен материалдар ғылыми-зерттеу институты жетекші ғылыми қызметкері; e-mail: akerkeabylaikhan2@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1489-9603.

Сведения об авторах

Динара Мұқталы✉ – PhD, ассоциированный профессор. Ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского института новых химических технологий и материалов КазНУ им. аль-Фараби; e-mail: dinara.muktaly@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1139-5488.

Бинур Хабасовна Мусабаева – к.х.н., профессор, Международный университет Астана; e-mail: mussabayevabinur@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2209-1209.

Айсулу Баткал – научный сотрудник Института проблем горения; e-mail: abatkalova@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2271-6953.

Кастер Камунур – PhD, ассоциированный профессор. Ведущий научный сотрудник Института проблем горения; e-mail: kamunur.k@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-0013-1926.

Акерке Абылайхан – к.х.н., ведущий научный сотрудник научно-исследовательского института новых химических технологий и материалов КазНУ им. аль-Фараби; e-mail: akerkeabylaikhan2@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1489-9603.

Information about the authors

Dinara Muktaly✉ – PhD, Associate Professor. Leading Researcher at Scientific Research Institute for New Chemical Technologies and Materials, Al-Farabi Kazakh National University; e-mail: dinara.muktaly@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1139-5488.

Binur Mussabayeva – PhD, Professor, Astana International University; e-mail: mussabayevabinur@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2209-1209.

Aisulu Batkal – Research Associate at Institute of Combustion Problems; e-mail: abatkalova@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2271-6953

Kaster Kamunur – PhD, Associate Professor. Leading Researcher at Institute of Combustion Problems; e-mail: kamunur.k@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-0013-1926.

Akerke Abylaykhan – PhD, Leading Researcher at Scientific Research Institute for New Chemical Technologies and Materials, Al-Farabi Kazakh National University; e-mail: akerkeabylaikhan2@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1489-9603.

Редакцияға енуі 02.06.2026
Өңдеуден кейін түсуі 27.06.2026
Жариялауға қабылданды 28.06.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-86

МРНТИ: 67.15.31

А.Н. Сабитова, Б.Б. Баяхметова, Ж.Ш. Шәріпхан*, А.Б. Абдрахманова, А.С. Конакбаева
Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А
*e-mail: j.shariphan@shakarim.kz

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОТХОДОВ СВИНЦОВОГО ПРОИЗВОДСТВА В ТЕХНОЛОГИИ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТА

Аннотация: *Рост объемов техногенных отходов металлургической промышленности создает необходимость разработки эффективных технологических решений, направленных на их переработку и повторное использование в производстве строительных материалов. Одним из перспективных направлений является применение отходов свинцового производства в технологии портландцемента в качестве минеральных и технологических добавок. В данной работе исследована возможность использования отходов свинцового производства ТОО «Standard Steel KZ» (г. Шымкент) при производстве цементных композиций.*

Для оценки свойств исследуемых материалов были использованы методы рентгенофлуоресцентного анализа (XRF), рентгенофазового анализа (XRD), а также физико-механические методы испытаний. Дополнительно изучено влияние отходов свинцового производства на процесс помола клинкера, формирование микроструктуры цементного камня, гидратационные процессы и прочностные характеристики цементов.

Установлено, что исследуемые отходы содержат минеральные компоненты, способные участвовать в процессах структурообразования цементной системы. Введение добавки способствовало увеличению удельной поверхности цемента и улучшению прочностных характеристик. Наиболее выраженный положительный эффект наблюдался при содержании добавки 10 %, при котором достигалось максимальное повышение прочности при сжатии.

Результаты радиологических исследований показали, что удельная эффективная активность естественных радионуклидов в исследуемых образцах не превышает нормативных значений. Полученные данные подтверждают перспективность использования отходов свинцового производства в технологии цемента как с экологической, так и с технологической точки зрения.

Ключевые слова: *техногенные отходы, отходы свинцового производства, портландцемент, цементный камень, XRD-анализ, XRF-анализ, гидратация, экологическая безопасность.*

Введение

Промышленное развитие сопровождается постоянным увеличением объемов техногенных отходов, значительная часть которых продолжает складироваться без дальнейшей переработки [1]. Особенно остро данная проблема проявляется в металлургической отрасли, где образование многотоннажных отходов является неизбежной частью производственного цикла. Накопление подобных материалов приводит не только к ухудшению экологической ситуации, но и к потере потенциально ценных минеральных ресурсов [2].

Среди различных видов металлургических отходов особый интерес представляют отходы свинцового производства. Их химический состав характеризуется наличием оксидов кальция, железа, кремния и алюминия, что позволяет рассматривать данные материалы не исключительно как экологически опасные отходы, а как потенциальное вторичное сырье для строительной индустрии [3-5].

В мировой практике все большее распространение получают технологии вовлечения техногенных материалов в производство цемента и композиционных строительных материалов. Такой подход позволяет одновременно решать несколько задач: снижать потребление природного сырья, уменьшать энергетические затраты и сокращать объемы промышленных отходов, подлежащих хранению [6].

©А.Н. Сабитова, Б.Б. Баяхметова, Ж.Ш. Шәріпхан, А.Б. Абдрахманова, А.С. Конакбаева, 2026

Несмотря на большое количество исследований, посвященных применению металлургических отходов в цементной промышленности, вопросы использования отходов свинцового производства изучены недостаточно [7]. В литературе ограниченно представлены данные о влиянии подобных отходов на процессы измельчения клинкера, гидратацию цемента и формирование структуры цементного камня. Кроме того, недостаточно исследованы вопросы радиационной безопасности и стабильности свойств цементных композиций при введении подобных добавок [8, 9].

В связи с этим целью настоящей работы являлось исследование возможности применения отходов свинцового производства в качестве технологической добавки при производстве портландцемента, а также оценка их влияния на физико-механические свойства цементных систем.

Методы исследования

В качестве основного объекта исследования использовали отходы свинцового производства ТОО «Standard Steel KZ» (г. Шымкент). Дополнительно применяли портландцементный клинкер, доменный гранулированный шлак и гипсовый камень [10, 11].

Перед проведением исследований отходы подвергались предварительной сушке при температуре 105 °С до достижения постоянной массы, после чего материал измельчали и просеивали для получения более однородной дисперсной системы [12].

Химический состав исследуемых материалов определяли методом рентгенофлуоресцентного анализа (XRF). Фазовый состав изучали методом рентгенофазового анализа (XRD) на дифрактометре Bruker D8 Advance с использованием CuKα-излучения [13, 14].

Микроструктурные особенности цементного камня исследовали методом сканирующей электронной микроскопии (SEM). Физико-механические испытания цементов выполняли согласно требованиям МЕМСТ 31108-2020 [15].

Удельную поверхность цементов определяли методом Блейна. Прочность при сжатии определяли через 28 суток нормального твердения [15].

Результаты исследований и их обсуждение

Химический состав исследуемых материалов

Результаты XRF-анализа показали, что исследуемые отходы содержат значительное количество оксидов кальция, кремния и железа, способных участвовать в процессах формирования структуры цементного камня (табл. 1) [14].

Таблица 1 – Химический состав клинкера

Компонент	Содержание, %
SiO_2	21,30
Al_2O_3	5,93
Fe_2O_3	4,30
CaO	66,15
MgO	0,55
Na_2O	0,35
K_2O	0,13

Высокое содержание оксида кальция свидетельствует о выраженной гидравлической активности системы. Одновременно наличие силикатных и алюмосиликатных компонентов указывает на возможность участия отходов в процессах вторичного структурообразования.

Рентгенофазовый анализ отходов свинцового производства

Результаты XRD-анализа показали, что исследуемый материал имеет сложный минеральный состав. На рисунке 1 дифрактограммах фиксировались пики кварца, кальцита и железосодержащих соединений.

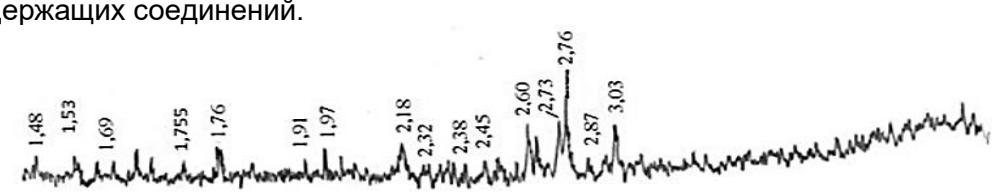


Рисунок 1 – Рентгенограмма отходов свинцового производства

Рентгенофазовый анализ клинкера показал наличие основных минералов портландцементного клинкера: алита, белита, алюмоферрита и алюмината. Дифракционные максимумы при d = 3,03; 2,60; 2,18; 1,97; 1,76; 1,53 и 1,48 Å соответствуют алиту (C_3S), который определяет ранний набор прочности цемента. Рефлексы при d = 2,87; 2,73 и 2,45 Å относятся к белиту (C_2S), влияющему на формирование прочности в более поздние сроки твердения. Пики при d = 2,76; 2,32 и 1,69 Å характерны для алюмоферритной фазы (C_4AF), а отражения при d = 2,38; 1,91 и 1,55 Å - для алюминатной фазы (C_3A). Полученные данные подтверждают типичный минералогический состав портландцементного клинкера и свидетельствуют о завершенности процессов клинкерообразования.

Наличие аморфной составляющей представляет особый интерес, поскольку именно аморфные фазы обладают повышенной реакционной способностью в цементных системах. Предположительно, это способствует более активному взаимодействию частиц отходов с продуктами гидратации цемента.

Влияние добавки на процесс помола клинкера

Одним из наиболее заметных эффектов введения отходов стало изменение процесса измельчения клинкера. При введении добавки наблюдалось увеличение удельной поверхности цемента (табл. 2) [16].

Таблица 2 – Удельная поверхность цементов

Содержание добавки, %	Удельная поверхность, см²/г
0	3100
5	3250
10	3380
15	3320

Максимальный эффект наблюдался при содержании добавки 10 %. Вероятно, присутствие тонкодисперсных частиц способствует снижению агломерации клинкерных зерен в процессе помола.

Дополнительно можно предположить, что отходы выполняют функцию своеобразного интенсификатора измельчения, изменяя характер межчастичного взаимодействия [16-18].

Формирование структуры цементного камня

SEM-анализ позволил выявить изменения микроструктуры цементного камня при введении отходов свинцового производства на рисунке 2.

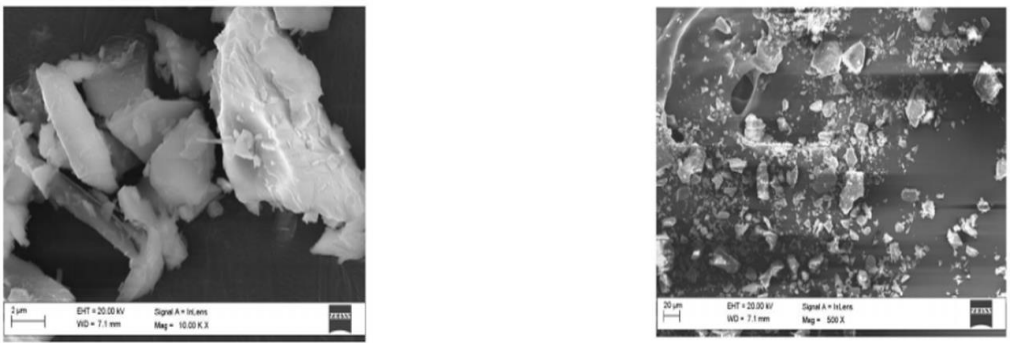


Рисунок 2 – Микроструктура цементного камня

Для образцов с добавкой характерно формирование более плотной и равномерной структуры. В структуре наблюдалось увеличение количества гидросиликатных новообразований и уменьшение количества крупных пор.

Подобные изменения могут быть связаны с дополнительными центрами кристаллизации, образующимися в присутствии мелкодисперсных минеральных частиц [19, 20, 21].

Прочностные характеристики цементов

Изменение прочности цементов представлено в таблице 3.

Рост прочности при введении 5-10 % добавки подтверждает положительное влияние отходов на процессы структурообразования цементной системы.

Таблица 3 – Прочность цементов при сжатии

Содержание добавки, %	Прочность, МПа
0	42,1
5	43,8
10	45,2
15	44,1

Снижение прочности при дальнейшем увеличении содержания добавки может быть связано с частичным разбавлением активной клинкерной составляющей [22, 23].

Радиационная безопасность цементов

Одним из важных этапов исследования являлась оценка радиационной безопасности полученных материалов (табл. 4).

Таблица 4 – Показатели радиоактивности цементов

Образец	Удельная активность, Бк/кг
Контрольный	185
5 % добавки	192
10 % добавки	198
15 % добавки	201

Полученные значения не превышают нормативных требований для строительных материалов. Это позволяет рассматривать исследуемые отходы как потенциально безопасное вторичное сырье для цементной промышленности [24-27].

Обсуждение научных результатов

Проведенные исследования показали, что отходы свинцового производства обладают комплексным минеральным составом и могут рассматриваться как потенциально активный компонент цементных систем. Результаты рентгенофлуоресцентного анализа подтвердили наличие оксидов кальция, кремния, алюминия и железа, играющих важную роль в процессах формирования структуры цементного камня.

Существенный интерес представляет присутствие аморфной составляющей в исследуемом материале. Известно, что аморфные алюмосиликатные и силикатные фазы характеризуются повышенной реакционной способностью по сравнению с кристаллическими соединениями. Вероятно, именно наличие подобных фаз способствует более активному взаимодействию отходов с продуктами гидратации цемента и дополнительному образованию гидросиликатов кальция.

Результаты исследования процесса помола показали, что введение отходов свинцового производства способствует увеличению удельной поверхности цемента. Наиболее выраженный эффект наблюдался при содержании добавки 10 %. Полученные данные позволяют предположить, что мелкодисперсные частицы отходов оказывают влияние на характер межчастичного взаимодействия в процессе измельчения клинкера. Вероятно, присутствие тонкодисперсной минеральной фазы снижает степень агломерации цементных частиц и способствует более эффективному разрушению клинкерных зерен.

Дополнительным фактором может являться изменение условий распределения механической энергии в процессе помола. Частицы отходов способны выполнять роль своеобразных центров локальной концентрации напряжений, что приводит к повышению эффективности измельчения цементной системы.

Полученные результаты по прочности цементов свидетельствуют о положительном влиянии отходов свинцового производства на процессы структурообразования. Повышение прочности при введении 5-10 % добавки может быть связано с несколькими факторами.

Во-первых, увеличение удельной поверхности цемента способствует ускорению гидратационных процессов за счет повышения площади контакта между цементными зернами и водой. Во-вторых, наличие активных минеральных компонентов может приводить к дополнительному формированию гидратных фаз, обеспечивающих уплотнение структуры цементного камня.

SEM-анализ подтверждает данное предположение. Для образцов с добавкой характерна более плотная и однородная микроструктура с уменьшением количества крупных

пор и дефектов. Наблюдаемое увеличение количества игольчатых и пластинчатых гидросиликатных новообразований свидетельствует об активизации процессов гидратации в присутствии отходов свинцового производства.

Следует отметить, что при увеличении содержания добавки до 15 % наблюдалось незначительное снижение прочности по сравнению с образцом, содержащим 10 % отходов. Подобный эффект может быть обусловлен частичным уменьшением доли активной клинкерной составляющей в цементной системе. При избыточном количестве отходов возрастает содержание относительно инертных минеральных компонентов, что приводит к снижению общего количества гидратных новообразований.

Важным аспектом проведенных исследований являлась оценка радиационной безопасности материалов. Полученные результаты показали, что введение отходов свинцового производства не приводит к превышению нормативных значений удельной активности естественных радионуклидов. Это имеет принципиальное значение для практического применения подобных материалов в строительной индустрии.

С экологической точки зрения использование отходов свинцового производства в технологии портландцемента представляет значительный интерес. Предлагаемый подход позволяет одновременно решать две важные задачи: сокращение объемов техногенных отходов металлургической промышленности и снижение потребления природного минерального сырья.

Кроме того, применение подобных отходов способствует уменьшению площадей, занятых промышленными отвальными материалами, а также снижению потенциального риска загрязнения почв и подземных вод соединениями тяжелых металлов.

Полученные результаты согласуются с современными тенденциями развития ресурсо- и энергосберегающих технологий в строительной индустрии. Вовлечение техногенных отходов в производство строительных материалов рассматривается как одно из наиболее перспективных направлений формирования принципов циркулярной экономики и комплексной переработки промышленных отходов.

Заключение

Проведенные исследования показали, что отходы свинцового производства обладают значительным потенциалом для применения в технологии портландцемента.

Установлено, что исследуемый материал содержит активные минеральные компоненты, способные участвовать в процессах гидратации и формирования структуры цементного камня. Введение отходов в цементную систему приводит к интенсификации процесса помола и увеличению удельной поверхности цемента.

Наиболее эффективным оказалось содержание добавки на уровне 10 %, при котором наблюдалось максимальное увеличение прочности при сжатии и формирование более плотной микроструктуры цементного камня.

Полученные результаты позволяют рассматривать отходы свинцового производства не только как экологическую проблему, но и как перспективный источник вторичного минерального сырья для строительной отрасли. Использование подобных материалов способствует снижению объемов техногенных отходов и расширяет возможности ресурсосбережения в цементной промышленности.

Список литературы

1. Competitive Industrial Performance Index 2025. Kazakhstan. JRC Indicatorsxplorer.Сілтемеhttps://compositeindicators.jrc.ec.europa.eu/explorer indices/cipi/competitive-industrial performance-index.
2. Birbayeva A. Kazakhstan Accelerates Industrial Transformation With Focus on Manufacturing, Digitalization, and Energy Modernization / A. Birbayeva // The Astana Times.Сілтеме-https://astanatimes.com/2025/12/ kazakhstan-accelerates-industrial-transformation-with-focus-on-manufacturing-digitalization-and-energy modernization/utm_source 02.12.2025.
3. Акымбаев Е.М. Фундамент будущего: Цементная Отрасль Казахстана установила абсолютный исторический рекорд / Е.М. Акымбаев // Независимый строительный портал. https://www.facebook.com/qazcem. 19.01.2026.

4. Global database of cement production assets and upstream suppliers / N. Tkachenko et al // Scientific Data. – 2023. – Vol. 10. – P. 696-1-696-9.
5. Клинкер мен портландцемент алу үшін өнеркәсіп қалдықтарын қолдану мүмкіндігін зерттеу / А.Е. Қуандықова және т.б. // Заманауи құрылыс материалдары, технологиялары және конструкциялары: халық. ғыл.-тәжір. конф. жин. – Шымкент, 2025. – Б. 215-219.
6. Ермоленко Е.П. Вяжущие вещества из техногенного сырья / Е.П. Ермоленко, И.Г. Лугинина, И.С. Ахметов. – Рудный: РИИ. – 2002. – С. 250.
7. Particle size analysis by laser diffraction spectrometry / C.F. Ferraries et al // Application to Cementitious Powders, NISTIR 7097, National Institute of Standards and Technology.2004. March.
8. Классен В.К. Техногенные материалы в производстве цемента / В.К. Классен. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2008 – С. 125.
9. Борисов И.Н. Техногенные материалы в производстве цемента / И.Н. Борисов, В.Е. Мануйлов. – Белгород: Изд-во БГТУ. 2008 – С. 125.
10. Шлакоотвал свинцового производства: отчет № А224-09 об оценке движимого имущества / сост. М.Ч. Бимурзаева. – Шымкент, 2017 – С.24.
11. Найманбаев М. История Чимкентского свинцового завода. https://titus.kz/index.php/component/users/load_theme/files/load_theme/files/load_theme/files/202 006190827565eec770c6cd0e.pdf?previ d=22988.%27&start=04. 2010 г.
12. Таймасов Б.Т. Синтез клинкеров из нестандартного сырья / Б.Т. Таймасов, Т.М. Худякова, А.Ж. Альжанова // Цемент и его применение. – 2014. – № 1 – С. 138-141.
13. Эрхард Х. Рентгено-Флуоресцентный анализ / Х. Эрхард, В.А. Федорович // Применение в заводских лабораториях. – Москва: «Металлургия». – 1985. – С. 8-12.
14. Рентгенофазовый анализ: методические указания к выполнению лаб. и научно-исследовательских работ для студентов спец. 250800 – Химическая технология тугоплавких неметалл, и силикатных матер. / БелГТАСМ. – Белгород, 2004. – С.48.
15. Таймасов Б.Т. Физико-химические методы анализа вяжущих материалов: практ. пос / Б.Т. Таймасов, Т.М. Худякова, М.С. Даулетияров. – М., 2024. – 144 с.
16. ГОСТ 30515-2013. Цементы. Технические условия. – Введен.2014-10-03. – М.: Стандартинформ, 2014.
17. ГОСТ 31108-2020. Цементы общестроительные. Технические условия. Введ. 2021-07-01. – Минск.
18. Технологический регламент ТОО «Производственная компания «Цементный завод Семей», 2026.
19. Dong B.S. The current situation and treatment countermeasure of industry solid wastes in China / B.S. Dong Chin // Environ. Prot. Industry. – 2021. – P. 20-21.
20. Рабочий проект «Реконструкция здания ТОО «Standard Steel KZ» под вспомогательные объекты со строительством установки вторичной переработки сырья по получению концентрата цветных металлов в г.Шымкенте», Шымкент. – 2022.
21. ГОСТ 5382-2019. Цементы и материалы цементного производства. Методы химического анализа. Введен 2020-06-01. – М.: Стандартинформ, 2019.
22. Михеев В.И. Рентгенометрический определитель минералов. – М.: Гос. Научно-техн. изд-во литературы по геологии и охране недр, 1957. – С. 870.
23. ГОСТ 30744-2001. Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного песка. – Введ. 2002-03-01. – М., 2002.
24. СТ РК 3184-2018. Клинкер портландцементный. Технические условия. – Введен 2020-01-01. – Астана: КТРМ. – С. 2-4.
25. ГОСТ 3476-2019. Шлаки доменные и электротермофосфорные гранулированные для производства цементов. – Введ. 2021-07-01. – Минск. – С. 2.
26. ГОСТ 25094-2015. Добавки активные минеральные для цементов. Метод определения активности. – Введ. 2017-07-01. – М., 2016. – С.1-4.
27. ГОСТ 30108-94. Материалы и изделия строительные. Определение удельной эффективной активности естественных радионуклеидов. – Введен 1995-01-01. – Москва. Госстрой России.

References

1. Competitive Industrial Performance Index 2025. Kazakhstan. JRC Indicatorsxplorer.Siltemehttps://compositeindicators.jrc.ec.europa.eu/explorer indices/cipi/competitive-industrial performance-index. (in English).
2. Birbayeva A. Kazakhstan Accelerates Industrial Transformation With Focus on Manufacturing, Digitalization, and Energy Modernization / A. Birbayeva // The Astana Times.Silteme-https://astanatimes.com/2025/12/ kazakhstan-accelerates-industrial-transformation-with-focus-on-manufacturing-digitalization-and-energy modernization/utm_source 02.12.2025. (in English).
3. Akymbaev E.M. Fundament budushchego: Tsementnaya Otrasl' Kazakhstana ustanovila absolyutnyi istoricheskii rekord / E.M. Akymbaev // Nezavisimyi stroitel'nyi portal. https://www.facebook.com/qazcem. 19.01.2026. (in Russian).
4. Global database of cement production assets and upstream suppliers / N. Tkachenko et al // Scientific Data. – 2023. – Vol. 10. – P. 696-1-696-9. (in English).
5. Klinker men portlandtsement alu үshin onerkasip kaldyktaryn koldanu mүmkindigin zertteu / A.E. Kuandykova zhane t.b. // Zamanaui kurylys materialdary, tekhnologiyalary zhane konstruktsiyalary: khalyk. gyl.-tazhir. konf. zhin. – Shymkent, 2025. – B. 215-219. (in Kazakh).
6. Ermolenko E.P. Vyazhushchie veshchestva iz tekhnogennogo syr'ya / E.P. Ermolenko, I.G. Luginina, I.S. Akhmetov. – Rudnyi: RII. – 2002. – S. 250. (in Russian).
7. Particle size analysis by laser diffraction spectrometry / C.F. Ferraries et al // Application to Cementitious Powders, NISTIR 7097, National Institute of Standards and Technology.2004. March. (in English).
8. Klassen V.K. Tekhnogennye materialy v proizvodstve tsementa / V.K. Klassen. – Belgorod: Izd-vo BGTU, 2008 – S. 125. (in Russian).
9. Borisov I.N. Tekhnogennye materialy v proizvodstve tsementa / I.N. Borisov, V.E. Manuilov. – Belgorod: Izd-vo BGTU. 2008 – S. 125. (in Russian).
10. Shlakootval svintsovogo proizvodstva: otchet № A224-09 ob otsenke dvizhimogo imushchestva / sost. M.Ch. Bimurzaeva. – Shymkent, 2017 – S.24. (in Russian).
11. Naimanbaev M. Istoriya Chimkentskogo svintsovogo zavoda. https://titus.kz/index.php/component/users/load_theme/files/load_theme/files/load_theme/files/202 006190827565eec770c6cd0e.pdf?previ d=22988.%27&start=04. 2010 g. (in Russian).
12. Taimasov B.T. Sintez klinkerov iz nestandartnogo syr'ya / B.T. Taimasov, T.M. Khudyakova, A.Zh. Al'zhanova // Tsement i ego primenenie. – 2014. – № 1 – S. 138-141. (in Russian).
13. Ehrkhard Kh. Rentgeno-Fluorestsentnyi analiz / Kh. Ehrkhard, V.A. Fedorovich // Primenenie v zavodskikh laboratoriyakh. – Moskva: «Metallurgiya». – 1985. – S. 8-12. (in Russian).
14. Rentgenofazovyi analiz: metodicheskie ukazaniya k vypolneniyu lab. i nauchno-issledovatel'skikh rabot dlya studentov spets. 250800 – Khimicheskaya tekhnologiya tugoplavkikh nemetall, i silikatnykh mater. / BelGTASM. – Belgorod, 2004. – S.48. (in Russian).
15. Taimasov B.T. Fiziko-khimicheskie metody analiza vyazhushchikh materialov: prakt. pos / B.T. Taimasov, T.M. Khudyakova, M.S. Dauletiyarov. – M., 2024. – 144 s. (in Russian).
16. GOST 30515-2013. Tsementy. Tekhnicheskie usloviya. – Vveden.2014-10-03. – M.: Standartinform, 2014. (in Russian).
17. GOST 31108-2020. Tsementy obshchestroitel'nye. Tekhnicheskie usloviya. Vved. 2021-07-01. – Minsk. (in Russian).
18. Tekhnologicheskii reglament TOO «Proizvodstvennaya kompaniya «Tsementnyi zavod Semei», 2026. (in Russian).
19. Dong B.S. The current situation and treatment countermeasure of industry solid wastes in China / B.S. Dong Chin // Environ. Prot. Industry. – 2021. – R. 20-21. (in English).
20. Rabochii proekt «Rekonstruktsiya zdaniya TOO «Standard Steel KZ» pod vspomogatel'nye ob''ekty so stroitel'stvom ustanovki vtorichnoi pererabotki syr'ya po polucheniyu kontsentrata tsvetnykh metallov v g.Shymkente», Shymkent. – 2022. (in Russian).
21. GOST 5382-2019. Tsementy i materialy tsementnogo proizvodstva. Metody khimicheskogo analiza. Vveden 2020-06-01. – M.: Standartinform, 2019. (in Russian).
22. Mikheev V.I. Rentgenometricheskii opredelitel' mineralov. – M.: Gos. Nauchno-tekhn. izd-vo literatury po geologii i okhrane nedr, 1957. – S. 870. (in Russian).

23. GOST 30744-2001. Tsementy. Metody ispytanii s ispol'zovaniem polifraktsionnogo peska. – Vved. 2002-03-01. – M., 2002. (in Russian).
24. ST RK 3184-2018. Klinker portlandtsementnyi. Tekhnicheskie usloviya. – Vveden 2020-01-01. – Astana: KTRM. – S. 2-4. (in Russian).
25. GOST 3476-2019. Shlaki domennye i ehlektrotermofosfornye granulirovannye dlya proizvodstva tsementov. – Vved. 2021-07-01. – Minsk. – S. 2. (in Russian).
26. GOST 25094-2015. Dobavki aktivnye mineral'nye dlya tsementov. Metod opredeleniya aktivnosti. – Vved. 2017-07-01. – M., 2016. – S.1-4. (in Russian).
27. GOST 30108-94. Materialy i izdeliya stroitel'nye. Opredelenie udel'noi ehffektivnoi aktivnosti estestvennykh radionukleidov. – Vveden 1995-01-01. – Moskva: Gosstroi Rossii. (in Russian).

Благодарность: *Работа проведена при финансовой помощи Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан, грант BR24993178 «Разработка инновационной технологии переработки вторичных ресурсов – отходов металлургических производств, побочных продуктов нефтепереработки и нефтедобычи».*

А.Н. Сабитова, Б.Б. Баяхметова, Ж.Ш. Шәріпхан*, А.Б. Абдрахманова, А.С. Конакбаева
Шәкәрім университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинки к-сі, 20 А
*e-mail: j.shariphan@shakarim.kz

ПОРТЛАНДЦЕМЕНТ ТЕХНОЛОГИЯСЫНДА ҚОРҒАСЫН ӨНДІРУ ҚАЛДЫҚТАРЫН ПАЙДАЛАНУДЫҢ ПЕРСПЕКТИВАЛАРЫ

Металлургия өнеркәсібіндегі техногендік қалдықтар көлемінің артуы құрылыс материалдарында оларды қайта пайдалануға бағытталған технологиялық шешімдерді іздеуді қажет етеді. Бұл зерттеу қорғасын өндірісі қалдықтарын портландцемент өндірісінде технологиялық қоспа ретінде пайдалану мүмкіндігін қарастырады. Зерттеу Standard Steel KZ (Шымкент) компаниясының қорғасын өндірісі қалдықтарына бағытталған. Материалдардың химиялық және фазалық құрамы XRF және XRD әдістерін қолдана отырып талданды. Қоспаның клинкерді ұнтақтауға, цемент тасының құрылымының қалыптасуына және цементтің беріктік қасиеттеріне әсері де зерттелді. Қалдықтардың құрамында цемент жүйесіндегі гидратация және құрылымның қалыптасу процестеріне қатыса алатын минералды компоненттер бар екені анықталды. Ең айқын оң әсер 10% қоспа қосқанда байқалды, бұл цементтің меншікті бетінің ауданының ұлғаюына және сығылу беріктігінің артуына әкелді. Алынған нәтижелер қорғасын өндірісі қалдықтарын цемент технологиясында экологиялық және технологиялық тұрғыдан пайдалану мүмкіндігін көрсетеді.

Түйін сөздер: *техногенді қалдықтар, қорғасын өндірісінің қалдықтары, портландцемент, цемент тасы, XRD-талдау, XRF-талдау, гидратация, экологиялық қауіпсіздік.*

A. Sabitova, B. Bayakhmetova, Zh. Sharipkhan*, A. Abdrakhmanova, A. Konakbaeva
Shakarim University,
071412, Republic of Kazakhstan, Semey, 20 A Glinka Street
*e-mail: j.shariphan@shakarim.kz

PROSPECTS FOR USING LEAD PRODUCTION WASTE IN PORTLAND CEMENT TECHNOLOGY

The increasing accumulation of technogenic waste generated by the metallurgical industry necessitates the development of effective approaches for its reuse in construction materials. This study investigates the feasibility of utilizing lead production waste as a technological additive in Portland cement manufacturing. Lead production waste obtained from Standard Steel KZ LLP (Shymkent, Kazakhstan) was used as the research material.

The chemical and phase compositions of the investigated materials were characterized using X-ray fluorescence (XRF) and X-ray diffraction (XRD) analyses. In addition, the effect of the additive on clinker grinding, cement stone microstructure formation, and the mechanical properties of cement was evaluated.

The results demonstrated that the investigated waste contains mineral components capable of participating in hydration and structure-forming processes within the cement system. The most significant positive effect was observed at a 10% additive content, which resulted in an increase in the specific surface area of the cement and improved compressive strength.

The findings indicate that lead production waste can be considered a promising secondary raw material for cement technology from both environmental and technological perspectives.

Key words: *technogenic waste, lead production waste, Portland cement, cement stone, XRD analysis, XRF analysis, hydration, environmental safety.*

Сведения об авторах

Альфира Нуржановна Сабитова – ассоциированный профессор, PhD, заведующий кафедры «Химия и экология», Шәкәрім университеті, г. Семей, Республика Казахстан; e-mail: alfa-1983@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3360-7998.

Булбул Баяхметовна Баяхметова – кандидат химических наук, ассоциированный профессор кафедры «Химия и экология», Шәкәрім университеті, г. Семей, Республика Казахстан; e-mail: bulbul.bayakhmetova@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5663-5107.

Жанна Шәріпханқызы Шәріпхан* – докторант кафедры «Химия и экология», Шәкәрім университеті, г. Семей, Республика Казахстан; e-mail: j.shariphan@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/.0000-0002-2484-7287.

Ажар Бауыржановна Абдрахмановна – магистр химии, преподаватель кафедры «Химия и экология», Шәкәрім университеті, г. Семей, Республика Казахстан; e-mail: zzzk2014@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1196-6081.

Арианна Сейсембаевна Конакбаева – магистрант кафедры «Химия и экология», Шәкәрім университеті, г. Семей, Республика Казахстан; e-mail: arikonakbaeva@gmail.com.

Авторлар туралы мәліметтер

Альфира Нуржановна Сабитова – қауымдастырылған профессор, PhD, химия және экология кафедрасының меңгерушісі, Шәкәрім университеті, Семей қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: alfa-1983@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3360-7998.

Булбул Баяхметовна Баяхметова – химия ғылымдарының кандидаты, «Химия және экология» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Шәкәрім университеті, Семей қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: bulbul.bayakhmetova@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5663-5107.

Жанна Шәріпханқызы Шәріпхан* – «Химия және экология» кафедрасының докторанты Шәкәрім университеті Семей қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: j.shariphan@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/.0000-0002-2484-7287.

Ажар Бауыржановна Абдрахманова – химия магистрі, «Химия және экология» кафедрасының оқытушысы, Шәкәрім университеті Семей қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: zzzk2014@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1196-6081.

Арианна Сейсембаевна Конакбаева – «Химия және экология» кафедрасының магистранты Шәкәрім университеті Семей қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: arikonakbaeva@gmail.com.

Information about the authors

Alfira Sabitova – Associate Professor, PhD, Head of the Department of Chemistry and Ecology, Shakarim Universiti, Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: alfa-1983@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3360-7998.

Bulbul Bayakhmetova – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of «Chemistry and Ecology», Shakarim University, Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: bulbul.bayakhmetova@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5663-5107.

Zhanna Sharipkhan* – Doctoral Student of the Department of «Chemistry and Ecology», Shakarim University, Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: j.shariphan@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/.0000-0002-2484-7287.

Azhar Abdrakhmanova – Master of Chemistry, Teacher of the Department of «Chemistry and Ecology», Shakarim University, Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: zzzk2014@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1196-6081.

Arianna Konakbaeva – Master's student of the Department of «Chemistry and Ecology», Shakarim University, Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: arikonakbaeva@gmail.com.

Поступила в редакцию 10.06.2026
Принята к публикации 24.06.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-87

МРНТИ: 31.23.01

Ұ. Әмзеева[1,2*], А. Нурлыбек[2], К. Аскарулы[1], Ж. Токтарбай[1], С. Азат[1]
[1]Satbayev University,
050013, Республика Казахстан, г. Алматы, ул.Сатпаева, 22
[2]Казахский Национальный университет им. аль-Фараби,
050040, Республика Казахстан, г. Алматы, пр. аль-Фараби, 71
*e-mail: ulpan-92.kz@mail.ru

ЗЕЛЕНЫЙ СИНТЕЗ СЕРЕБРЯНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ЛЕЧЕНИЯ РАН

Аннотация: *В данном обзоре рассмотрены современные подходы к «зеленому» синтезу серебряных нанокомпозитов, а также основные типы сорбентов, методы их модификации и перспективы биомедицинского применения. Серебряные наночастицы (AgNPs) являются одним из наиболее перспективных классов наноматериалов благодаря выраженным антибактериальным, противовоспалительным свойствам. Вместе с тем традиционные физические и химические методы их синтеза связаны с использованием токсичных реагентов, высокими температурами и значительными энергетическими затратами, что ограничивает их экологическую и практическую применимость.*

В связи с этим в последние годы активно развиваются подходы «зеленого» синтеза, основанные на использовании растительных экстрактов, микроорганизмов и природных биополимеров. Биологически активные соединения растений, включая полифенолы, флавоноиды, терпеноиды, сахара и белки, выступают в качестве природных восстановителей и одновременно стабилизирующих агентов при формировании наночастиц серебра. Особый интерес представляет иммобилизация AgNPs на различных сорбционных материалах, позволяющая уменьшить агрегацию частиц, повысить их коллоидную стабильность и обеспечить контролируемое высвобождение ионов серебра. Серебряные нанокомпозиты на основе сорбентов демонстрируют высокий потенциал для применения в раневых покрытиях, системах локальной доставки лекарственных средств, диагностических сенсорах и антибактериальных материалах.

Полученные результаты указывают на то, что использование зеленых методов синтеза и сорбционных матриц позволяет создавать экологически безопасные и функционально активные наноматериалы с улучшенными биомедицинскими характеристиками.

Ключевые слова: *серебряные наночастицы, зеленый синтез, нанокомпозиты, сорбенты, биомедицина, антибактериальные материалы.*

Введение

Нанотехнологии занимают важное место в современной биомедицине благодаря возможности создания материалов с уникальными физико-химическими и биологическими свойствами. Среди различных наноматериалов серебряные наночастицы (AgNPs) в последние годы привлекают значительное внимание благодаря их выраженным антибактериальным, противовоспалительным и антиангиогенным свойствам, что обусловливает широкий спектр их применения в биомедицине, включая раневые покрытия, системы адресной доставки лекарственных средств, диагностические сенсоры и противомикробные материалы [1]. Однако традиционные физические и химические методы синтеза AgNP зачастую сопровождаются использованием токсичных реагентов, органических растворителей, высоких температур и многостадийных процессов очистки, что ограничивает их биосовместимость и экологическую безопасность [2]. В связи с этим в последние годы активно развиваются методы «зеленого» синтеза серебряных наночастиц, основанные на использовании растительных экстрактов, микроорганизмов, грибов и природных полимеров. Биологические компоненты в таких системах выполняют одновременно функции восстановителей и стабилизаторов, что позволяет уменьшить токсичность процесса, повысить стабильность наночастиц и улучшить их биосовместимость. Кроме того, зеленый синтез рассматривается как перспективный и экологически безопасный подход к получению наноматериалов для медицинских и фармацевтических целей [3].

©Ұ. Әмзеева, А. Нурлыбек, К. Аскарулы, Ж. Токтарбай, С. Азат, 2026

Особый интерес представляют сорбенты и пористые носители, модифицированные серебряными наночастицами. Использование сорбентов способствует снижению агломерации наночастиц, повышению их устойчивости и контролируемому высвобождению ионов серебра [4-5]. Кроме того, такие композитные системы облегчают удаление наноматериалов из биосреды и позволяют регулировать деградацию и функциональные свойства биоматериалов. Благодаря развитой поверхности и сорбционным свойствам носителей возможно создание многофункциональных нанокомпозитов с улучшенными антибактериальными характеристиками [6-7].

Серебряные нанокомпозиты на основе сорбентов обладают значительным потенциалом для биомедицинского применения. Они демонстрируют высокую эффективность в отношении широкого спектра патогенных микроорганизмов, перспективны для разработки перевязочных материалов, систем локальной доставки антибиотиков, а также диагностических платформ для обнаружения микроорганизмов [2, 8]. В связи с этим исследования, посвященные зеленому синтезу серебряных нанокомпозитов и оценке их биомедицинских свойств, являются актуальным направлением современной нанобиотехнологии.

Целью данного обзора является анализ современных методов зеленого синтеза серебряных нанокомпозитов, модифицированных на сорбентах, а также рассмотрение их биомедицинских свойств и перспектив практического применения.

Зеленый синтез серебряных наночастиц. Зеленый синтез представляет собой экологически безопасный подход к получению наноматериалов с использованием природных восстановителей и стабилизаторов. Основной задачей данного подхода является снижение токсичности процессов синтеза и минимизация образования опасных побочных продуктов.

В качестве биологических агентов для синтеза AgNPs широко применяются: растительные экстракты, бактерии, грибы, природные полисахариды и белки.

Биомолекулы природного происхождения восстанавливают ионы серебра Ag+ до металлического серебра Ag^0 и одновременно стабилизируют поверхность наночастиц, предотвращая их агломерацию. Этот подход соответствует принципам зеленой химии, поскольку использует водную среду, безопасные восстанавливающие агенты, комнатную или умеренную температуру и снижает образование опасных побочных продуктов, при этом часто повышая биосовместимость по сравнению с традиционными химическими методами [9-11].

Растительные экстракты являются наиболее распространенными агентами зеленого синтеза благодаря доступности, низкой стоимости и высокому содержанию биологически активных веществ. Экстракты листьев, корней, плодов и цветков различных растений содержат фенольные соединения, флавоноиды, алкалоиды и органические кислоты, участвующие в восстановлении ионов серебра [12-14]. Функциональные группы, такие как гидроксильные, карбонильные и карбоксильные фрагменты, играют решающую роль в процессах переноса электронов, инициируя тем самым нуклеацию и образование наночастиц. В дополнение к своей восстановительной активности, эти биомолекулы могут адсорбироваться на поверхности наночастиц и выступать в качестве стабилизирующих агентов, способствуя стабилизации наночастиц и функционализации поверхности [15-16].

После нуклеации фитохимические вещества и связанные с ними биомолекулы, включая белки и полисахариды, стабилизируют наночастицы серебра за счет стерических и электростатических взаимодействий. Покрытие поверхности предотвращает агрегацию наночастиц в водной и физиологической средах и повышает коллоидную стабильность [15]. Кроме того, биомолекулярная оболочка, образующаяся на поверхности наночастиц, может способствовать последующим процессам биоконъюгации и интеграции в полимерные или сорбентные матрицы для биомедицинских применений, таких как перевязочные материалы, системы доставки лекарств и биосенсоры.

Соотношение между растительным экстрактом и прекурсором серебра существенно влияет на кинетику нуклеации и роста наночастиц. Изменения соотношения экстракта к $AgNO_3$ влияют на распределение частиц по размерам, морфологию и коллоидную стабильность. Для получения относительно небольших и монодисперсных наночастиц серебра обычно используются соотношения от приблизительно 1:9 до 1:3 (экстракт:$AgNO_3$,

об./об.); однако оптимальные условия сильно зависят от фитохимического состава выбранного растительного экстракта и используемых параметров синтеза (рис. 1) [17].

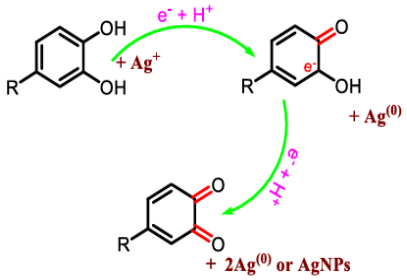


Рисунок 1 – Механизм «зеленого» синтеза наночастиц серебра (Ag NPs)

В результате синтезированные наночастицы серебра характеризуются улучшенной биосовместимостью и функциональностью поверхности по сравнению с наночастицами, полученными традиционными химическими методами. Такой подход позволяет разрабатывать относительно простые и масштабируемые протоколы синтеза, перспективные для промышленного применения в соответствии с принципами «зеленой химии» [18-19].

Преимуществами растительного синтеза являются:

- простота процесса;
- отсутствие токсичных реагентов;
- высокая скорость образования наночастиц;
- возможность контроля размера и формы AgNPs.

Ключевым параметром проектирования является растительная среда: состав экстракта, его концентрация, pH и метод экстракции оказывают сильное влияние на кинетику нуклеации, рост и стабилизацию, определяя тем самым конечное распределение размеров наночастиц, характеристики поверхностного плазмонного резонанса и химический состав поверхности, имеющие значение для последующих применений [20-22].

Водная экстракция, как правило, предпочтительнее из-за ее простоты, низкой токсичности и совместимости с биомедицинскими приложениями. В большинстве протоколов растительные материалы промывают, сушат и подвергают экстракции с использованием дистиллированной воды или водных растворителей при умеренном нагреве, чтобы сохранить термолабильные биоактивные соединения, обеспечивая при этом эффективное удаление восстанавливающих агентов. Физико-химические свойства синтезированных AgNPs сильно зависят от состава экстракта и используемых параметров синтеза [15, 23].

Размеры синтезированных с использованием водных растительных экстрактов наночастиц обычно варьируются от приблизительно 5 до 60 нм, а полосы поглощения поверхностного плазмонного резонанса (SPR) обычно наблюдаются в диапазоне 400-450 нм. Различия в размере, морфологии и оптических свойствах наночастиц связаны с различиями в фитохимическом составе, концентрации прекурсоров, pH, температуре и времени реакции [24-27].

Характеризация растительных экстрактов является важным аспектом воспроизводимого «зеленого» синтеза. Аналитические подходы, такие как определение общего содержания фенольных соединений, фитохимический скрининг и инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье (FTIR), широко используются для идентификации функциональных групп и биологически активных соединений, участвующих в образовании и стабилизации наночастиц [16, 23]. Сопоставление состава экстракта с характеристиками наночастиц позволяет лучше понять механизмы восстановления, поведение при стабилизации и воспроизводимость биосинтезированных наночастиц серебра от партии к партии (рис. 2, табл. 1) [25].

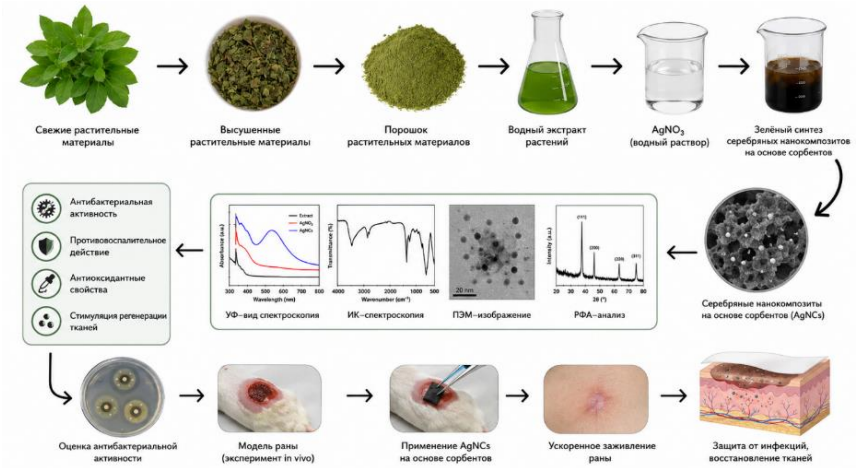


Рисунок 2 – Схематическое представление зеленого синтеза серебряных нанокомпозитов на основе сорбентов, их физико-химической характеристики и применения для лечения ран

Таблица 1 – Растительные экстракты, используемые для зеленого синтеза AgNPs: характеристики наночастиц и их биологическая активность

Растение	Используемая часть	Размер nm	Форма	Био активность	Референс
1	2	3	4	5	6
Crataegus douglasii	плод	29.28	наночастицы имели почти сферическую форму	**антибактериальная активность против** *S. aureus* **и** *E. coli*.	[28]
Artemisia nilagirica	листья	70-90	сферические, 10-45 нм	антибактериальная активность, **антимикробная активность**	[29]
Vitis vinifera	плод	18-20	сферические наночастицы	антибактериальная активность в отношении как грамположительных бактерий *Bacillus subtilis*, так и грамотрицательных бактерий *Escherichia coli*.	[30]
Stigmaphyllon littorale	листья	5-25	сферические наночастицы	антибактериальная активность в отношении *Pseudomonas putida*, *Escherichia coli*, *Bacillus subtilis* и *Micrococcus luteus*.	[31]
Euphorbia prostrata	листья	25-80 nm	стержневидной формы	пестицидная активность	[32]
Dodonaea viscosa	листья	16	сферические наночастицы	**антимикробная активность**	[33]
Cucumis prophetarum	листья	30-50	полиморфная форма: эллипсоидальная и неправильная	злокачественная опухоль печени	[34]
Azadirachta indica	листья	2-18	наночастицы треугольной и шестиугольной формы	**рак шейки матки**	[35]
Terminalia mantaly	листья, стебель, корни	11-83	анизотропные наночастицы	антибактериальная активность	[36]
Melia dubia	листья	7.3	наночастицы неправильной формы	рак молочной железы	[37]
Calophyllum tomentosum	листья	24	сферические наночастицы	**антибактериальная, антиоксидантная, антидиабетическая, противовоспалительная и антитирозиназная активность**	[38]
Punica granatum	листья	48	гранецентрированная кубическая кристаллическая структура	**противоопухолевая, антидиабетическая и антиоксидантная активность**	[39]

1	2	3	4	5	6
Ocimum basilicum	семена	13.82	сферические наночастицы	антибактериальная активность в отношении как грамположительных, так и грамотрицательных бактерий	[40]
Aconitum toxicum Reichenb.	корни	53-67	сферические наночастицы	антиоксидантная и митостимулирующая активность	[41]
Aloe vera	листья	5-50	октаэдр	**антимикробная активность**	[42]
Eclipta prostrate	листья	35-60	шестиугольники, треугольники и пятиугольники	ларвицидная активность	[43]
Hibiscus rosa sinensis	цветки	14	наночастицы призматической или сферической формы	ларвицидная активность	[44]
Pistacia atlantica	порошок семян	10-50	сферические наночастицы	антибактериальная активность в отношении *S. aureus*	[45]
Withania somnifera	листья	5-30	сферические наночастицы	AgNPs с квазοοбратимым окислительно-восстановительным поведением; антибактериальная активность в отношении *E. coli* и *S. aureus*; противогрибковая активность в отношении *A. niger*, *A. flavus* и *C. albicans*	[46]
Tribulus terrestris L	сушненые плоды	16-28	сферические наночастицы	Антибактериальная активность в отношении *S. pyogenes*, *P. aeruginosa*, *E. coli*, *S. aureus* и *B. subtilis*.	[47]

Основные типы сорбентов, модифицированных серебряными наночастицами.

Модификация наночастиц серебра (AgNPs) на сорбентах является эффективной стратегией для повышения стабильности наночастиц, снижения агрегации и контроля высвобождения ионов серебра. Использование пористых носителей с большой площадью поверхности также облегчает включение AgNPs в биомедицинские устройства, диагностические системы, антимикробные покрытия и материалы для защиты окружающей среды [48-50]. Сорбенты с развитой пористостью и большой площадью поверхности повышают способность к загрузке наночастиц и усиливают взаимодействие с биологическими и химическими мишенями [51-52].

Для модификации AgNP используются различные классы сорбентов, включая активированный уголь, цеолиты, материалы на основе диоксида кремния, биополимерные матрицы, гидрогели, материалы на основе целлюлозы и углеродсодержащие наноматериалы, такие как графен и углеродные нанотрубки. Эти материалы различаются по физико-химическим свойствам, которые влияют на распределение наночастиц, стабильность, кинетику высвобождения и функциональные характеристики в биомедицинских и экологических приложениях [53].

Активированный уголь обеспечивает большую площадь поверхности и пористость, что позволяет наносить значительное количество наночастиц серебра и потенциально способствует быстрому антимикробному действию или катализу при модификации наночастиц серебра на его поверхности или внутри пор [49-50]. Наночастицы серебра (AgNPs) могут быть иммобилизованы на поверхности углерода путем химического восстановления или загружены в виде наночастиц в углеродные матрицы; функционализация поверхности (например, карбоксильные, гидроксильные группы) способствует стабильности связывания и может влиять на профили высвобождения ионов серебра и биоактивность.

Наночастицы серебра на активированном угле широко исследуются в качестве антимикробных фильтрующих материалов, интерфейсов для лечения ран и каталитических систем, хотя равномерность загрузки и совместимость с порами остаются практическими соображениями [50].

Цеолиты и сорбенты на основе диоксида кремния. Природные и синтетические цеолиты широко исследуются в качестве эффективных сорбентов для модификации наночастиц серебра (AgNP) благодаря их четко выраженной микропористой структуре, большой площади поверхности, термической стабильности и ионообменной способности [48]. Отрицательно заряженный пористый каркас цеолитов обеспечивает эффективную адсорбцию ионов серебра и способствует равномерному распределению и удержанию AgNP внутри пористой структуры. Такая модификация повышает стабильность наночастиц, снижает агрегацию и позволяет контролировать высвобождение ионов серебра [54-55].

Композиты на основе цеолитов, нагруженных серебром, демонстрируют выраженную антимикробную активность против широкого спектра микроорганизмов и сохраняют хорошую стабильность в водной среде [5]. Благодаря этим свойствам, нанокомпозиты AgNP на основе цеолитов считаются перспективными материалами для биомедицинских и экологических применений, включая фильтрующие мембраны, волокнистые маты, антимикробные покрытия и системы перевязочных материалов для ран. Кроме того, ионообменные свойства цеолитов способствуют более длительному антимикробному действию и снижению цитотоксичности по сравнению со свободными наночастицами [56-57].

Монолитные кремнеземные материалы широко используются в качестве носителей для модификации наночастиц серебра благодаря их большой площади поверхности, химической стабильности и регулируемой пористой структуре. Кремнеземные монолиты, нагруженные наночастицами серебра, могут обеспечивать селективную адсорбцию и быстрое разделение аналитов за счет гидрофобных и π–π взаимодействий, особенно с ароматическими соединениями [58]. Эти системы обладают хорошей возможностью многократного использования и простыми процедурами регенерации, что делает их перспективными материалами для аналитического биосенсорного анализа, предварительной обработки образцов и технологий разделения.

Монолиты на основе диоксида кремния и монолитные матрицы. Монолитные кремнеземные сорбенты, модифицированные аминопропильными группами, широко исследуются в качестве стабильных платформ для модификации наночастиц серебра. Такие материалы обеспечивают высокую механическую стабильность, возможность многократного использования и эффективное распределение наночастиц внутри пористой структуры [5]. Модифицированные наночастицы серебра улучшают адсорбционные свойства за счет дополнительных электростатических и π–π взаимодействий с целевыми аналитами, что делает эти системы пригодными для твердофазной экстракции (ТФЭ), аналитического разделения и биосенсорных применений [48].

Наночастицы серебра на кремнеземной подложке также перспективны для биомедицинских применений благодаря химической стабильности и биосовместимости кремнеземных поверхностей. Модификация наночастиц на кремнеземных матрицах повышает стабильность наночастиц и позволяет проводить дальнейшую биофункционализацию для антимикробных покрытий, диагностических интерфейсов и медицинских устройств. В материалах для перевязочных материалов на основе кремнезема нанокомпозиты могут сохранять структурную целостность, обеспечивая при этом длительную антимикробную активность и контролируемое высвобождение серебра [54].

Биополимеры и природные полимеры в качестве сорбентов. Биополимеры, такие как хитозан, альгинат, производные целлюлозы и материалы на основе крахмала, широко используются в качестве матриц для модификации наночастиц серебра благодаря их биосовместимости, биоразлагаемости и обилию функциональных групп, способных стабилизировать наночастицы серебра [58]. Эти материалы могут служить как носителями для модтфткации наночастиц, так и реакционной средой для синтеза наночастиц *in situ*.

Хитозан является одним из наиболее широко изученных биополимеров для систем на основе наночастиц серебра. Присутствие амино- и гидроксильных групп способствует стабилизации наночастиц и сильному взаимодействию с полимерными матрицами. Нанокомпозиты на основе хитозана могут быть получены в виде пленок, гидрогелей и мембран, пригодных для перевязочных материалов, антимикробных покрытий и фильтрующих материалов [59].

Альгинат, производные целлюлозы и матрицы на основе крахмала обеспечивают мягкие и экологически чистые условия обработки, а также гибкие форматы материалов, такие как гранулы, пленки и гидрогели [52]. Эти системы могут обеспечивать контролируемое высвобождение серебра и снижать цитотоксичность, связанную с наночастицами, благодаря биосовместимой природе полимерной матрицы [60].

Материалы на основе целлюлозы и лигнина также являются перспективными носителями для иммобилизации наночастиц серебра. Целлюлозные гидрогели и наноцеллюлозные композиты обладают высокой пористостью, способностью удерживать воду и благоприятными механическими свойствами, что делает их привлекательными для заживления ран, тканевой инженерии и антимикробных применений. Такие матрицы могут образовывать стабильные металлогелевые структуры с длительной антимикробной активностью [61].

Гидрогели и целлюлозные сетки также используются для иммобилизации наночастиц серебра благодаря их пористости, биосовместимости и способности обеспечивать контролируемое высвобождение серебра [61]. Эти материалы широко исследуются для использования в перевязочных материалах для ран и антимикробных системах.

Углеродсодержащие наноматериалы, включая графен и углеродные нанотрубки, используются в качестве носителей наночастиц серебра благодаря их большой площади поверхности, механической стабильности и электропроводности, что делает их перспективными для биосенсорных и антимикробных применений [54].

При использовании серебряных наночастиц в составе раневых сорбционных повязок необходимо учитывать возможность их высвобождения в раневую среду. Степень высвобождения зависит от характера взаимодействия наночастиц с сорбентом, его структуры и свойств, а также от состава и продолжительности контакта с раневым экссудатом. При правильно подобранных условиях включение AgNPs в сорбционный материал может способствовать их удержанию в повязке и обеспечивать постепенное поступление активного компонента в область раны. Вместе с тем высвобождение свободных наночастиц и их последующее проникновение в окружающие ткани потенциально может увеличивать риск локального или системного воздействия серебра. Поэтому при разработке таких повязок важно контролировать степень удерживания AgNPs в сорбенте и профиль высвобождения серебра, обеспечивая необходимую антимикробную активность непосредственно в области раны при минимальном поступлении серебра в системный кровоток.

Модификация серебряных наночастиц на сорбентах способствует снижению агломерации, повышению стабильности нанокомпозитов и контролируемому высвобождению ионов серебра. Такой подход позволяет повысить антимикробную эффективность, снизить цитотоксичность и улучшить взаимодействие наночастиц с микроорганизмами благодаря развитой поверхности и высокой сорбционной способности носителей.

Методы получения нанокомпозитов

Для синтеза наночастиц серебра можно использовать различные сорбенты, включая активированный уголь, материалы на основе диоксида кремния, цеолиты, хитозановые пленки, целлюлозные гидрогели и наноматериалы на основе углерода. В качестве прекурсора серебра обычно используется нитрат серебра ($AgNO_3$) в различных концентрациях в зависимости от требуемой загрузки наночастиц [62]. Для экологически чистого синтеза наночастиц широко применяются экологически чистые восстановители, такие как растительные экстракты, полифенолы, сахара и полисахариды, в то время как для сравнения могут использоваться традиционные восстановители, включая борогидрид натрия и аскорбиновую кислоту. В качестве реакционной среды обычно используется деионизированная вода. Для повышения стабильности наночастиц могут быть добавлены дополнительные стабилизирующие агенты, такие как хитозан, альгинат, цитрат или поливинилпирролидон (ПВП).

Процесс синтеза обычно оптимизируется путем варьирования концентрации $AgNO_3$, типа восстановителя, pH, температуры и времени реакции. Основные оцениваемые параметры включают размер и морфологию наночастиц, загрузку наночастиц на поверхность сорбента, поведение высвобождения ионов серебра, коллоидную стабильность и антимикробную активность [63].

Пропитка сорбентов раствором $AgNO_3$ с последующим восстановлением. Один из наиболее часто используемых методов включает пропитку сорбента раствором $AgNO_3$ с последующим восстановлением ионов Ag^+ до металлического серебра. Сорбенты промывают, сушат и выдерживают в контролируемых условиях. Затем сорбент погружают в раствор $AgNO_3$ на определенный период времени для адсорбции ионов серебра в пористой структуре [64-65].

Синтез *in situ* на поверхностях сорбентов. Синтез *in situ* широко используется для достижения равномерного распределения наночастиц и сильного взаимодействия между наночастицами серебра (AgNPs) и матрицей сорбента.

Ионы серебра адсорбируются или образуют комплексы на поверхности сорбента, после чего происходит восстановление *in situ* для образования наночастиц серебра, локализованных в местах связывания, внутри пор или вдоль поверхности [51]. Такой подход обычно обеспечивает однородное распределение и прочную адгезию благодаря одновременному образованию наночастиц и их иммобилизации в центрах нуклеации.

Химический состав поверхности сорбента (аминные, карбоксильные, гидроксильные группы) и его пористость выступают в качестве зародышеобразующих матриц, влияя на размер и дисперсию частиц [66]. Условия восстановления можно регулировать для обеспечения контролируемого роста внутри пор или на функциональных группах, что позволяет получать частицы размером от нескольких до десятков нанометров.

Модификация предварительно синтезированных наночастиц серебра. Предварительно синтезированные наночастицы серебра также могут быть иммобилизованы на сорбентах с помощью адсорбции или методов функционализации поверхности. Этот метод позволяет точно контролировать размер наночастиц и химический состав поверхности перед иммобилизацией. Поверхности сорбентов могут быть модифицированы функциональными группами для улучшения прикрепления и стабильности наночастиц.

Ультразвуковые и микроволновые методы. Ультразвуковые и микроволновые методы все чаще используются для повышения эффективности загрузки наночастиц и сокращения времени синтеза. Ультразвуковая обработка улучшает массоперенос и дисперсию наночастиц, тогда как микроволновое облучение ускоряет кинетику восстановления и способствует равномерному образованию наночастиц.

Синтезированные нанокомпозиты обычно характеризуются с помощью УФ-видимой спектроскопии, просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), рентгеновской дифракции (РД) и инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье (ИК-Фурье). Поведение при загрузке и высвобождении серебра обычно анализируется с помощью методов ICP-OES или ICP-MS [67].

Антимикробные свойства и механизм действия

Синтезированные в зеленом виде наночастицы серебра (AgNP) проявляют мощные антимикробные свойства, их прямое применение может привести к быстрому высвобождению ионов серебра (Ag+), усилению системного воздействия и потенциальным цитотоксическим или экологическим эффектам. Чтобы преодолеть эти ограничения, эффективной стратегией стала иммобилизация или инкапсулирование AgNP в подходящие сорбирующие материалы [68]. Иммобилизация помогает регулировать высвобождение ионов серебра, повышает стабильность наночастиц, уменьшает агрегацию и позволяет повторно или долгосрочно использовать их в различных биомедицинских и экологических приложениях, таких как датчики, системы фильтрации, повязки на раны и противомикробные покрытия [69-70].

Активированный уголь и биоуголь являются одними из наиболее широко исследованных сорбентов для иммобилизации AgNP из-за их большой площади поверхности, пористой структуры и высокой адсорбционной способности. Эти материалы обеспечивают большое количество активных центров для загрузки и стабилизации наночастиц, что приводит к улучшению дисперсии и устойчивым антимикробным свойствам. Композиты из активированного угля и биоугля, функционализированные AgNP, продемонстрировали эффективность не только против микробных патогенов, но также при адсорбции и удалении красителей, тяжелых металлов и органических загрязнителей из систем сточных [68-69].

Синергетическое сочетание адсорбционных свойств и антимикробной активности делает эти композиты привлекательными для технологий экологической реабилитации и

очистки воды. Кроме того, системы на основе биоугля, полученные из сельскохозяйственных отходов, способствуют устойчивости за счет использования недорогих и возобновляемых ресурсов биомассы.

Гидрогели и биоразлагаемые полимерные матрицы представляют собой еще один важный класс сорбентов, используемых для иммобилизации AgNP. Полимеры, такие как хитозан, поливиниловый спирт (ПВС), альгинат и желатин, обычно используются из-за их биосовместимости, биоразлагаемости и способности образовывать гидратированные трехмерные сети. Включение AgNP в эти матрицы обеспечивает локализованную и контролируемую антимикробную активность, одновременно снижая прямое воздействие свободных наночастиц [69-71].

Гидрогели, наполненные AgNP, особенно перспективны для заживления ран и тканевой инженерии. Гидратированная полимерная среда сохраняет влагу в месте раны, поддерживает регенерацию тканей и обеспечивает постепенное высвобождение противомикробных агентов. Гидрогели на основе хитозана дополнительно обладают собственными антимикробными и кровоостанавливающими свойствами, что еще больше повышает эффективность лечения. Эти материалы продемонстрировали улучшенную биосовместимость, снижение цитотоксичности и пролонгированную антимикробную эффективность по сравнению с составами свободных AgNP.

Серебро образует защитный барьер против различных патогенов и микроорганизмов, включая грамотрицательные бактерии (*E. coli*), грамположительные бактерии (*S. aureus*), вирусы и грибы [72]. Сетчатая структура пептидогликанового слоя клеточной стенки определяет механическую прочность бактерий и, соответственно, влияет на степень проникновения серебра в клетки [73].

Серебряные наночастицы повреждают клеточную стенку бактерий, вызывая повреждение ДНК и подавляя размножение бактериальных клеток [74]. Благодаря малым размерам и высокому соотношению площади поверхности к объему они способны физически связываться с поверхностью микроорганизмов. AgNPs проникают через липидный бислой клеточной мембраны и нарушают ее целостность [75]. Такое повреждение приводит к образованию пор в мембране, утечке внутриклеточного содержимого и последующей гибели клетки. Исследования также показывают, что серебряные наночастицы взаимодействуют с интегральными мембранными белками, включая транспортные белки и ионные каналы, вызывая денатурацию клеточных структур. Кроме того, AgNPs способны связываться с атомами серы в ферментах и сульфгидрильными группами белков, расположенных на поверхности бактериальной клетки [76].

В исследованиях AgNP, опосредованных растениями, был оценен широкий спектр клинически значимых и пищевых патогенов. Часто тестируемые микроорганизмы включают *Escherichia coli, Staphylococcus aureus, Bacillus subtilis, Enterococcus faecium, Listeria monocytogenes* и *Pseudomonas aeruginosa*, а также представителей семейства *Enterobacteriaceae*, таких как *Klebsiella* spp. и виды *Salmonella* [77-79]. Антибактериальную эффективность обычно оценивают с помощью диффузионного анализа в агаре, измерения минимальной ингибирующей концентрации (МИК) и минимальной бактерицидной концентрации (МБК) [80-82]. Данные диаметры зон ингибирования и значения МПК значительно различаются в зависимости от растительного источника, используемого для синтеза наночастиц, и физико-химических свойств полученных AgNP.

Кинетика высвобождения ионов Ag^+ является одним из основных факторов, определяющих антимикробную эффективность и цитотоксичность серебряных нанокомпозитов. Ионы Ag^+ высвобождаются в результате постепенного окисления металлического серебра, при этом скорость их образования и диффузии зависит от размера и морфологии наночастиц, состояния их поверхности, состава стабилизирующего покрытия и матрицы нанокомпозита, а также от pH и состава окружающей среды. Для применения при лечении ран предпочтительным является контролируемое и постепенное высвобождение Ag^+, позволяющее поддерживать эффективную локальную концентрацию серебра в течение необходимого периода и уменьшать риск его накопления до цитотоксических уровней.

При этом достижение терапевтической концентрации Ag^+ без повреждения клеток кожи определяется наличием определенного терапевтического окна. Концентрации, эффективные против патогенных микроорганизмов, могут оказывать различное влияние на фибробласты и

кератиноциты в зависимости от продолжительности воздействия и особенностей конкретного нанокомпозита. Поэтому оптимизация состава серебряных нанокомпозитов должна быть направлена на обеспечение достаточной антимикробной активности при минимальном воздействии на клетки, участвующие в регенерации тканей. В связи с этим при оценке перспективности таких материалов необходимо учитывать не только суммарное количество высвобожденного серебра, но и динамику высвобождения Ag^+ во времени в сочетании с показателями антимикробной активности и клеточной жизнеспособности.

Серебряные наночастицы (AgNPs), синтезированные с использованием методов «зеленого» синтеза, демонстрируют значительный потенциал для применения в экологическом и промышленном секторах. Использование растительных экстрактов в качестве восстановителей и стабилизаторов при синтезе наночастиц представляет собой экологически безопасную, экономически эффективную и малотоксичную альтернативу традиционным химическим и физическим методам получения наноматериалов. Данный подход способствует снижению энергозатрат и минимизации образования опасных побочных продуктов, что делает его перспективным для масштабируемого промышленного производства.

Растительно-опосредованные AgNPs находят применение в технологиях очистки воды и сточных вод [83], производстве антимикробных текстильных материалов [67], упаковки пищевых продуктов [84], а также в системах дезинфекции поверхностей [85]. Высокая антимикробная активность и каталитические свойства серебряных наночастиц обеспечивают эффективное подавление микробного загрязнения в промышленных, медицинских и общественных средах. Кроме того, способность AgNPs взаимодействовать с широким спектром микроорганизмов делает их перспективными компонентами функциональных покрытий и композитных материалов.

Заключение

Зеленый синтез серебряных наночастиц представляет собой одно из наиболее перспективных направлений современной нанотехнологии, сочетающее эффективность получения функциональных наноматериалов с принципами экологической безопасности и устойчивого развития. Использование растительных экстрактов и биологических компонентов в процессах синтеза позволяет получать биосовместимые AgNPs с выраженными антимикробными свойствами при минимизации токсичных побочных продуктов и энергозатрат.

Интеграция серебряных наночастиц с различными сорбентами и матричными материалами способствует повышению их коллоидной стабильности, предотвращению агрегации и обеспечению контролируемого высвобождения ионов серебра. Такие нанокомпозитные системы характеризуются улучшенными эксплуатационными и биологическими свойствами, что значительно расширяет возможности их практического применения.

Серебросодержащие нанокомпозиты обладают высоким потенциалом в биомедицинской сфере, включая создание антибактериальных покрытий, раневых повязок, диагностических платформ, сенсорных систем и носителей для адресной доставки лекарственных препаратов. Высокая антимикробная активность AgNPs в отношении широкого спектра патогенных микроорганизмов делает их перспективными компонентами материалов нового поколения для профилактики и лечения инфекционных заболеваний.

Несмотря на достигнутые успехи, дальнейшее развитие данной области требует решения ряда научных и технологических задач, связанных со стандартизацией методов синтеза, оценкой токсикологической безопасности, изучением долгосрочного воздействия наночастиц на биологические системы и окружающую среду, а также обеспечением воспроизводимости и масштабируемости производственных процессов. Совершенствование зеленых методов синтеза и разработка безопасных и эффективных нанокомпозитных систем открывают широкие перспективы для внедрения серебряных наноматериалов в медицинскую, экологическую и промышленную практику.

Список литературы

1. Strategies for antidepressants extraction from biological specimens using nanomaterials for analytical purposes: A review / Kh. Murtada et al // Microchemical Journal. – 2019, № 150.

2. Dakova I. Polymeric Materials in Speciation Analysis Based on Solid Phase Extraction / I. Dakova, T. Yordanova, I. Karadjova // Preprints.org. – 2023. https://doi.org/10.20944/preprints202311.0998.v1.
3. Djerahov L. Self-standing chitosan film loaded with silver nanoparticles as a tool for selective determination of Cr(VI) by ICP-MS /L. Djerahov, P. Vasileva, I. Karadjova // Microchemical Journal. – 2016. – № 129. https://doi.org/10.1016/j.microc.2016.06.007.
4. Poskus V. Silver-coated monolithic silica column for separation of trans fatty acids / V. Poskus, V. Vickackaite // Separation Science Plus. – 2018. https://doi.org/10.1002/sscp.201800115.
5. Poskus V. Silver-coated monolitic silica column for separation of benzo[a]pyrene from petroleum / V. Poskus, V. Vickackaite, J. Rokaite // Chemija. – 2021. – № 32(2). https://doi.org/10.6001/chemija.v32i2.4432.
6. Returning to Nature for the Design of Sorptive Phases in Solid-Phase Microextraction / G. Mafra et al // Separations. – 2020. – № 7(1). https://doi.org/10.3390/separations7010002.
7. Advances in organic–inorganic hybrid sorbents for the extraction of organic and inorganic pollutants in different types of food and environmental samples / Ng Nyuk-Ting et al. – 2018. – № 1(1). https://doi.org/10.1002/jssc.201700689.
8. Silver Nanoparticles as a New Generation of Antimicrobial Prophylaxis / I. Garipov et al // Journal of Siberian Federal University Biology. – 2019. – № 12(3). https://doi.org/10.17516/1997-1389-0301.
9. Green nanoscience for healthcare: Advancing biomedical innovation through eco-synthesized nanoparticle / A. Ayub et al // Biotechnology Reports. – 2025. – № 47. https://doi.org/10.1016/j.btre.2025.e00913.
10. Tasleem M. Design of Short Peptides for the Reduction of Silver Ions and Stabilization of Nanocomposites in Combating Bacterial Infections / M. Tasleem, A.M. Matouk, M. Abbas // ChemBioChem. – 2025. – № 26(11): e202500122. https://doi.org/10.1002/cbic.202500122.
11. Marpu S.B. Shining Light on Chitosan: A Review on the Usage of Chitosan for Photonics and Nanomaterials Research / S.B. Marpu, E.N. Benton Shining // IJMS. – 2018. – № 19(6). https://doi.org/10.3390/ijms19061795.
12. Pedroso-Santana S. The Use of Capping Agents in the Stabilization and Functionalization of Metallic Nanoparticles for Biomedical Applications / S. Pedroso-Santana, N. Fleitas-Salazar // Particle & Particle Systems Characterization. – 2022. – № 40 (2). https://doi.org/10.1002/ppsc.202200146.
13. Potential Theranostics Application of Bio-Synthesized Silver Nanoparticles (4-in-1 System) / S. Mukherjee et al // Theranostics. – 2014. – № 4(3). https://doi.org/10.7150/thno.7819.
14. Silver Micro-Nanoparticle-Based Nanoarchitectures: Synthesis Routes, Biomedical Applications, and Mechanisms of Action / Md A. Wahab et al // Polymers. – 2021. – № 13(17). https://doi.org/10.3390/polym13172870.
15. Synthesis of Silver Nanoparticles from the Aqueous Extract of Leaves of Ocimum sanctum for Enhanced Antibacterial Activity / C. Ramteke et al // Journal of Chemistry. – 2012. – № 1. https://doi.org/10.1155/2013/278925.
16. Bio-Fabrication of Silver Nanoparticles Using Citrus aurantifolia Fruit Peel Extract (CAFPE) and the Role of Plant Extract in the Synthesis / T. Mustapha et al // Plants. – 2023. – № 12(8). https://doi.org/10.3390/plants12081648.
17. Study on Critical Micelle Concentration Influence in Green Synthesis of Silver Nanoparticles Assisted by Sapindus mukorossi Aqueous Extract / R.L. Olteanu et al // Rev. Chim. – 2018. – № 69(6). https://doi.org/10.37358/rc.18.6.6321.
18. A Review on Bioinspired and Green Synthesis of Silver Nanoparticles with Their Antimicrobial Activity / S. Roy et al // Journal of Survey in Fisheries Sciences. – 2023. – № 6. https://doi.org/10.53555/sfs.v10i1s.2147.
19. Akhtar M.S. Biogenic Synthesis of Metallic Nanoparticles by Plant Extracts. ACS Sustainable Chem /M.S. Akhtar, J. Panwar, Y.S. Yun // Eng. – 2013. – № 1(6). https://doi.org/10.1021/sc300118u.
20. Factors Influencing the Green Synthesis of Metallic Nanoparticles Using Plant Extracts: A Comprehensive Review / A. Azad et al // Pharmaceutical Fronts. – 2023. – № 05(03). https://doi.org/10.1055/s-0043-1774289.
21. Selection of Suitable Biological Method for the Synthesis of Silver Nanoparticles / M.A. Sabri et al // Nanomaterials and Nanotechnology. – 2016. – № 6. https://doi.org/10.5772/62644.

22. Antibacterial and antioxidant potential analysis of Verbascum sinaiticum leaf extract and its synthesized silver nanoparticles / J.M. Geyesa et al // Heliyon. – 2024. – № 10(2). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24215.
23. A Review on Different Plants Extract Mediated Silver Nanoparticles: Preparation, Antimicrobials, and Antioxidant / N.A. Negm et al // Egyptian Journal of Chemistry. – 2021. – № 65(5) https://doi.org/10.21608/ejchem.2021.99747.4637.
24. One-pot phytosynthesis of nano-silver from *Mentha longifolia* L.: their characterization and evaluation of photodynamic potential / B. Javed et al // Materials Research Express. – 2020. – № 7(5). https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab903b.
25. Ahsan A. Phytogenic Silver Nanoparticles Derived from Ricinus communis and Aloe barbadensis: Synthesis, Characterization, and Evaluation of Biomedical Potential / A. Ahsan, G. Gao, W. Tian // Bioengineering. – 2025. – № 12(11). https://doi.org/10.3390/bioengineering12111273.
26. Biosynthesis of Silver Nanoparticles from Eucalyptus corymbia Leaf Extract at Optimized Conditions / M.Jo. Sila et al // NHC. – 2019. – № 25. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/nhc.25.32.
27. Methylene Blue Dye Degradation Using Silver Nanoparticles Synthesized from Andographis Paniculata Leaves Extract / N. Noorafsha et al // JPRI. – 2021. – № 33 (47B). https://doi.org/10.9734/jpri/2021/v33i47b33103.
28. Ghaffari-Moghaddam M. Plant mediated green synthesis and antibacterial activity of silver nanoparticles using Crataegus douglasii fruit extract / M. Ghaffari-Moghaddam, R. Hadi-Dabanlou //Journal of Industrial and Engineering Chemistry. – 2014. – Т. 20, № 2. – P. 739-744.
29. Biosynthesis, characterisation and anti-bacterial effect of plant-mediated silver nanoparticles using Artemisia nilagirica / M. Vijayakumar et al // Industrial crops and products. – 2013. – Т. 41. – P. 235-240.
30. Green synthesis of silver nanoparticles by using Grape / Res. J. Pharm. Biol. Chem. Sci. – 2013. – Т. 4. – №. 1. – С. 1271-1278.
31. Roy K. Green synthesis of silver nanoparticles by using Grape / PC, Roy K. Biswas S. // Res. J. Pharm. Biol. Chem. – 2013. – Sci 4.1. – P. 1271-1278.
32. Microwave assisted green synthesis of silver nanoparticles using Stigmaphyllon littorale leaves, their characterization and anti-microbial activity / K.R. Kudle et al // International Journal of Nanomaterials and Biostructures. – 2013. – Т. 3, № 1. – P. 13-16.
33. Efficacy of plant-mediated synthesized silver nanoparticles against Sitophilus oryzae / A.A. Zahir et al // Journal of Biopesticides. – 2012. – Т. 5. – P. 95.
34. Biosynthesis of Cu, ZVI, and Ag nanoparticles using Dodonaea viscosa extract for antibacterial activity against human pathogens / S.C.G. Kiruba Daniel et al // Journal of nanoparticle research. – 2013. – Т. 15, № 1. – P. 1319.
35. Biosynthesis of silver nanoparticles using Cucumis prophetarum aqueous leaf extract and their antibacterial and antiproliferative activity against cancer cell lines / P.R. Meena et al // ACS omega. – 2020. – Т. 5, № 10. – P. 5520.
36. Effect of biologically synthesized silver nanoparticles on human cancer cells / A. Mishra et al // Science of Advanced Materials. – 2012. – Т. 4, № 12. – P. 1200-1206.
37. Enhanced anti-bacterial activity of biogenic silver nanoparticles synthesized from Terminalia mantaly extracts / M.S. Majoumouo et al. // International journal of nanomedicine. – 2019. – P. 9031-9046.
38. Kathiravan V. Synthesis of silver nanoparticles from Melia dubia leaf extract and their in vitro anticancer activity / V. Kathiravan, S. Ravi, S. Ashokkumar // Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. – 2014. – Т. 130. – P. 116-121.
39. Characterization, antibacterial, antioxidant, antidiabetic, anti-inflammatory and antityrosinase activity of green synthesized silver nanoparticles using Calophyllum tomentosum leaves extract / M. Govindappa et al // Results in Physics. – 2018. – Т. 9. – P. 400-408.

40. Exploiting antidiabetic activity of silver nanoparticles synthesized using Punica granatum leaves and anticancer potential against human liver cancer cells (HepG2) / R.G. Saratale et al // Artificial cells, nanomedicine, and biotechnology. – 2018. – Т. 46, № 1. – P. 211-222.
41. Pirtarighat S. Biosynthesis of silver nanoparticles using Ocimum basilicum cultured under controlled conditions for bactericidal application / S. Pirtarighat, M. Ghannadnia, S. Baghshahi // Materials Science and Engineering. – 2019. – № 98. – P. 250-255. https://doi.org/10.1016/j.msec.2018.12.090, 2-s2.0-85059348273.
42. Phytosynthesis of gold and silver nanoparticles enhance in vitro antioxidant and mitostimulatory activity of Aconitum toxicum Reichenb. rhizomes alcoholic extracts / N.A. Sutan et al // Materials Science and Engineering. – 2018. – № 93. – P. 746-758. https://doi.org/10.1016/j.msec.2018.08.042, 2-s2.0-85051968727.
43. Shape- and size-controlled synthesis of silver nanoparticles using Aloe vera plant extract and their antimicrobial activity / K. Logaranjan et al // Nano Res. Lett. – 2016. – № 11. – P. 520.
44. Rajakumar G. Larvicidal activity of synthesized silver nanoparticles using Eclipta prostrata leaf extract against filariasis and malaria vectors / G. Rajakumar, A.A. Rahuman // Acta Tropica. – 2011. – № 118. – P. 196-203.
45. Philip D. Green synthesis of gold and silver nanoparticles using Hibiscus rosa sinensis / D. Philip // Phys. E Low Dimens. Syst. Nanostruct. – 2010. – № 42. – P. 1417-1424.
46. Green Synthesis of Silver Nanoparticles Using Eucalyptus leucoxylon Leaves Extract and Evaluating the Antioxidant Activities of the Ex tract / M. Rahimi-Nasrabadi et al // Natural Product Research. – 2014. – № 28. – P. 1964-1969. https://doi.org/10.1080/14786419.2014.918124.
47. Raut R.W. Photosensitized Synthesis of Silver Nanoparticles Using Wi thania somnifera Leaf Powder and Silver Nitrate / R.W. Raut, V.D. Mendhulkar, S.B. Kashid // Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology. – 2014. – № 132. – P. 45-55. https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2014.02.001.
48. Bio synthesis of Silver Nanoparticles from Tribulus terrestris and Its Antimicrobial Activity: A Novel Biological Approach / V. Gopinath et al // Colloids and Surfaces B: Biointerfaces. – 2012. – № 96. – P. 69-74. https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2012.03.023.
49. Greener synthesis of chemical compounds and materials / O.V. Kharissova et al // R. Soc. open sci. – 2019. – № 6(11). http://dx.doi.org/10.1098/rsos.191378.
50. Chitosan-Based Polymer Nanocomposites for Environmental Remediation of Mercury Pollution / G.M. Confidence et al // Polymers. – 2023. – № 15(3). – P. 482. https://doi.org/10.3390/polym15030482.
51. Current Research on Silver Nanoparticles: Synthesis, Characterization, and Applications / S. Dawadi Katuwal et al // Journal of Nanomaterials. – 2021. – № 6. https://doi.org/10.1155/2021/6687290.
52. An antibacterial submicron fiber mat with in situ synthesized silver nanoparticles / P.J. Rivero et al // J of Applied Polymer. Sci. – 2012. – № 126(4). https://doi.org/10.1002/app.36886.
53. Anis Sh.F. Functional materials in desalination: A review / Sh.F. Anis, R. Hashaikeh, N. Hilal // Desalination. – 2019. – № 468. https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.114077.
54. Recent Advances in Porous Bio-Polymer Composites for the Remediation of Organic Pollutants / N.S. Tadayoni et al // Polymers. – 2024. – № 16(11). https://doi.org/10.3390/polym16111543.
55. Size-Controlled Silver Nanoparticles Supported by Pyrolytic Carbon from Microcrystalline Cellulose / D. Huang et al // IJMS. – 2023. – № 24(19). https://doi.org/10.3390/ijms241914431.
56. Iodine solid sorbent design: a literature review of the critical criteria for consideration /B. Riley et al // Mater. Adv. – 2024. – № 5. https://doi.org/10.1039/d4ma00266k.
57. Plant-Based Extracts as Reducing, Capping, and Stabilizing Agents for the Green Synthesis of Inorganic Nanoparticles / Z. Villagran et al // Resources. – 2024. – № 13(6). https://doi.org/10.3390/resources13060070.
58. Rus A. Silver Nanoparticles (AgNP) impregnated filters in drinking water disinfection / A. Rus, D. Leordean, P. Berce // MATEC Web Conf. – 2017. – № 137(6). https://doi.org/10.1051/matecconf/201713707007.
59. Recent Advances in the Removal of Radioactive Iodine and Iodide from the Environment / S. Patil et al // ACS EST Water. – 2023. – № 3(8). https://doi.org/10.1021/acsestwater.3c00111.

60. Hydrogel Based on Cellulose and Mangosteen Rind Extract With Antibacterial Activity: Preparation and Characterization / T. Nguyen et al // Biopolymers. – 2025. – № 116(3):e70024. https://doi.org/10.1002/bip.70024.
61. Recent Advances in Adsorptive Nanocomposite Membranes for Heavy Metals Ion Removal from Contaminated Water: A Comprehensive Review / F. Damiri et al // Materials. – 2022. – № 15(5). https://doi.org/10.3390/ma15155392.
62. Cellulose-Based Metallogels - Part 3: Multifunctional Materials / A. Mikhailidi et al // Gels. – 2023. – № 9(11). https://doi.org/10.3390/gels9110878.
63. Ahmed A. Analyzing formation of silver nanoparticles from the filamentous fungus Fusarium oxysporum and their antimicrobial activity / A. Ahmed, H. Hamzah, M. Maaroof // Turk J Biol. – 2018. – № 42(1). – P. 54-62. https://doi.org/10.3906/biy-1710-2.
64. Aloe vera extract functionalized zinc oxide nanoparticles as nanoantibiotics against multi-drug resistant clinical bacterial isolates / K. Ali et al // J. Colloid Interface Sci. – 2016. – № 472. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2016.03.021.
65. Verma A. Controllable synthesis of silver nanoparticles using Neem leaves and their antimicrobial activity / A. Verma, M.S. Mehata // Journal of Radiation Research and Applied Sciences. – 2016. – № 9(1). https://doi.org/10.1016/j.jrras.2015.11.001.
66. Lalitha A. Green synthesis of silver nanoparticles from leaf extract Azhadirachta indica and to study its anti-bacterial and antioxidant property / A. Lalitha, R. Subbaiya, P. Ponmurugan // Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci. – 2013. – № 2. https://doi.org/10.1016/j.jrras.2015.06.006.
67. Green synthesis of silver nanoparticles using *Azadirachta indica* aqueous leaf extract / S. Ahmed et al // J. Radiat. Res. Appl. Sci. – 2016. – № 9. https://doi.org/10.1016/j.jrras.2015.06.006.
68. Thepsiri J. Green synthesis of silver nanoparticles using Ageratum conyzoides for activated carbon compositing to prepare antimicrobial cotton fabric / J. Thepsiri, S. Audtarat, Th. Dasri // Nanotechnology Reviews. – 2025. – № 14. – P. 20250181. https://doi.org/10.1515/ntrev-2025-0181.
69. Silver nanoparticles with multimodal biological activities integrated into advanced material platforms for chronic wound management / J. Guan et al // Nanoscale. – 2025. – № 17(32). https://doi.org/10.1039/d5nr02066b.
70. Silver nanoparticle-infused hydrogels for biomedical applications: A comprehensive review / J. Calsis et al // Journal of the Chinese Chemical Society. – 2024. – № 72(2). https://doi.org/10.1002/jccs.202400303.
71. Sustainable Synthesis of Novel Green-Based Nanoparticles for Therapeutic Interventions and Environmental Remediation / S. Singh et al // Acs Synthetic Biology. – 2024. – № 13(7). https://doi.org/10.1021/acssynbio.4c00206.
72. Green-synthesized silver nanoparticle hydrogels for biofilm-infected wounds: Bridging sustainability and clinical translation / R.F. Muslim et al // Frontiers in Pharmacology. – 2025. – № 16. https://doi.org/10.3389/fphar.2025.1694144.
73. Gurunathan S. Biologically synthesized silver nanoparticles enhances antibiotic activity against Gram-negative bacteria / S. Gurunathan // J. Ind. Eng. Chem. – 2015. – № 29. https://doi: 10.1016/j.jiec.2015.04.005.
74. Antibacterial properties and mechanism of graphene oxide-silver nanocomposites as bactericidal agents for water disinfection / B. Song et al // Biochemistry and Biophysics. – 2016. – № 604. https://doi.org/10.1016/j.abb.2016.04.018.
75. Plant extract preparation and green synthesis of silver nanoparticles using Swertia chirata: Characterization and antimicrobial activity against selected human pathogens / M.A. Shereen et al // Heliyon. – 2024. – №10. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28038.
76. Silver Nanoparticles and Silver Ions as Potential Antibacterial Agents / A. Hamad et al // Organomet. Polym. Mater. – 2020. – № 30. https://doi.org/10.1007/s10904-020-01744-x.
77. Assessment of antioxidant, cytotoxicity, antibacterial, antifungal, and cutaneous wound healing activities of green synthesized manganese nanoparticles using Ziziphora clinopodioides Lam leaves under in vitro and in vivo condition / B. Mahdavi et al // Appl. Organomet. Chem. – 2021. – № 35. https://doi.org/10.1002/aoc.5248.
78. Bose D. Biogenic synthesis of silver nanoparticles using guava (*Psidium guajava*) leaf extract and its antibacterial activity against *Pseudomonas aeruginosa* / D. Bose, S. Chatterjee // Appl Nanosci. – 2015. – № 6. https://doi.org/10.1007/s13204-015-0496-5.

79. Patel A. Metal nanoparticles produced by plants with antibacterial properties against Staphylococcus aureus / A. Patel // Braz. J. Biol. – 2022. – № 6. – P. 82:e268052. https://doi.org/10.1590/1519-6984.268052.
80. Green Biosynthesis, Antioxidant, Antibacterial, and Anticancer Activities of Silver Nanoparticles of Luffa acutangula Leaf Extract / D. Nallappan et al // BioMed Research International. – 2021. – № 29. – P. 5125681. https://doi.org/10.1155/2021/5125681.
81. Patil S.P. Psidium guajava leaves assisted green synthesis of metallic nanoparticles: a review /S.P. Patil, P.M. Rane // Beni-Suef Univ J Basic Appl Sci. – 2020. – № 9. https://doi.org/10.1186/s43088-020-00088-2.
82. Green Synthesis of Metallic Nano-Particles and Their Potential in Bio-Medical Applications / T. Shafiq et al // Nano Biomedicine and Engineering. – 2021. – № 13(2). https://doi.org/10.5101/nbe.v13i2.p191-206.
83. Bioactive Compounds from Guava Leaves (Psidium guajava L.): Characterization, Biological Activity, Synergistic Effects, and Technological Applications / H. Huynh et al // Molecules. – 2025. – № 30(6). https://doi.org/10.3390/molecules30061278.
84. Tarannum N. Facile green synthesis and applications of silver nanoparticles: a state-of-the-art review / N. Tarannum, Divya, Y.K. Gautam // RSC Adv. – 2019. – № 9(60). https://doi.org/10.1039/C9RA04164H.
85. Comprehensive Review of Silver Nanoparticles in Food Packaging Applications / E.E. Okur et al // Int. J. Mol. Sci. – 2025. – № 26(20). https://doi.org/10.3390/ijms26209842.
86. Green synthesis of silver nanoparticles and their antibacterial effects / X. Xin et al // Front. Chem. Eng. Sec. Sustainable Process Engineering. – 2022. – № 4. https://doi.org/10.3389/fceng.2022.941240.

Сведения о финансировании

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (ИРН BR27199301 «Разработка климатически-нейтральных новых материалов, передовых технологиий и методов для защиты окружающей среды от антропогенных загрязнений и изменения климата»).

Ұ. Әмзеева[1,2*], А. Нурлыбек[2], Қ. Асқаруұлы[1], Ж. Токтарбай[1], С. Азат[1]
[1]Satbayev University, 050013, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Сәтпаев к-сі 22
[2]Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ,
050040, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Әл-Фараби даңғылы, 71
*e-mail: ulpan-92.kz@mail.ru

КҮМІС НАНОКОМПОЗИТТЕРІНІҢ ЖАСЫЛ СИНТЕЗІ ЖӘНЕ ОЛАРДЫҢ ЖАРАЛАРДЫ ЕМДЕУДЕГІ ҚОЛДАНЫЛУЫ

Бұл мақалада күміс нанобөлшектерін (AgNPs) «жасыл» синтездеудің қазіргі заманғы тәсілдері, сондай-ақ сорбенттердің негізгі түрлері, оларды модификациялау әдістері және биомедициналық қолдану перспективалары қарастырылған. Күміс нанобөлшектері (AgNPs) бактерияға қарсы, қабынуға қарсы қасиеттері айқын көрінетін ең перспективалы наноматериалдар класының бірі болып табылады. Алайда оларды алудың дәстүрлі физикалық және химиялық әдістері улы реагенттерді қолданумен, жоғары температуралармен және едәуір энергетикалық шығындармен байланысты, бұл олардың экологиялық және практикалық қолданылуын шектейді.

Осыған байланысты соңғы жылдары өсімдік экстракттарын, микроорганизмдерді және табиғи биополимерлерді қолдануға негізделген «жасыл» синтез тәсілдері қарқынды дамуда. Өсімдіктердің биологиялық белсенді қосылыстары, соның ішінде полифенолдар, флавоноидтар, терпеноидтар, қанттар және ақуыздар, күміс нанобөлшектерін түзу кезінде табиғи тотықсыздандырғыш әрі тұрақтандырғыш агенттер ретінде қызмет етеді. AgNPs-ті әртүрлі сорбциялық материалдарға иммобилизациялау ерекше қызығушылық тудырады, себебі бұл бөлшектердің агрегациясын азайтып, олардың коллоидтық тұрақтылығын арттыруға және күміс иондарының бақыланатын босап шығуын қамтамасыз етуге мүмкіндік береді. Сорбенттер негізіндегі күміс нанокомпозиттері жараларды емдеуге арналған таңғыштарда, дәрілік заттарды жергілікті жеткізу жүйелерінде, диагностикалық сенсорларда және бактерияға қарсы материалдарда жоғары әлеуетке ие.

Алынған нәтижелер «жасыл» синтез әдістері мен сорбциялық матрицаларды қолдану биомедициналық қасиеттері жақсартылған, экологиялық қауіпсіз және функционалды белсенді наноматериалдарды жасауға мүмкіндік беретінін көрсетеді.

Түйін сөздер: *күміс нанобөлшектері, жасыл синтез, нанокомпозиттер, сорбенттер, биомедицина, бактерияға қарсы материалдар.*

U. Amzeyeva[1,*], A. Nurlybek[2], K. Askaruly[1], Zh. Toktarbay[1], S. Azat[1]
[1]Satbayev University, 050013, Republic of Kazakhstan, Almaty, , Satbayev st. 22
[2]Al Farabi Kazakh National University, 050040, Republic of Kazakhstan, Almaty, al-Farabi Ave., 71
*e-mail: ulpan-92.kz@mail.ru

GREEN SYNTHESIS OF SILVER NANOCOMPOSITES AND THEIR APPLICATION IN WOUND HEALING

In this review, modern approaches to the green synthesis of silver nanocomposites are discussed, along with the main types of sorbents, their modification methods, and prospects for biomedical applications. Silver nanoparticles (AgNPs) are among the most promising classes of nanomaterials due to their pronounced antibacterial, anti-inflammatory properties. However, conventional physical and chemical methods of their synthesis involve the use of toxic reagents, high temperatures, and significant energy consumption, which limits their environmental sustainability and practical applicability.

In recent years, green synthesis approaches based on the use of plant extracts, microorganisms, and natural biopolymers have been actively developed. Bioactive plant compounds, including polyphenols, flavonoids, terpenoids, sugars, and proteins, act as natural reducing agents and simultaneously serve as stabilizing agents during the formation of silver nanoparticles.

Particular interest lies in the immobilization of AgNPs on various sorbent materials, which allows the reduction of particle aggregation, improves their colloidal stability, and ensures controlled release of silver ions. Silver nanocomposites based on sorbents demonstrate high potential for applications in wound dressings, local drug delivery systems, diagnostic sensors, and antibacterial materials.

The obtained results indicate that the use of green synthesis methods and sorbent matrices enables the development of environmentally safe and functionally active nanomaterials with enhanced biomedical properties.

Key words: *silver nanoparticles, green synthesis, nanocomposites, sorbents, biomedicine, antibacterial materials.*

Сведения об авторах

Ұлпан Әмзеева* – Сатбаев Университет, научный сотрудник лаборатории инженерного профиля, Казахский Национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан; e-mail: ulpan-92.kz@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-7193-4404.

Алия Нурлыбек – PhD докторант, Казахский Национального Университета имени Аль-Фараби, Алматы, Казахстан; e-mail: nurl_al@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9797-284X.

Кыдыр Аскарулы – PhD, ассоц.профессор, Сатбаев Университет; e-mail: k.askaruly@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8998-0409.

Жексенбек Токтарбай – PhD, ассоц.профессор, Сатбаев Университет, научный сотрудник лаборатории инженерного профиля; e-mail: zhexenbek.toktarbay@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4502-5503.

Сейтхан Азат – Сәтбаев Университеті, Инженерлік-бейінді зертханасының жетекшісі, PhD, профессор; e-mail: s.azat@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4131-0905.

Авторлар туралы мәліметтер

Ұлпан Әмзеева* – Сәтбаев Университеті, Инженерлік-бейінді зертханасының ғылыми қызметкері, Әл-Фараби атындағы қазақ Ұлттық Университеті, Алматы, Қазақстан; e-mail: ulpan-92.kz@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-7193-4404.

Алия Нурлыбек – PhD докторант, Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, Алматы, Қазақстан; e-mail: nurl_al@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9797-284X.

Кыдыр Аскарулы – PhD, ассоц.профессор, Сәтбаев Университеті; e-mail: k.askaruly@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8998-0409.

Жексенбек Тоқтарбай – PhD, қауым.профессор, Сәтбаев Университеті, Инженерлік-бейінді зертханасының ғылыми қызметкері; e-mail: zhexenbek.toktarbay@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4502-5503.

Сейтхан Азат – Сатбаев Университет, Руководитель лаборатории инженерного профиля, PhD, профессор; e-mail: s.azat@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/ 0000-0003-4131-0905.

Information about the authors

Ulpan Amzeyeva* – Satbayev University, researcher at the Engineering Laboratory, Al Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: ulpan-92.kz@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-7193-4404.

Aliya Nurlybek – PhD student, Scientific Researcher of the Research Center for Medicinal Plants, Al Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: nurl_al@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9797-284X.
Kydyr Askaruly – PhD, Associate Professor, Satbayev University; e-mail: k.askaruly@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8998-0409.
Zhexenbek Toktarbay – Satbayev University, researcher at the Engineering Laboratory; e-mail: zhexenbek.toktarbay@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4502-5503.
Seitkhan Azat – Satbayev University, Head of the Laboratory of Engineering Profile, PhD, professor; e-mail: s.azat@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4131-0905.

Поступила в редакцию 01.06.2026
Поступила после доработки 04.09.2026
Принята к публикации 07.09.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-88

CC BY 4.0
Check for updates

МРНТИ: 70.25.17

А.Р. Кажмуратов*, **И.О. Сапаргали**, **Е.Н. Есжан**, **М.С. Кунарбекова, М. Токтар**
Satbayev University, 050013, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева 22
*e-mail: aidynkazhmuratov@gmail.com

ВОЗДЕЙСТВИЕ ХОЛОДНОЙ ПЛАЗМЫ НА ВОДНУЮ СРЕДУ И ЕЁ ЗАГРЯЗНИТЕЛИ: ОБЗОР

Аннотация: *В статье представлен обзор современных возможностей холодной атмосферной плазмы (ХАП) для очистки воды. Актуальность связана с загрязнением водных объектов устойчивыми антропогенными веществами – фармацевтическими соединениями, генами антибиотикорезистентности (ARG), микропластиком, ионами тяжёлых металлов и синтетическими красителями. Рассмотрены физико-химические механизмы воздействия ХАП: генерация активных форм кислорода и азота (RONS), УФ-излучение, импульсные электрические поля, электрогидравлическая кавитация, а также концепция плазмоактивированной воды. Описаны основные конфигурации плазменных реакторов - диэлектрический барьерный разряд (ДБР), атмосферная плазменная струя (АППС) и электрогидравлический разряд (ЭГД) - с их сравнительными характеристиками. Проанализирована эффективность ХАП для четырёх классов загрязнителей. Для антибиотиков и ARG степень удаления достигает 72-99% и выше, для микропластика показаны поверхностное окисление и агломерация с одновременной деградацией сорбированных поллютантов, для тяжёлых металлов – декомплексация органо-металлических комплексов и последующее осаждение, для синтетических красителей - обесцвечивание более чем на 95%. Следует подчеркнуть, что для тяжёлых металлов и микропластика ХАП обеспечивает преимущественно трансформацию химической формы и агрегатного состояния загрязнителя, тогда как его фактическое удаление из воды достигается на последующих стадиях осаждения, коагуляции или фильтрации; безвозвратная деструкция вплоть до минерализации характерна главным образом для органических загрязнителей (антибиотики, красители). Проведён сравнительный анализ ХАП с традиционными методами (хлорирование, озонирование, УФ, биологическая очистка). Показано, что основное преимущество ХАП - синергетический многофакторный механизм, позволяющий одновременно деградировать разнородные загрязнители в сложных водных матрицах, что недостижимо для монофакторных традиционных технологий.*

Ключевые слова: *тяжёлые металлы, микропластик, антибиотики, очистка воды, холодная плазма, ДБР-реактор, RONS, сточные воды.*

ВВЕДЕНИЕ

По данным ООН, к 2030 году глобальный дефицит пресной воды может достичь 40% от текущих потребностей [1]. Совокупное влияние индустриализации, демографического роста, изменения климата и интенсификации агропромышленного комплекса систематически ухудшает качество водных источников за счёт поступления устойчивых антропогенных

©А.Р. Кажмуратов, И.О. Сапаргали, Е.Н. Есжан, М.С. Кунарбекова, М. Токтар, 2026

загрязнителей [1-3]. Особую тревогу вызывает то обстоятельство, что загрязнение водных объектов стало многокомпонентным: в одних и тех же водных матрицах одновременно присутствуют фармацевтические соединения, полимерные частицы, ионы тяжёлых металлов и синтетические органические вещества, создавая синергетические токсикологические эффекты, многократно превышающие воздействие каждого компонента по отдельности [3, 16].

Особое место среди источников загрязнения занимают сточные воды медицинских учреждений (HWW – hospital wastewater). Их состав принципиально отличается от бытовых сточных вод: наряду с органическими веществами они содержат антибиотики, цитостатики, контрастные вещества, гормональные препараты и дезинфектанты в концентрациях 1-1000 мкг/л [2, 4]. Поступая в природные водоёмы даже в субтерапевтических концентрациях, антибиотики создают в водной среде постоянное селективное давление, ведущее к отбору антибиотикорезистентных микроорганизмов и распространению генов антибиотикорезистентности (ARG) – горизонтальным переносом между бактериями различных видов [5, 6]. Всемирная организация здравоохранения в 2015 году приняла Глобальный план действий по устойчивости к противомикробным препаратам, квалифицировав антибиотикорезистентность как одну из приоритетных угроз здравоохранению XXI века [6]. Проблема ARG в водной среде усугубляется тем, что традиционные биологические методы очистки практически не удаляют их из сточных вод, лишь перераспределяя между фазами [7, 8].

Загрязнение водных объектов микропластиком – полимерными частицами размером менее 5 мм – приобрело масштаб глобального экологического кризиса. По оценке Jambeck et al. [9], ежегодно в Мировой океан поступает 4,8-12,7 млн тонн пластиковых отходов. Частицы микропластика обнаружены буквально во всех компонентах биосферы: в речной и морской воде, подземных водах, почве, атмосфере и даже в организмах животных и человека [1, 9]. Токсикологическую опасность микропластика определяет не только сам полимер, но прежде всего его способность функционировать как высокоэффективный вектор-концентратор для других поллютантов: органических загрязнителей, ионов тяжёлых металлов, полициклических ароматических углеводородов и патогенных микроорганизмов [10, 11, 12]. Концентрация ряда токсикантов на поверхности микропластика может на четыре-шесть порядков превышать их содержание в окружающей воде, что принципиально меняет оценку экотоксикологического риска [11, 12].

Загрязнение водных объектов ионами тяжёлых металлов (ртуть, кадмий, свинец, мышьяк, шестивалентный хром, медь) формируется преимущественно стоками горнодобывающей, металлургической, химической и гальванической промышленности. Тяжёлые металлы не разлагаются в окружающей среде и обладают выраженной склонностью к биоаккумуляции: концентрируясь по трофическим цепям, они достигают опасных уровней в организме человека [13, 16]. Принципиальной сложностью удаления металлов из природных вод является их преимущественное нахождение не в свободной ионной форме, а в виде стабильных органо-металлических комплексов с природными органическими веществами (NOM): гуминовыми кислотами, фульвокислотами, аминокислотами и полисахаридами. Комплексообразование с NOM кардинально снижает эффективность традиционных методов – гидроксидного осаждения, ионного обмена и коагуляции – поскольку комплексованные ионы сохраняют растворимость в широком диапазоне pH [12, 13].

Традиционные технологии водоочистки – хлорирование, озонирование, УФ-обеззараживание и биологическая очистка – разрабатывались для борьбы с иными угрозами и в значительной мере утрачивают эффективность против современных многокомпонентных загрязнений. Хлорирование при реакции с природными органическими веществами образует токсичные хлорорганические соединения – тригалогенметаны (ТГМ) и галоуксусные кислоты, являющиеся потенциальными канцерогенами [3]. Кроме того, хлорирование принципиально не способно разрушать ARG: оно инактивирует бактерии, но не уничтожает генетический материал резистентности [7]. Озонирование высокоэффективно против некоторых микропримесей, однако энергоёмко, требует сложной инфраструктуры и образует токсичные побочные продукты (броматы при наличии бромидов). УФ-обеззараживание лишено остаточного антимикробного действия и крайне неэффективно против химических

загрязнителей. Биологические методы не справляются с рефрактерными молекулами антибиотиков, фармацевтических соединений и синтетических красителей, оставляя значительную часть ARG в биомассе активного ила [3, 14, 16]. Принципиальный недостаток всех перечисленных подходов – их монофакторность: каждый метод воздействует на загрязнители единственным механизмом, что неизбежно ограничивает спектр эффективности при воздействии на сложные многокомпонентные смеси.

В этом контексте технология холодной атмосферной плазмы (ХАП) принципиально выделяется на фоне традиционных подходов. Холодная плазма представляет собой частично ионизованный газ в состоянии термодинамического неравновесия: её свободные электроны обладают высокой кинетической энергией (эффективная электронная температура ~10 000-100 000 К), тогда как ионы и нейтральные молекулы остаются при температуре, близкой к окружающей среде - как правило, не более 40-60°C [17-19]. Это фундаментальное свойство – высокая химическая реактивность при практически комнатной температуре газа – открывает возможность непосредственного контакта плазмы с обрабатываемой водой без её термического повреждения. ХАП одновременно генерирует несколько классов активных агентов: химически высокоактивные частицы (•OH, O_3 , $ONOO^-$, H_2O_2 , O•, HO_2 •), интенсивное УФ-излучение в диапазоне 200-400 нм, импульсные электрические поля, ударные волны и кавитацию [2, 17, 20]. Совместное действие этих агентов обеспечивает глубокую деградацию широкого спектра загрязнителей, что принципиально недостижимо при монофакторном подходе [21, 22].

Многофакторность механизма ХАП имеет принципиальное значение для обработки реальных сточных вод, где загрязнители присутствуют в сложных матричных системах, содержащих конкурирующие субстраты – органические вещества, карбонаты, нитраты и взвешенные частицы, – которые могут снижать эффективность монофакторных методов за счёт поглощения активных агентов. В этих условиях разнообразие механизмов воздействия ХАП является критическим преимуществом: при ингибировании одного пути деградации (например, поглощении •OH матричными органическими веществами) другие механизмы - озонолиз, прямая фотодиссоциация, электропорация – продолжают обеспечивать необходимый эффект [17, 21, 33].

Настоящая работа представляет систематический анализ возможностей технологии ХАП для обработки сложных многокомпонентных водных сред. Последовательно рассматриваются: (1) основные конфигурации плазменных реакторов и их сравнительные характеристики; (2) физико-химические механизмы плазменного воздействия; (3) эффективность ХАП против антибиотиков, ARG, микропластика, тяжёлых металлов и синтетических красителей; (4) сравнительный анализ ХАП с традиционными методами; (5) перспективы гибридных систем и промышленного масштабирования.

1. КОНФИГУРАЦИИ ПЛАЗМЕННЫХ РЕАКТОРОВ

Эффективность плазменной обработки воды в значительной мере определяется конструкцией реактора, которая задаёт характер взаимодействия плазмы с жидкостью, состав генерируемых активных частиц, их концентрацию и время жизни в водной фазе. В мировой литературе описаны три основных класса реакторов, каждый из которых обладает специфическими преимуществами, ограничениями и оптимальными областями применения [14, 15, 21].

Диэлектрический барьерный разряд (ДБР / DBD) – наиболее широко изученная и практически применяемая конфигурация для водоочистки [14, 15]. В ДБР-реакторе плазма генерируется между двумя электродами, разделёнными слоем диэлектрика (кварц, стекло, керамика, оксид алюминия), который выполняет двойную функцию: предотвращает переход нестационарного разряда в нежелательную дуговую форму и обеспечивает равномерное пространственное распределение множества микроразрядов по всей площади электродов [19, 22]. Диэлектрический барьер также определяет самоограничивающийся характер заряда, что обусловливает высокую воспроизводимость параметров процесса. ДБР-реакторы работают в двух основных режимах взаимодействия с жидкостью: с падающей плёнкой воды на поверхности электрода и с барботажем газовых пузырьков через жидкость. Режим падающей плёнки обеспечивает максимальный массообмен между плазмой и водой, тогда как барботажный режим позволяет обрабатывать большие объёмы жидкости [22, 24]. ДБР хорошо масштабируются модульным включением, демонстрируют высокую

энергоэффективность генерации O_3 и •OH и нашли наибольшее применение в задачах деградации фармацевтических загрязнителей, антибиотиков и синтетических красителей [7, 23, 24].

Атмосферная плазменная струя (АППС / APPJ) генерирует поток активированного рабочего газа, выходящий из разрядной камеры в открытое пространство и контактирующий с поверхностью воды или непосредственно погружаемый в неё [25, 26]. Данная конфигурация характеризуется исключительной гибкостью управления спектром генерируемых RONS посредством выбора рабочего газа. Аргон обеспечивает стабильный тлеющий разряд с высокой плотностью метастабильных атомов Ar* (эффективная температура 11,5 эВ), которые эффективно передают энергию молекулам воды; чистый кислород максимизирует генерацию O_3 и •OH; воздух формирует богатый набор азотсодержащих активных частиц, включая $ONOO^-$ [26, 27]. Смеси He/O_2 и Ar/O_2 позволяют оптимизировать баланс RONS для конкретных применений. АППС особенно эффективны для локализованной обработки поверхностей воды и применений, требующих точного контроля зоны воздействия, – например, в системах обеззараживания питьевой воды в малом масштабе [36, 25].

Электрогидравлический разряд (ЭГД) генерируется непосредственно в толще жидкости или на границе раздела газ-жидкость, обеспечивая максимальную плотность активных частиц непосредственно в водной фазе [28, 29]. ЭГД сопровождается комплексом физических явлений, не характерных для газофазных разрядов: сильными ударными волнами, акустической кавитацией, интенсивным УФ-излучением из плазменного канала и электромеханической деструкцией [28, 29]. Это делает ЭГД особенно эффективным для одновременного химического и механического разрушения структуры загрязнителей. Основным техническим ограничением является значительная эрозия электродов, что требует применения стойких материалов (платина, вольфрам, титан). Гибридная конфигурация с барботажем – генерация разряда в газовых пузырьках, пропускаемых через жидкость, - позволяет сочетать высокую плотность RONS с умеренной эрозией электродов и применяется в ряде пилотных установок производительностью до 10 л/мин [30, 31].

Сравнительный анализ конфигураций показывает, что ДБР наиболее предпочтителен для крупнотоннажной обработки воды с умеренно устойчивыми загрязнителями благодаря масштабируемости и воспроизводимости параметров; АППС – для локальных применений с высокой точностью управления воздействием и требованиями к мягкому режиму обработки; ЭГД – для высококонцентрированных стоков, требующих одновременного химического и механического разрушения загрязнений [14, 15, 32]. Важным направлением является разработка гибридных реакторных конфигураций, совмещающих несколько принципов генерации плазмы с целью синергетического усиления эффекта [30, 31]. Сравнительные характеристики трёх конфигураций обобщены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение основных конфигураций плазменных реакторов для водоочистки [14, 15, 21-32]

Параметр	ДБР (диэлектрический барьерный разряд)	АППС (атмосферная плазменная струя)	ЭГД (электрогидравлический разряд)
1	2	3	4
Принцип генерации	Разряд между электродами, разделёнными диэлектриком; режимы падающей плёнки или барботажа	Поток активированного газа из разрядной камеры, контактирующий с поверхностью воды или погружаемый в неё	Разряд непосредственно в толще жидкости или на границе газ-жидкость
Рабочий газ	Воздух, O_2 (наиболее энергоэффективны)	Ar, O_2, воздух, смеси He/O_2 и Ar/O_2 (гибкий выбор)	Как правило, без внешнего рабочего газа; возможен барботаж
Характерные параметры процесса	SEI 50-500 Дж/л (0,014-0,14 кВт·ч/м³) при 90%-ной деградации типовых органических загрязнителей	Мощность порядка единиц-десятков Вт (напр., 11 Вт для обесцвечивания красителя)	Производительность пилотных гибридных установок до 10 л/мин

1	2	3	4
Преимущества	Высокая воспроизводимость, модульная масштабируемость, высокая энергоэффективность генерации O_3 и •OH	Точный контроль зоны воздействия, гибкое управление спектром RONS через выбор газа	Максимальная плотность активных частиц в жидкости; сочетание химического и механического разрушения (ударные волны, кавитация, УФ)
Ограничения	Требует падающей плёнки или барботажа для эффективного массообмена	Ограничен локализованной обработкой малых объёмов/поверхностей	Значительная эрозия электродов, требующая стойких материалов (Pt, W, Ti)
Ниша применения	Крупнотоннажная обработка воды, деградация антибиотиков, красителей, фармпрепаратов	Локальная обработка поверхностей, обеззараживание питьевой воды в малом масштабе	Высококонцентрированные стоки, требующие одновременного химического и механического разрушения

2. МЕХАНИЗМЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ХОЛОДНОЙ ПЛАЗМЫ С ВОДНЫМИ СРЕДАМИ

2.1. Плазмохимические реакции и генерация RONS

Высокая эффективность ХАП в задачах водоочистки определяется синергетическим взаимодействием нескольких взаимосвязанных физических и химических механизмов, совместное действие которых принципиально превосходит возможности каждого из них в отдельности [17, 18, 22]. Центральным химическим процессом является генерация активных форм кислорода и азота (RONS) в результате взаимодействия ускоренных электронов с молекулами воды и атмосферных газов на границе раздела фаз или непосредственно в жидкой фазе [26, 33, 34].

Центральную роль в окислительном воздействии ХАП играют гидроксильные радикалы (•OH) с окислительным потенциалом ~2,8 В, превосходящим потенциал молекулярного озона (~2,07 В), пероксинитрита (~2,51 В) и хлора (~1,36 В) [25, 29]. Образование •OH происходит по нескольким конкурирующим механизмам, суммарная скорость которых зависит от состава рабочего газа, мощности разряда и состава водной матрицы:

$$H_2O + e^- \rightarrow \bullet OH + H\bullet + e^- \quad (1)$$

$$H_2O + H_2O^+ \rightarrow H_3O^+ + \bullet OH \quad (2)$$

$$H_2O + H_2O^* \rightarrow H_2O + \bullet OH + H\bullet \quad (3)$$

Принципиально важным усиливающим механизмом является фотолиз H_2O_2, накапливающегося в воде в ходе плазменной обработки, под действием собственного УФ-излучения разряда (200-280 нм) [20, 29, 34]:

$$H_2O_2 + h\nu \rightarrow 2\bullet OH \quad (4)$$

Данная реакция превращает относительно стабильный H_2O_2 в высокоактивные •OH, обеспечивая пролонгированное окислительное действие – уже после завершения разряда – и существенно снижая пороговые требования к мощности плазменной установки. При использовании атмосферного воздуха или смесей N_2/O_2 в качестве рабочего газа плазменная ионизация запускает каскад азотных превращений с образованием пероксинитрит-аниона ($ONOO^-$) – высокоактивного окислителя с выраженной биоцидной активностью, особенно в кислой среде [27, 34, 35]:

$$N_2 + O_2 + e^- \rightarrow 2NO \quad (5)$$

$$NO + \bullet OH \rightarrow HNO_2 \quad (6)$$

$$NO_2 + \bullet OH \rightarrow HNO_3 \quad (7)$$

$$O_2^- + NO \rightarrow ONOO^- \quad (8)$$

Совокупный арсенал окислителей ХАП (•OH, O_3, H_2O_2, $ONOO^-$, O•, HO_2•, NO•) охватывает широкий диапазон редокс-потенциалов и механизмов реакций: электрофильное присоединение к ненасыщенным связям, нуклеофильное замещение, одноэлектронное окисление и нитрование. Это кардинально повышает вероятность деструкции любой молекулы-мишени вне зависимости от её химической структуры [17, 22, 26]. В частности, •OH наиболее эффективны против ароматических соединений (антибиотики, красители, фенолы),

O_3 – против непредельных связей и сульфидных групп, $ONOO^-$ – против нуклеиновых кислот и аминокислот белковых оболочек бактерий [27, 33].

2.2. Физические механизмы воздействия

Наряду с химическими процессами, существенный и самостоятельный вклад в деградацию загрязнителей и инактивацию патогенных микроорганизмов вносят физические факторы, возникающие в ходе разряда. УФ-излучение плазмы в диапазоне 200-380 нм действует по трём взаимодополняющим каналам: во-первых, непосредственно разрывает химические связи органических молекул в реакциях фотодиссоциации при энергиях квантов выше соответствующего порога; во-вторых, повреждает генетический аппарат патогенных микроорганизмов через образование тиминовых димеров и одно- и двухцепочечных разрывов в молекулах ДНК; в-третьих, инициирует реакцию фотолиза H_2O_2 (уравнение 4), создавая дополнительный поток •OH [36, 37, 38]. Синергизм прямого фотохимического воздействия и косвенного – через •OH – принципиально повышает суммарную эффективность ХАП по сравнению с монофакторным УФ-облучением при тех же дозах.

Импульсные электрические поля высокой напряжённости, генерируемые разрядом у межфазной границы, индуцируют электропорацию клеточных мембран патогенных микроорганизмов. В липидном бислое мембраны при превышении критического трансмембранного напряжения (~0,5-1,0 В) образуются временные (обратимая электропорация) или необратимые (необратимая электропорация) гидрофильные поры. Временные поры используются в биотехнологии для трансфекции; необратимые – ведут к нарушению гомеостаза клетки, выходу внутриклеточного содержимого и гибели [37, 38]. Данный механизм критически важен для инактивации антибиотикорезистентных бактерий, устойчивых к химическому воздействию: электрическое поле не имеет биохимического механизма обхода и действует на все клеточные мембраны вне зависимости от наличия ARG [5, 39].

Электрогидравлический разряд генерирует интенсивные ударные волны, акустическую кавитацию и ультрафиолетовое излучение в водной среде [28, 29]. Механическое воздействие ударных волн и возникающих при их затухании сдвиговых напряжений вызывает дезинтеграцию крупных органических молекул, разрушение биоплёнок и клеточных оболочек микроорганизмов. Сопутствующая акустическая кавитация – образование, рост и схлопывание кавитационных пузырьков – создаёт локальные “горячие точки” с температурой ~5000 К и давлением ~50 МПа на наносекундном масштабе времени, значительно ускоряя термолитические реакции непосредственно в этих зонах [9, 28]. Принципиально важно, что все перечисленные физические механизмы действуют синергетически: УФ-излучение активирует фотохимические реакции, ударные волны повышают доступность загрязнителей для химического окисления путём разрушения крупных агрегатов, а электропорация облегчает проникновение активных окислителей во внутриклеточное пространство [28, 37, 38].

2.3. Трансформация физико-химических свойств воды и плазмоактивированная вода

Контакт плазмы с водой вызывает характерные, хорошо воспроизводимые изменения физико-химических параметров водной матрицы, которые одновременно являются операционными индикаторами интенсивности обработки и сами по себе способствуют деградации ряда загрязнителей [20, 34, 36]. Наиболее устойчивым и диагностически значимым эффектом является подкисление водной среды. pH снижается с нейтральных значений (6,5-7,0) до 2,5-3,5 вследствие двух параллельных процессов: накопления ионов H^+ в результате диссоциативных реакций воды с плазменными электронами и образования азотной (HNO_3) и азотистой (HNO_2) кислот при растворении оксидов азота [34, 35]. Степень подкисления зависит от состава рабочего газа и существенно выше при использовании воздуха или азота по сравнению с аргоном или чистым кислородом.

Параллельно подкислению в водной матрице нарастают концентрации активных кислородных соединений. Концентрация растворённого озона достигает 1-15 мг/л в зависимости от параметров реактора, нарастает концентрация H_2O_2 (0,01-2 ммоль/л). Окислительно-восстановительный потенциал (ОВП) воды повышается с типичных значений +100-+200 мВ для необработанной воды до +700-+900 мВ, что соответствует сильно

окислительным условиям и хорошо коррелирует с эффективностью деградации органических загрязнителей [36, 40]. Удельная электропроводность воды возрастает вследствие накопления ионов NO_3^-, NO_2^-, H^+. Все перечисленные параметры – pH, ОВП, концентрации O_3 и H_2O_2, удельная электропроводность – поддаются непрерывному мониторингу стандартными электрохимическими зондами, что открывает возможности для автоматизированного управления процессом обработки в режиме реального времени без дорогостоящего химического анализа [36, 37].

Важную роль в водоочистных системах на основе ХАП играет концепция плазмоактивированной воды (ПАВ / PAW – plasma-activated water). ПАВ представляет собой воду, предварительно обработанную плазмой и сохраняющую антимикробную и окислительную активность в течение нескольких часов или суток за счёт накопленных долгоживущих активных частиц - H_2O_2, NO_2^-, NO_3^- и $ONOO^-$ [20, 27]. Концепция ПАВ позволяет разделить во времени и пространстве стадии генерации плазмы и воздействия на загрязнители: плазменная установка может производить ПАВ в централизованном режиме, которая затем используется для обработки сточных вод децентрализованно. Биоцидная активность ПАВ определяется прежде всего $ONOO^-$, концентрация которого в кислой среде (pH 3-5) максимальна [27, 35]. Помимо изменения химического состава, контакт с плазмой воздействует и на мезоскопическую структуру самой воды. Согласно современным кластерным моделям жидкой воды (развивающим классические представления о водородно-связанных кластерах, включая модель Немети-Шераги), вода при комнатной температуре существует в динамическом равновесии между «структурированной» (кластерной) и «аморфной» фазами. He et al. показали, что ионы и активные частицы, генерируемые плазмой, термодинамически смещают это равновесие в сторону аморфного состояния уже при комнатной температуре, что проявляется в снижении поверхностного натяжения и вязкости ПАВ [51]. Это способствует дополнительному повышению смачивающей и моющей способности ПАВ, независимо от чисто химического (RONS-опосредованного) механизма воздействия.

3. ЭФФЕКТИВНОСТЬ УДАЛЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ КЛАССОВ ЗАГРЯЗНИТЕЛЕЙ

Многофакторный механизм воздействия ХАП обусловливает её результативность в отношении принципиально различных по химической природе загрязнителей. Ниже последовательно проанализирована эффективность технологии для четырёх приоритетных классов загрязнений водных объектов; сводные количественные показатели по всем классам представлены в таблице 2.

3.1. Деградация антибиотиков, ARG и фармацевтических соединений

Антибиотики сочетают в себе уникальную комбинацию свойств, делающую их трудноудаляемыми загрязнителями: высокую биологическую активность в малых концентрациях, химическую стойкость к биодеградации и способность создавать ARG даже на субтерапевтических уровнях воздействия. В HWW их концентрации достигают 1-1000 мкг/л [2, 4, 7]. Основные классы антибиотиков, обнаруживаемых в HWW, включают фторхинолоны (ципрофлоксацин, офлоксацин), β-лактамы (амоксициллин, цефуроксим, ампициллин), сульфаниламиды (сульфаметоксазол, сульфадиазин) и тетрациклины [7, 16]. Рефрактерные молекулярные структуры этих соединений – β-лактамное ядро, флуоренциллиновые и тетрациклиновые фрагменты, ароматические гетероциклы – устойчивы к биодеградации и лишь частично удаляются традиционными методами очистки [7, 8]. При этом даже неполная деградация антибиотиков может формировать промежуточные продукты, сохраняющие антибиотикорезистентный потенциал [41].

Деградация антибиотиков под воздействием ХАП является многостадийным процессом. На начальном этапе •OH и O_3 осуществляют первичную окислительную атаку на хромофорные и функциональные группы молекул, ответственные за биологическую активность. Для фторхинолонов наиболее уязвимыми являются пиперазиновое кольцо и карбоксильная группа, определяющие связывание антибиотика с бактериальной ДНК-гиразой; для β-лактамов – β-лактамное кольцо. Расчёты методом теории функционала плотности (DFT) позволили предсказать сайты первичной атаки •OH на молекулах тетрациклина, сульфадиазина и ципрофлоксацина в соответствии с распределением электронной плотности [8]. Последующие реакции ведут к фрагментации ароматических систем, разрыву гетероциклических структур и образованию промежуточных продуктов с

пониженной биологической активностью; завершающий этап – полная минерализация до CO_2 , H_2 O и неорганических анионов [7, 8, 23]. Принципиально важно, что конечные продукты деградации лишены биологической активности, что подтверждено *in vitro* тестами на индикаторных культурах [4, 41].

Таблица 2 – Сводная эффективность ХАП по четырём классам загрязнителей (по данным цитируемых первичных исследований)

Загрязнитель	Тип реактора / условия	Степень удаления / эффективность	Источник
Антибиотики, ARG и фармацевтические соединения			
Ципрофлоксацин, цефуроксим	ДБР, pH 10, 15 мин, 30 кВ, HWW	Практически полное удаление	[4]
Офлоксацин, амоксициллин	ДБР, те же условия, HWW	>72%	[4]
Амоксициллин + сульфаметоксазол	ДБР с падающей плёнкой, 10 мг/л	Полувремя деградации 4-9 мин	[24]
Сульфаметоксазол	ДБР с падающей плёнкой	>99%	[24]
Пентоксифиллин	ДБР, 60 мин, кислородная плазма	92,5% (энергетический выход 16 г/кВт·ч)	[23]
Ибупрофен	ДБР, аналогичные условия	90% (энергетический выход 20,2 г/кВт·ч)	[42]
Микропластик			
Диклофенак, триметоприм (сорбированные на МП ПЭ)	Плазменная обработка частиц ПЭ 10-45 мкм	>98%	[43]
Сульфаметоксазол (сорбированный на МП ПЭ)	Плазменная обработка частиц ПЭ	99,99%	[43]
Модифицированный МП + коагулянт (Al^{3+}/Fe^{3+})	ХАП + коагуляция/флокуляция	95-99% удаление	[11, 12]
Частицы ПП и ПЭНП	ХАП (O_2, N_2, смесь), 30 мин	Убыль массы 3-10%; индекс карбонила 1,4→3,1–4,1	[11]
Тяжёлые металлы			
Cu(II)-гуминовые кислоты	Нетермическая плазма, 16 кВт, 50 мин	Декомплексация 86,1%	[13]
Тяжёлые металлы (промышленные стоки)	Плазменная декомплексация + коагуляция	>95% извлечение	[13]
Синтетические красители			
Acid Blue 25	АППС, Ar, 11 Вт, 25 мг/л, 5 мин	~87% обесцвечивания	[25]
Метиленовый синий	Плазма-жидкость система	$k_{обс}$ = 0,05-0,5 $мин^{-1}$ (псевдо-первый порядок)	[44]
Текстильные азокрасители	ДБР-реакторы	>95% обесцвечивания	[44, 45]

Экспериментальные данные, полученные на реальных HWW со сложным матричным составом, подтверждают высокую практическую эффективность ХАП. При оптимальных условиях (pH 10, время 15 мин, напряжение 30 кВ, межэлектродное расстояние 10 мм) ципрофлоксацин и цефуроксим практически полностью удалены, тогда как офлоксацин и амоксициллин снижены более чем на 72% [4]. Применение ДБР-реактора с падающей плёнкой для деградации смеси амоксициллина и сульфаметоксазола в концентрации 10 мг/л показало, что оба антибиотика разлагаются с полувременем 4-9 мин; применение кислорода вместо воздуха значительно повышает энергетический выход [24]. Деградация сульфаметоксазола в ДБР-реакторе с падающей плёнкой достигает >99% при оптимальных условиях [24]. Деградация пентоксифиллина в ДБР-реакторе достигает 92,5% за 60 мин при режиме кислородной плазмы с энергетическим выходом 16 г/кВт·ч [23]; деградация

ибупрофена в аналогичных условиях достигает 90% с энергетическим выходом 20,2 г/кВт·ч [42].

Кинетика деградации антибиотиков описывается реакцией псевдо-первого порядка; наблюдаемая константа скорости зависит от молекулярной структуры соединения, определяющей его реакционную способность с •OH, O_3 и $ONOO^-$. Анализ структуры - реакционная способность показывает, что соединения с электронодонорными заместителями (аминогруппы, гидроксильные группы), ненасыщенными связями и ароматическими фрагментами деградируют быстрее, чем алифатические соединения с электроноакцепторными группами [8, 41]. Это позволяет прогнозировать эффективность ХАП на основе молекулярной структуры загрязнителя без проведения дорогостоящих экспериментов.

Принципиально важным аспектом применения ХАП для HWW является её воздействие не только на молекулы антибиотиков, но и на ARG и антибиотикорезистентные бактерии. Несмотря на то что бактерии в HWW нередко несут множественную антибиотикорезистентность - являясь устойчивыми к действию большинства применяемых антибиотиков и дезинфектантов, - ХАП инактивирует их посредством механизмов, не имеющих биохимических путей обхода: окислительного повреждения клеточной мембраны, ДНК и белков, а также электропорации [5, 38, 39]. Как отмечено в обзорной работе Courti et al. (2022), нетермическая атмосферная плазма (NTAPP) рассматривается как перспективная технология для деградации генов антибиотикорезистентности (ARG) в сточных водах [5]. Это делает ХАП технологией, одновременно устраняющей и химическое загрязнение (молекулы антибиотиков), и биологическую угрозу, что принципиально недостижимо для монофакторных методов [5, 6].

3.2. Воздействие на микропластик

Загрязнение водных объектов микропластиком (МП) представляет многоуровневую экологическую проблему, масштаб которой обусловлен сочетанием нескольких факторов: глобальным распространением, практической нераспадаемостью в природных условиях на масштабах десятилетий и столетий, способностью концентрировать другие поллютанты, а также непрерывным дроблением на всё более мелкие фракции вплоть до нанометрового масштаба [9, 10]. Ежегодно в Мировой океан поступает 4,8-12,7 млн тонн пластиковых отходов; значительная его доля, не попавшая в систему управления отходами, деградирует в окружающей среде с образованием МП [9]. Частицы МП обнаружены буквально во всех компонентах гидросферы: от высокогорных озёр до абиссальных желобов, от арктических льдов до тропических коралловых рифов [10]. Высокое отношение поверхность/объём и выраженная гидрофобность делают МП мощными концентраторами гидрофобных органических загрязнителей (ПАУ, ПХБ, пестициды, фармацевтические соединения), ионов тяжёлых металлов и патогенных микроорганизмов [10, 11]. Концентрация органических поллютантов на поверхности МП может превышать их содержание в окружающей воде на четыре-шесть порядков, что делает МП высокоэффективными векторами доставки загрязнителей к гидробионтам [9, 11].

Воздействие ХАП на МП реализуется через механизм поверхностной химической модификации, не имеющий аналогов в традиционных методах очистки. Активные кислородные частицы (O_3, •OH, O, O_2^-) атакуют поверхностные атомы углерода полимерной матрицы, разрывая C-H и C-C связи и формируя гидрофильные функциональные группы: карбонильные (C=O), карбоксильные (-COOH) и гидроксильные (-OH) [11, 12, 43]. Эта трансформация поверхностной химии подтверждена методами инфракрасной спектроскопии (FTIR) и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (XPS): индекс карбонила ($CI = I_{1720}/I_{1020}$), характеризующий степень окисления поверхности, закономерно возрастает с увеличением времени плазменной обработки [12, 43]. Повышение полярности поверхности существенно изменяет межчастичные взаимодействия: силы Ван-дер-Ваальса и водородные связи между окисленными частицами усиливаются, что приводит к их агломерации и образованию крупных агрегатов, легко удаляемых стандартными методами – гравитационной седиментацией или фильтрацией [43]. Степень агломерации прямо зависит от времени плазменной обработки и удельной вводимой мощности, что позволяет управлять процессом [43]. Сама по себе плазменная обработка не удаляет МП из воды, а лишь модифицирует его поверхностные свойства и агрегатное состояние; фактическое отделение МП из водной фазы

обеспечивается последующей седиментацией, коагуляцией или фильтрацией, то есть ХАП в данном случае выступает как стадия подготовки, а не как самостоятельный метод удаления.

Принципиальное практическое значение имеет способность ХАП одновременно решать проблему МП как носителя и сорбированных на нём поллютантов в ходе единой технологической операции. Wypart-Pawul et al. [43] экспериментально подтвердили, что плазменная обработка частиц полиэтилена (ПЭ) размером 10-45 мкм в присутствии фармацевтических загрязнителей обеспечивает степень удаления диклофенака и триметоприма >98%, а сульфаметоксазола – 99,99% с поверхности частиц ПЭ. При этом МП подвергается агломерации (облегчая последующее механическое отделение), а сорбированные фармацевтические соединения деградируют in situ – без предварительного десорбционного этапа [43]. Этот результат демонстрирует ключевое системное преимущество ХАП: возможность одновременного устранения полимерного носителя и транспортируемых им загрязнителей без разделения матрицы. Дополнительно установлено, что плазменная обработка улучшает коагуляцию и флокуляцию модифицированного МП с последующим коагулянтом: окисленные поверхностные группы активно взаимодействуют с коагулянтами на основе Al^{3+} и Fe^{3+}, повышая эффективность его удаления до 95-99% [11, 12].

Velasquez и соавт. [11] впервые продемонстрировали, что ХАП (кислород, азот и смесь) деградирует частицы ПП и ПЭНП на 3-10% по массе за 30 мин обработки с видимыми трещинами и полостями на поверхности партикул. Важно, что ПП деградировался эффективнее, чем ПЭНП, а смесь газов оказалась наиболее эффективной, тогда как окислительные реакции трансформируют их поверхностную химию. Для частиц ПП и ПЭНП (цепочный полиэтилен) после 30-минутной ХАП-обработки индекс карбонила (CI) вырос с 1,4 до 3,1-4,1 для ПП, что указывает на значительное поверхностное окисление, подтверждённое методом FTIR [11]. Параллельная деградация загрязнителей, сорбированных на МП, подтверждает синергетическое действие механических и химических факторов ХАП в данных системах.

3.3. Удаление тяжёлых металлов

Загрязнение водных объектов тяжёлыми металлами – ртутью, кадмием, свинцом, мышьяком, шестивалентным хромом и медью – создаёт долгосрочные экологические угрозы ввиду нераспадаемости металлов в окружающей среде, их склонности к биоаккумуляции и кумулятивной токсичности [13, 16]. Принципиальная сложность удаления металлов из природных вод обусловлена преимущественным нахождением значительной их доли не в свободной ионной форме, а в составе стабильных органо-металлических комплексов с природными органическими веществами (NOM): гуминовыми кислотами (молекулярная масса 2000-80 000 Да), фульвокислотами (300-2000 Да), аминокислотами и полисахаридами. Комплексообразование с NOM обусловлено образованием координационных связей между ионами металлов и электронодонорными группами NOM – карбоксильными, фенольными, аминогруппами и тиольными группами [12, 13]. В результате комплексованные ионы металлов сохраняют растворимость и отрицательный поверхностный заряд в широком диапазоне pH, что делает их практически инертными к стандартному гидроксидному осаждению (требующему свободных катионов), коагуляции и ионному обмену.

Нетермическая плазменная обработка преодолевает ограничение NOM-комплексообразования, реализуя двухстадийную схему удаления металлов. На первом, ключевом этапе – окислительной декомплексации – высокоактивные кислородные частицы (O_2^-, •OH, $^1O_2$) атакуют функциональные группы лигандов NOM, разрывая координационные связи металл-лиганд. Механизм детально изучен на примере системы Cu(II)-гуминовые кислоты: нетермическая плазменная обработка при мощности 16 кВ обеспечила декомплексацию 86,1% Cu(II) за 50 мин, тогда как традиционные методы – озонирование, УФ-облучение и реагентное окисление – показали существенно меньшую эффективность при сопоставимых энергозатратах [13]. Плазменное окисление NOM сопровождается образованием малых органических кислот (уксусная, муравьиная, щавелевая) и CO_2 в результате минерализации, что дополнительно снижает сорбционную ёмкость NOM в отношении металлов. На втором этапе высвобождённые свободные ионы металлов переводятся в нерастворимые формы путём pH-регулирования, коагуляции или

сорбции, с последующим отделением фильтрацией или центрифугированием [12, 13]. Таким образом, ХАП трансформирует их химическую форму (декомплексация, изменение степени окисления), тогда как непосредственное удаление из водной фазы достигается исключительно на второй, постплазменной стадии физического отделения.

Помимо декомплексации, ХАП изменяет степень окисления ряда металлов, переводя их в более безопасные или более легко удаляемые формы. Токсичный мышьяк As(III), плохо задерживаемый большинством сорбентов, окисляется до As(V), который эффективно сорбируется на поверхности гидроксидов железа(III), широко применяемых в качестве коагулянтов: константа адсорбции As(V) на $Fe(OH)_3$ на 2-3 порядка превышает аналогичный показатель для As(III) [13]. Шестивалентный хром Cr(VI), обладающий канцерогенным потенциалом и высокой растворимостью, восстанавливается до значительно менее токсичного Cr(III), легко осаждаемого в форме $Cr(OH)_3$ при pH > 7 [13]. Аналогичная трансформация описана для Fe(III)/Fe(II) и Mn(IV)/Mn(II): варьируя состав рабочего газа и pH среды, можно целенаправленно управлять направлением окислительно-восстановительных реакций, переводя металлы в оптимальные для последующего удаления формы. Совмещение плазменной декомплексации и трансформации степени окисления с коагуляцией (введение Fe^{3+} /Al^{3+}) образует перспективный класс плазменно-коагуляционных систем, обеспечивающих суммарное извлечение металлов >95% из реальных промышленных стоков [13].

3.4. Деградация синтетических красителей и органических загрязнителей

Синтетические красители – одни из наиболее экологически опасных и трудноудаляемых загрязнителей промышленных сточных вод. Глобальный объём их производства превышает 700 000 тонн в год; значительная доля поступает в водные объекты с плохо очищенными стоками текстильных, кожевенных, бумажных и пищевых предприятий [25, 44]. Многие синтетические красители, в особенности азо- и антрахиноновые соединения, обладают мутагенными и канцерогенными свойствами, являются персистентными в природных условиях и ингибируют процессы биологической очистки, нарушая жизнедеятельность микроорганизмов активного ила [25, 45]. Высокая химическая стойкость ароматических хромофорных групп, обеспечивающих интенсивную окраску, является одновременно причиной их устойчивости к биодеградации и фотолизу в природных условиях.

Механизм деградации азокрасителей под воздействием ХАП включает несколько последовательных стадий. На начальном этапе •OH и O_3 атакуют азо-группу (-N=N-) – хромофорный центр молекулы, отвечающий за интенсивную окраску. Разрыв азо-группы сопровождается обесцвечиванием раствора и образованием ароматических аминов (анилин и его производные), которые на следующей стадии деградируют за счёт гидроксилирования и разрыва ароматического кольца [25, 44]. Полная минерализация завершается образованием CO_2 , H_2O, NO_3^- и SO_4^{2-} [25, 44, 45]. Для антрахиноновых красителей ключевым этапом является гидроксилирование и разрыв хинонового кольца под действием •OH; образующиеся хиноны далее окисляются до алифатических кислот [44, 45]. Катионные красители (в частности, метиленовый синий и кристаллический фиолетовый) деградируют несколько быстрее анионных, поскольку лучше взаимодействуют с поверхностными зарядами на границе раздела фаз [44].

Экспериментальные данные демонстрируют высокую эффективность ХАП против широкого спектра красителей. При обработке Acid Blue 25 с помощью аргоновой АППС достигается ~87% обесцвечивания за 5 мин при мощности 11 Вт и начальной концентрации 25 мг/л [25]. Для метиленового синего в системе плазма-жидкость кинетика деградации описывается псевдо-первым порядком с константой kобс = 0,05-0,5 $мин^{-1}$ в зависимости от мощности разряда, pH и начальной концентрации красителя [44]. Деградация текстильных азокрасителей в ДБР-реакторах демонстрирует высокую эффективность обесцвечивания [44, 45]. ХАП эффективна и против стойких органических загрязнителей (СОЗ): диоксинов, хлорфенолов, нитрозаминов, полифторалкильных соединений (PFAS) – класса «вечных загрязнителей», практически не разрушаемых биологическими методами [21, 45].

4. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ХАП С ТРАДИЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ ВОДООЧИСТКИ

Для обоснованного позиционирования ХАП как технологии водоочистки необходим её системный сравнительный анализ с традиционными и современными конкурирующими

методами. Данный анализ позволяет выявить абсолютные и относительные преимущества ХАП, а также определить наиболее перспективные ниши её применения.

По механизму воздействия все методы очистки воды от органических загрязнителей можно разделить на три категории: биологические (активный ил, анаэробное сбраживание), физические (мембранная фильтрация, адсорбция) и химические/физико-химические (хлорирование, озонирование, ультрафиолетовое облучение, расширенные процессы окисления – АОП). ХАП относится к классу АОП, объединяющих методы, основанные на генерации высокоактивных •OH in situ. Другие АОП включают озонирование (O_3), O_3 /УФ, H_2O_2 /УФ, реакцию Фентона (Fe^{2+} /H_2O_2), фото-Фентона и гетерогенный фотокатализ (TiO_2 /hv) [15, 21].

Сравнение ХАП с озонированием выявляет следующие различия. Озонирование высокоэффективно против ряда микропримесей, однако O_3 является монофакторным окислителем с ограниченным спектром действия: соединения без ненасыщенных связей или ароматических фрагментов (например, атразин, некоторые PFAS) озонируются медленно. ХАП, в отличие от озонирования, одновременно генерирует •OH, O_3, $ONOO^-$ и физические факторы воздействия, что обеспечивает более широкий спектр деградации [17, 21]. Озонирование при наличии бромида формирует токсичный бромат; ХАП при отсутствии хлора и бромида в воде не образует галогенорганических побочных продуктов [2, 3]. По удельным энергозатратам современные ДБР-реакторы на уровне 0,05-0,5 кВт·ч/м³ при 90%-ной деградации типичных органических загрязнителей сопоставимы с озонированием, при этом не требуя закупки и хранения газообразного озона [15, 30].

Сравнение с реакцией Фентона ($Fe^{2+} + H_2O_2 \rightarrow Fe^{3+} + •OH + OH^-$) показывает, что оба метода основаны на генерации •OH, однако Фентон требует дополнительных реагентов (Fe^{2+} и H_2O_2), генерирует железосодержащий шлам и эффективен только в кислой среде (pH 2-4). ХАП генерирует •OH из воды и воздуха без внешних реагентов и действует в широком диапазоне pH [3, 17]. Фотокаталитические методы (TiO_2 /УФ) обеспечивают высокую минерализацию органики, но требуют прозрачных растворов, легко инактивируются матричными компонентами воды (сульфаты, карбонаты, NOM) и не действуют на микропластик и тяжёлые металлы. ХАП при взаимодействии с фотокатализатором демонстрирует синергетическое усиление: плазменное УФ-излучение активирует TiO_2 без внешних ртутных ламп, а электроны из плазмы захватываются поверхностью TiO_2, снижая рекомбинацию электрон-дырка [46, 47].

По сравнению с мембранными методами (нанофильтрация, обратный осмос) ХАП, строго говоря, является не методом разделения, а деструкции: она уничтожает загрязнители, а не концентрирует их в ретентате. Обратный осмос даёт чистый пермеат, но формирует концентрат, требующий утилизации; ХАП устраняет загрязнители безвозвратно. Перспективная интеграция ХАП с нанофильтрацией: плазменная предобработка деградирует микропримеси, недостаточно задерживаемые мембранами (молекулярная масса ниже границы отсечения), а мембрана удаляет высокомолекулярные фрагменты [15, 32].

Принципиальное конкурентное преимущество ХАП – единственный среди известных методов механизм, позволяющий одновременно деградировать органические загрязнители (антибиотики, красители, фармацевтические соединения), инактивировать ARG, модифицировать и агломерировать микропластик, декомплексировать органо-металлические комплексы тяжёлых металлов и инактивировать патогенные микроорганизмы в ходе единой технологической операции без добавления реагентов [2, 17, 21]. Этот многоцелевой потенциал особенно ценен для обработки HWW, где все перечисленные классы загрязнителей присутствуют одновременно. Характер воздействия ХАП на разные классы загрязнителей отличается: для органических соединений (антибиотики, красители, фармацевтические вещества) ХАП обеспечивает истинную деструкцию вплоть до минерализации, тогда как для тяжёлых металлов и микропластика эффект носит гибридный характер трансформации плазмой и последующим физическим отделением. Необходимо также подчеркнуть, что представленные показатели эффективности получены преимущественно в модельных растворах или при благоприятных лабораторных условиях: в реальных сточных водах со сложным матричным составом (высокие концентрации карбонатов, взвешенных веществ и NOM, конкурирующих с целевыми загрязнителями за

активные частицы) эффективность ХАП, как правило, ниже модельных значений, а при высокой мутности или значительной буферной ёмкости матрицы деградация может протекать значительно медленнее и не достигать практически значимых показателей. Экономические ограничения промышленного масштабирования – капитальные затраты на источники питания и электроды, эксплуатационные затраты на электроэнергию и обслуживание подверженных эрозии электродов – также остаются количественно недостаточно охарактеризованными (см. раздел 5.2).

5. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ И МАСШТАБИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ

5.1. Гибридные системы водоочистки

Интеграция ХАП с другими методами в гибридных системах позволяет использовать синергетические эффекты между компонентами, повышая суммарную эффективность очистки при одновременном снижении удельных энергозатрат по сравнению с каждым методом в отдельности [14, 30, 31].

Система «ХАП + биологическая очистка» реализует концепцию последовательной двухступенчатой обработки, в которой плазменная предобработка трансформирует труднобиоразлагаемые молекулы антибиотиков, красителей и фармацевтических соединений в более простые органические фрагменты с повышенной биодоступностью для микроорганизмов активного ила [7, 30]. Это позволяет сократить время аэрации и объём биореактора при сохранении высокой степени очистки. Система «ХАП + адсорбция на активированном угле» сочетает окислительную деструкцию плазмы с высокой сорбционной ёмкостью угля в отношении гидрофобных соединений; при этом плазменная постобработка или предобработка угля регенерирует насыщенный сорбент, восстанавливая его ёмкость [31, 36]. Экономическая привлекательность данной схемы определяется значительным удлинением жизненного цикла сорбента.

Плазменно-фотокаталитические системы используют синергию плазменного УФ-излучения широкого спектра (200-400 нм) с фотокаталитической активностью полупроводниковых материалов (TiO_2 , ZnO, g-C_3 N_4). Zhou et al. [47] продемонстрировали, что добавление TiO_2 -плёнки к плазменному реактору снижает время 99,9%-ной инактивации E. coli с 4 мин (чистая плазма O_2) до 1 мин (плазма + TiO_2), что соответствует четырёхкратному ускорению кинетики. Raji et al. [46] подтвердили, что комбинация плазменной струи с TiO_2 -/Cu-TiO_2 -нанокатализаторами обеспечивает значительно более высокую суммарную концентрацию •OH, чем каждый компонент по отдельности. Плазменно-коагуляционные системы, в которых декомплексация металлов плазмой совмещается с коагуляционным осаждением, обеспечивают извлечение металлов >95% из реальных стоков [13].

Системы с активацией персульфатов (PMS – пероксимоносульфат, PDS - пероксидисульфат) плазменным разрядом представляют одно из наиболее перспективных направлений. Плазменные электроны и УФ-излучение инициируют гомолиз связей S-O в персульфате, генерируя SO_4 •⁻ -радикалы с окислительным потенциалом 2,5-3,1 В и временем жизни значительно большим, чем у •OH [24, 31]. Уникальность SO_4 •⁻ состоит в его избирательности: он предпочтительно реагирует с электронодонорными функциональными группами (аминогруппы, двойные связи), что позволяет деградировать специфические загрязнители даже в присутствии матричных органических веществ-конкурентов. Bilea et al. [24] установили, что в ДБР-реакторе с падающей плёнкой амоксициллин и сульфаметоксазол разлагаются с полувременем 4-9 мин; применение кислорода повышает энергетический выход в два раза по сравнению с воздухом за счёт более эффективного образования ROS. Выбор оптимальной гибридной схемы определяется составом загрязнений, требуемой степенью очистки и ресурсными ограничениями.

5.2. Масштабирование, оптимизация и промышленные перспективы

Пилотные проточные установки производительностью 1-100 л/мин, разработанные рядом исследовательских групп, подтвердили техническую реализуемость масштабирования ХАП от лабораторного к предпромышленному масштабу [30, 32]. Ключевым инженерным решением является модульная архитектура реактора: параллельное включение стандартизированных ДБР-модулей с едиными блоками питания и системой управления позволяет наращивать производительность пропорционально числу модулей без изменения

базовой конструкции и без существенной деградации удельных параметров обработки [14, 30].

Наиболее обоснованными первоначальными промышленными нишами для ХАП являются: (1) обезвреживание HWW - относительно небольшой объём (50-500 м³/сут для средней больницы) в сочетании с высокой концентрацией специфических загрязнителей (антибиотики, цитостатики, ARG) и высокой экологической ценностью результата; (2) доочистка сточных вод фармацевтических предприятий; (3) обеззараживание воды в малых децентрализованных системах водоснабжения; (4) предобработка сточных вод перед биологической очисткой для повышения биоразлагаемости рефрактерных соединений [2, 30, 32]. Размещение компактного плазменного реактора на выходе из больничных очистных сооружений непосредственно перед сбросом в городскую канализацию обеспечивает надёжное удаление антибиотиков и ARG в точке образования загрязнения – принципиально более эффективный подход по сравнению с попыткой удаления уже разбавленного и деградировавшего загрязнения на городских очистных станциях [2, 4, 5].

По критерию удельных энергозатрат ХАП конкурентоспособна с традиционными АОП. Для достижения 90%-ной деградации типичных органических загрязнителей (антибиотики, красители) ДБР-реакторы требуют SEI 50-500 Дж/л (0,014-0,14 кВт·ч/м³), что сопоставимо с озонированием при значительно большем числе одновременно устраняемых загрязнителей [15, 30]. Вместе с тем систематическое сравнение удельной энергии (kWh/m³) и энергетического выхода (g/kWh) между различными типами плазменных реакторов (ДБР, АППС, ЭГД), а также данные по капитальным (CAPEX) и эксплуатационным (OPEX) затратам в первичной литературе представлены фрагментарно и нуждаются в систематизации; это следует рассматривать как открытый пробел, ограничивающий обоснованную оценку экономической конкурентоспособности ХАП при промышленном масштабировании. При использовании электроэнергии из возобновляемых источников углеродный след технологии минимален, что соответствует принципам зелёной химии и целям устойчивого развития ООН [2, 19, 21].

Важным аспектом является оптимизация рабочих параметров ХАП для конкретных типов загрязнений. Состав рабочего газа принципиально влияет на соотношение генерируемых RONS: воздух максимизирует образование $ONOO^-$ и нитратов (преимущество при обеззараживании); кислород – концентрации O_3 (преимущество при деградации красителей и фармацевтических соединений); аргон и гелий – плотность метастабильных атомов (преимущество при локализованной обработке) [3, 26, 35]. Начальный pH и содержание NOM в обрабатываемой воде оказывают существенное влияние: NOM выступает скавенджером •OH, снижая эффективность окисления целевых загрязнителей, что необходимо учитывать при проектировании систем для обработки природных поверхностных вод с высоким содержанием NOM [13, 36].

С точки зрения экологической безопасности технологии, принципиально важен вопрос о составе продуктов деградации. ХАП не генерирует токсичных хлорорганических соединений при отсутствии хлора в обрабатываемой воде. Продукты деградации антибиотиков – алифатические карбоновые кислоты, CO_2, H_2O и неорганические анионы – лишены биологической активности [4, 41]. Тем не менее при деградации азокрасителей на промежуточных стадиях могут образовываться ароматические амины, часть из которых обладает мутагенными свойствами [25, 44]. Аналогичная проблема характерна и для деградации антибиотиков: несмотря на то что конечные продукты (алифатические кислоты, CO_2, H_2O) лишены биологической активности, отдельные промежуточные продукты деградации тетрациклина и других антибиотиков сохраняют остаточную токсичность, что подтверждено данными биотестирования [41, 49]. Отдельного внимания заслуживает риск образования нитрозаминов – потенциально канцерогенных соединений, способных формироваться при взаимодействии азотсодержащих активных частиц ХАП с аминосодержащими органическими веществами матрицы, а не только присутствующих в воде как самостоятельный класс СОЗ. Накопление нитратов и нитритов (раздел 2.3) при использовании воздуха или азота в качестве рабочего газа также требует контроля, поскольку превышение нормативов ВОЗ по содержанию NO_3^-/NO_2^- в питьевой воде может ограничивать применимость обработанной воды без дополнительной доочистки [50].

Наконец, остаточные RONS в очищенной воде (в первую очередь H_2O_2) могут потребовать отдельной стадии нейтрализации перед сбросом или повторным использованием. Полная минерализация в режиме ХАП с высокими удельными энергозатратами устраняет эту проблему, однако увеличивает стоимость обработки. Решением является комбинирование ХАП с биологической доочисткой промежуточных продуктов [30, 32]. Дальнейшие исследования должны быть направлены на систематическую оценку токсичности промежуточных и конечных продуктов деградации различных классов загрязнителей методами биотестирования. Следует отметить методологическое ограничение настоящего обзора: отбор и анализ источников не опирался на формализованную PRISMA-подобную методологию систематического поиска, и количественный мета-анализ представленных данных не проводился. Приведённые показатели эффективности и энергозатрат заимствованы непосредственно из данных, представленных авторами первичных исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённый систематический анализ научной литературы убедительно подтверждает, что холодная атмосферная плазма представляет качественно иной класс технологий водоочистки по сравнению с традиционными методами. Её принципиальное преимущество состоит не в более высоком значении какого-либо одного параметра, а в многофакторном синергетическом механизме воздействия: одновременной генерации нескольких классов окислителей с различными потенциалами и специфичностью (•OH, O_3, H_2O_2, $ONOO^-$) в сочетании с физическими процессами (УФ-излучение, электропорация, ударные волны, кавитация). Этот синергетический эффект обеспечивает одновременную деградацию разнородных загрязнителей - органических соединений, полимерных частиц, ионов металлов и патогенных микроорганизмов - в сложных многокомпонентных водных матрицах, что принципиально недостижимо при монофакторном подходе любого традиционного метода [17-19, 22].

Анализ четырёх приоритетных классов загрязнителей демонстрирует последовательную и высокую результативность ХАП. (1) Деградация антибиотиков: степень удаления 72->99% в реальных HWW при одновременной деструкции плазмидной ДНК и нейтрализации ARG – комплексное воздействие, недостижимое для монофакторных методов [4, 5, 7]. (2) Трансформация микропластика: химическая модификация поверхности и агломерация, подготавливающие частицы к последующему механическому удалению (седиментация, фильтрация), при одновременной деградации сорбированных фармацевтических загрязнителей (>98-99,99%) в ходе единой операции; само по себе МП плазмой из воды не удаляется, а лишь трансформируется [43]. (3) Трансформация и удаление тяжёлых металлов: двухстадийная схема, в которой ХАП обеспечивает лишь окислительную декомплексацию органо-металлических комплексов, тогда как фактическое извлечение (>95% из реальных стоков) достигается на последующей стадии физического отделения [12, 13]. (4) Деградация синтетических красителей: высокоэффективная деструкция катионных и анионных красителей с минерализацией ароматических хромофоров [25, 44, 45]. Характерные изменения физико-химических параметров воды - снижение pH, рост ОВП до +700-+900 мВ, накопление O_3 и H_2O_2 – служат надёжными операционными маркерами интенсивности обработки в режиме реального времени [20, 36, 40].

Сравнительный анализ с традиционными АОП показывает, что ХАП занимает уникальную нишу многоцелевой технологии, конкурентоспособной по энергозатратам с озонированием (0,014-0,14 кВт·ч/м³) при значительно более широком спектре действия. Разработка гибридных систем – ХАП + биологическая очистка, ХАП + адсорбция, ХАП + фотокатализ, ХАП + персульфаты – позволяет реализовать синергетическое усиление эффективности при снижении удельных энергозатрат. Первоначальными промышленными нишами наиболее обоснованного внедрения являются HWW и фармацевтические сточные воды как системы с относительно небольшим объёмом, известным составом и высокой экологической значимостью результата очистки [2, 4, 30].

Приоритетными задачами дальнейших исследований являются: детальное изучение деградации новых классов загрязнителей (PFAS, микропластик <1 мкм, нанопластик, вирусы ARG); разработка и валидация методологии промышленного масштабирования ДБР-реакторов; систематическая оценка токсичности промежуточных и конечных продуктов

деградации методами биотестирования; проведение полноценного анализа жизненного цикла (LCA) технологии ХАП в сравнении с традиционными методами с учётом всех стадий производства оборудования, эксплуатации и утилизации; дальнейшее изучение влияния плазменной обработки на мезоскопическую (кластерную) структуру воды и его вклад в моющую и смачивающую способность ПАВ (см. также раздел 2.3). Совокупность представленных данных позволяет позиционировать ХАП как перспективную технологическую платформу для создания интегрированных систем водоочистки нового поколения, отвечающих вызовам глобального водного кризиса и целям устойчивого развития.

Список литературы

1. UNESCO/UN-Water. The United Nations World Water Development Report 2015: Water for a Sustainable World. Paris: UNESCO, 2015. 122 p.
2. Cold plasma for enhanced water purification / J.-A. Maybin et al // Sustainable Microbiology. – 2024. – № 1(1):qvae032. https://doi.org/10.1093/sumbio/qvae032.
3. Cold plasma technology: Advanced and sustainable approach for wastewater treatment / P. Gururani et al // Environmental Science and Pollution Research. – 2021. – № 28(45). – P. 65062-65082. https://doi.org/10.1007/s11356-021-16741-x.
4. Nguyen H.M. Removal of antibiotics from real hospital wastewater by cold plasma technique / H.M. Nguyen, H.T. Bui // Journal of Chemistry. – 2021. – 9981738. https://doi.org/10.1155/2021/9981738.
5. Degradation of bacterial antibiotic resistance genes during exposure to non-thermal atmospheric pressure plasma / I. Courti et al // Antibiotics. – 2022. – № 11(6). – P. 747. https://doi.org/10.3390/antibiotics11060747.
6. WHO. Global Action Plan on Antimicrobial Resistance. Geneva: World Health Organization, 2015. 28 p.
7. A review on non-thermal plasma treatment of water contaminated with antibiotics / M. Magureanu et al // Journal of Hazardous Materials. – 2021. – № 417. – P. 125481. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125481.
8. Efficient degradation of antibiotics by non-thermal discharge plasma: Highlight the impacts of molecular structures and degradation pathways / H. Li et al // Chemical Engineering Journal. – 2020. – № 395. – P. 125091. https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.125091.
9. Plastic waste inputs from land into the ocean / J.R. Jambeck et al // Science. – 2015. – № 347(6223). – P. 768-771. https://doi.org/10.1126/science.1260352.
10. Microplastics in freshwater systems: A review of classification, sources, and environmental impacts / K. Bexeitova et al // Chemical Engineering Journal Advances. – 2024. – № 20:100649. https://doi.org/10.1016/j.ceja.2024.100649.
11. Velasquez J.A. Atmospheric cold plasma as a novel approach to remediating microplastics pollution in water / J.A. Velasquez, Y. Bao, J.-Y. Huang // Environmental Pollution. – 2024. – № 356: 124390. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124390.
12. Probing the aging processes and mechanisms of microplastic under simulated multiple actions generated by discharge plasma / L. Zhou et al // Journal of Hazardous Materials. – 2020. – № 398: 122956. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122956.
13. Decomplexation of Cu(II)-natural organic matter complex by non-thermal plasma oxidation: Process and mechanisms / T. Wang et al // Journal of Hazardous Materials. – 2020. – № 389: 121828. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121828.
14. Review on discharge plasma for water treatment: mechanism, reactor geometries, active species and combined processes / H. Zeghioud et al // Journal of Water Process Engineering. – 2020. – № 38: 101664. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101664.
15. Review on electrical discharge plasma technology for wastewater remediation / B. Jiang et al // Chemical Engineering Journal. – 2014. – № 236. – P. 348-368. https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.09.090.
16. Pharmaceuticals of emerging concern in aquatic systems: Chemistry, occurrence, effects, and removal methods / M. Patel et al // Chemical Reviews. – 2019. – № 119(6). – P. 3510-3673. https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00299.

17. Plasma-liquid interactions: a review and roadmap / P.J. Bruggeman et al // Plasma Sources Science and Technology. – 2016. – № 25(5). – P. 053002. https://doi.org/10.1088/0963-0252/25/5/053002.
18. The 2017 plasma roadmap: Low temperature plasma science and technology / I. Adamovich et al // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2017. – № 50(32). – P. 323001. https://doi.org/10.1088/1361-6463/aa76f5.
19. Fridman A. Plasma Chemistry / A. Fridman. – Cambridge: Cambridge University Press, 2008. – 978 p.
20. Plasma-activated water: Generation, origin of reactive species and biological applications / R. Zhou et al // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2020. – № 53(30). – P. 303001. https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab81cf.
21. Aggelopoulos C.A. Recent advances of cold plasma technology for water and soil remediation: A critical review / C.A. Aggelopoulos // Chemical Engineering Journal. – 2022. – № 428: 131657. https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.131657.
22. Parvulescu V.I. Plasma Chemistry and Catalysis in Gases and Liquids / V.I. Parvulescu, M. Magureanu, P. Lukes (Eds.). – Weinheim: Wiley-VCH. – 2012. – 380 p.
23. Degradation of pharmaceutical compound pentoxifylline in water by non-thermal plasma treatment / M. Magureanu et al // Water Research. – 2010. – № 44(11). – P. 3445-3453. https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.03.020.
24. Removal of a mixture of antibiotics in water using nonthermal plasma / F. Bilea et al // Plasma Processes and Polymers. – 2023. – № 20(7): 2300020. https://doi.org/10.1002/ppap.202300020.
25. Direct and indirect treatment of organic dye (Acid Blue 25) solutions by using cold atmospheric plasma jet. / A. Kumar et al // Frontiers in Physics. – 2022. – № 10: 835635. https://doi.org/10.3389/fphy.2022.835635.
26. Gorbanev Y. Non-thermal plasma in contact with water: The origin of species / Y. Gorbanev, D. O'Connell, V. Chechik // Chemistry: A European Journal. – 2016. – № 22(10). – P. 3496-3505. https://doi.org/10.1002/chem.201503771.
27. Cold atmospheric plasma activated water as a prospective disinfectant: The crucial role of peroxynitrite / R. Zhou et al // Green Chemistry. – 2018. – № 20(23). – P. 5276-5284. https://doi.org/10.1039/C8GC02800A.
28. Electrohydraulic discharge and nonthermal plasma for water treatment / B.R. Locke et al // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2006. – № 45(3). – P. 882-905. https://doi.org/10.1021/ie050981u.
29. Sahni M. Quantification of reductive and oxidative radicals in liquid-gas electrical discharge reactors / M. Sahni, B.R. Locke // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2006. – № 45(17). – P. 5819-5825. https://doi.org/10.1021/ie0600806.
30. Cold plasma technology for water treatment: Design, assembly and technical evaluation of a pilot plant / M. del R. Castillo et al // Journal of Information Systems Engineering and Management. – 2025. – № 10(1). https://doi.org/10.55609/jisem.2025.3773.
31. Atmospheric pressure dielectric barrier discharge plasma for in-situ water treatment using a bubbling reactor / E.M. Vasikaran et al // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2024. – № 12(5): 113641. https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.113641.
32. Water decontamination using non-thermal plasma: Concepts, applications, and prospects / P. Murugesan et al // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2020. – № 8(5): 104377. https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104377.
33. Efficacy of cold atmospheric plasma treatment on chemical and microbial pollutants in water / A.S. El-Kalliny et al // ChemistrySelect. – 2021. – № 6(47). – P. 13422-13430. https://doi.org/10.1002/slct.202004716.
34. Aqueous-phase chemistry and bactericidal effects from an air discharge plasma in contact with water / P. Lukes et al // Plasma Sources Science and Technology. – 2014. – № 23(1): 015019. https://doi.org/10.1088/0963-0252/23/1/015019.
35. Reactive nitrogen species in plasma-activated water: Generation, chemistry and application in agriculture / C. Bradu et al // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2020. – № 53(22): 223001. https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab81ea.

36. A study on treatment of surface water using cold plasma for domestic water supply / D.V. Nguyen et al // Environmental Engineering Research. – 2019. – № 24(4). – P. 412-417. https://doi.org/10.4491/eer.2018.215.
37. Electrochemical reactions at the boundary areas between cold atmospheric pressure plasma, air, and water / A.G. Volkov et al // Plasma. – 2024. – № 7(4). – P. 891-903. https://doi.org/10.3390/plasma7040049.
38. Inactivation mechanisms of non-thermal plasma on microbes: A review / X. Liao et al // Food Control. – 2017. – № 75. – P. 83-91. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.12.021.
39. Cold atmospheric plasma: a sustainable approach to inactivating viruses, bacteria, and protozoa with remediation of organic pollutants in river water and wastewater / I.A. Hamza et al // Environmental Science and Pollution Research. – 2023. – № 30(54). – P. 116214-116226. https://doi.org/10.1007/s11356-023-30298-x.
40. Measurement of reactive species generated by dielectric barrier discharge in direct contact with water in different atmospheres / V.V. Kovacevic et al // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2017. – № 50(15): 155205. https://doi.org/10.1088/1361-6463/aa5fde.
41. Degradation kinetics of cold plasma-treated antibiotics and their antimicrobial activity / C. Sarangapani et al // Scientific Reports. – 2019. – № 9: 3955. https://doi.org/10.1038/s41598-019-40352-9.
42. High efficiency plasma treatment of water contaminated with organic compounds. Study of the degradation of ibuprofen / M. Magureanu et al // Plasma Processes and Polymers. – 2018. – № 15(1): 1700201. https://doi.org/10.1002/ppap.201700201.
43. Cold plasma-induced changes in polyethylene particles and their binding affinity to selected pharmaceuticals / A. Wypart-Pawul et al // Molecules. – 2025. – № 30(18): 3756. https://doi.org/10.3390/molecules30183756.
44. Comprehensive analysis of experimental conditions in plasma-liquid interaction for the efficient removal of methylene blue / D.D. Vo et al // RSC Advances. – 2025. – № 15(22). – P. 14756-14766. https://doi.org/10.1039/D5RA01066G.
45. Recent advances of emerging organic pollutants degradation in environment by non-thermal plasma technology: A review / Y. He et al // Water. – 2022. – № 14(9): 1351. https://doi.org/10.3390/w14091351.
46. Combinatorial effects of non-thermal plasma oxidation processes and photocatalytic activity on the inactivation of bacteria and degradation of toxic compounds in wastewater / A. Raji et al // RSC Advances. – 2022. – № 12. – P. 14246-14259. https://doi.org/10.1039/D1RA09337A.
47. Synergistic effect of atmospheric-pressure plasma and TiO2 photocatalysis on inactivation of Escherichia coli cells in aqueous media / R. Zhou et al // Scientific Reports. – 2016. – № 6: 39552. https://doi.org/10.1038/srep39552
48. Antibiotics degradation and bacteria inactivation in water by cold atmospheric plasma discharges above and below water surface / M. El Shaer et al // Plasma Chemistry and Plasma Processing. – 2020. – № 40(4). – P. 971-983. https://doi.org/10.1007/s11090-020-10076-0.
49. Ouzar A. Tetracycline degradation by nonthermal plasma: removal efficiency, degradation pathway, and toxicity evaluation / A. Ouzar, I.-K. Kim // Water Science & Technology. – 2022. – № 86(11). – P. 2794-2807. https://doi.org/10.2166/wst.2022.339.
50. WHO. Guidelines for Drinking-water Quality: Fourth Edition Incorporating the First Addendum. Geneva: World Health Organization, 2017. 564 p.
51. Effects of plasma on physical properties of water: nanocrystalline-to-amorphous phase transition and improving produce washing / J. He et al // Plasma. – 2022. – № 5(4). – P. 462-469. https://doi.org/10.3390/plasma5040034.

Финансирование: *исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (№ BR28712925, тема: «Исследование и разработка технологий холодной плазмы для комплексной реабилитации экосистем»).*

А.Р. Кажмуратов*, **И.О. Сапаргали**, **Е.Н. Есжан**, **М.С. Кунарбекова, М. Токтар**
Satbayev University, 050013, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева 22

*e-mail: aidynkazhmuratov@gmail.com

СУЛЫ ОРТАҒА ЖӘНЕ ОНЫҢ ЛАСТАҒЫШТАРЫНА СУЫҚ ПЛАЗМАНЫҢ ӘСЕРІ: ШОЛУ

Мақалада суды тазарту үшін атмосфералық суық плазманың (ХАП) қазіргі мүмкіндіктеріне шолу жасалған. Өзектілік су объектілерінің тұрақты антропогендік заттармен – фармацевтикалық қосылыстармен, антибиотиктерге төзімділік гендерімен (ARG), микропластикпен, ауыр металл иондарымен және синтетикалық бояғыштармен ластануына байланысты. ХАП әсерінің физика-химиялық механизмдері қарастырылған: оттегі мен азоттың реактивті түрлерінің (RONS) генерациясы, УФ-сәулелену, импульстік электр өрістері, электрогидравликалық кавитация, сондай-ақ плазмамен белсендірілген су тұжырымдамасы. Негізгі реактор конфигурациялары – диэлектрлік кедергілік разряд (ДКР), атмосфералық плазмалық ағыс (АПА) және электрогидравликалық разряд (ЭГР) – олардың салыстырмалы сипаттамаларымен сипатталған. ХАП тиімділігі ластағыштардың төрт класы бойынша талданған. Антибиотиктер мен ARG үшін жою дәрежесі 72-99% және одан жоғарыға жетеді; микропластик үшін беттік тотығу және агрегация, сонымен бірге сорбцияланған поллютанттардың ыдырауы көрсетілген; ауыр металдар үшін – органометалл кешендерінің декомплексациясы және кейіннен тұндыру; синтетикалық бояғыштар үшін – 95%-дан астам түссіздену. Атап өткен жөн, ауыр металдар мен микропластик үшін ХАП негізінен ластағыштың химиялық түрі мен агрегаттық күйін түрлендіруді қамтамасыз етеді, ал оны судан нақты жою тұндыру, коагуляция немесе сүзу сияқты кейінгі кезеңдерде жүзеге асады; минерализацияға дейінгі қайтымсыз ыдырау негізінен органикалық ластағыштарға (антибиотиктер, бояғыштар) тән. ХАП дәстүрлі әдістермен (хлорлау, озондау, УФ, биологиялық тазарту) салыстырмалы талдауы жүргізілген. ХАП-тың басты артықшылығы – оның синергетикалық көп факторлы механизмі, бұл күрделі су матрицаларында әртекті ластағыштарды бір мезгілде ыдыратуға мүмкіндік береді, ал мұндай нәтижеге монофакторлы дәстүрлі әдістермен қол жеткізу мүмкін емес.

Түйін сөздер: *ауыр металдар, микропластик, антибиотиктер, суды тазарту, суық плазма, ДБР-реактор, ағынды сулар.*

A.R. Kazhmuratov*, I.O. Sapargali, Y.N. Yeszhan, M.S. Kunarbekova, M. Toktar
Satbayev University, 050013, Republic of Kazakhstan, Almaty, 22 Satpaev St.
*e-mail: aidynkazhmuratov@gmail.com

IMPACT OF COLD PLASMA ON THE AQUEOUS ENVIRONMENT AND ITS POLLUTANTS: A REVIEW

This article presents a review of current cold atmospheric plasma (CAP) capabilities for water treatment. The relevance is associated with water pollution by persistent anthropogenic substances – pharmaceutical compounds, antibiotic resistance genes (ARGs), microplastics, heavy metal ions, and synthetic dyes. The physicochemical mechanisms of CAP action are considered: generation of reactive oxygen and nitrogen species (RONS), UV radiation, pulsed electric fields, electrohydraulic cavitation, as well as the concept of plasma-activated water. The main reactor configurations – dielectric barrier discharge (DBD), atmospheric pressure plasma jet (APPJ), and electrohydraulic discharge (EHD) – are described along with their comparative characteristics. The effectiveness of CAP is analyzed for four pollutant classes. For antibiotics and ARGs, the removal degree reaches 72-99% and higher; for microplastics, surface oxidation and agglomeration with simultaneous degradation of sorbed pollutants are shown; for heavy metals, decomplexation of organometallic complexes followed by precipitation; for synthetic dyes, decolorization exceeding 95%. It should be emphasized that for heavy metals and microplastics, CAP predominantly provides transformation of the pollutant's chemical form and aggregate state, whereas its actual removal from water is achieved at subsequent stages of sedimentation, coagulation, or filtration; irreversible destruction down to mineralization is characteristic mainly of organic pollutants (antibiotics, dyes). A comparative analysis of CAP with conventional methods (chlorination, ozonation, UV, biological treatment) is performed. It is shown that the main advantage of CAP is its synergistic multi-factor mechanism, which enables simultaneous degradation of heterogeneous pollutants in complex aqueous matrices, unattainable with single-mechanism conventional methods.

Key words: *heavy metals, microplastics, antibiotics, water purification, cold plasma, DBD reactor, RONS, wastewater.*

Авторлар туралы мәліметтер

Айдын Рустемович Кажмуратов* – техника ғылымдарының бакалавры, кіші ғылыми қызметкер; e-mail: aidynkazhmuratov@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-4338-6627.

Иннабат Омирузаккызы Сапаргали – техника ғылымдарының бакалавры, ғылыми қызметкер; e-mail: sapargali.i@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-0258-8277.

Елриза Нұрәкімқызы Есжан – техника ғылымдарының магистрі, ғылыми қызметкер; e-mail: yelriza.yeszhan@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4523-1211.

Махаббат Сейт-Задаевна Кунарбекова – PhD, аға ғылыми қызметкер, Қ.И. Сәтбаев атындағы ҚазҰТЗУ; e-mail: m.kunarbekova@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8640-0667.
Мұрат Тоқтар – PhD, қауымдастырылған профессор, Satbayev University; e-mail: m.toktar@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0953-7491.

Сведения об авторах
Айдын Рустемович Кажмуратов* – бакалавр технических наук, мл. научный сотрудник; e-mail: aidynkazhmuratov@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-4338-6627.
Иннабат Омирузаккызы Сапаргали – бакалавр технических наук, научный сотрудник; e-mail: sapargali.i@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-0258-8277.
Елриза Нуракимкызы Есжан – магистр технических наук, научный сотрудник; e-mail: yelriza.yeszhan@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4523-1211.
Махаббат Сейт-Задаевна Кунарбекова – PhD, старший научный сотрудник, КазНИТУ им. К.И. Сатпаева; e-mail: m.kunarbekova@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8640-0667.
Мухтар Токтар – PhD, ассоциированный профессор Satbayev University; e-mail: m.toktar@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0953-7491.

Information about the authors
Aidyn Rustemovich Kazhmuratov* – Bachelor of Technical Sciences, Junior Researcher; e-mail: aidynkazhmuratov@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-4338-6627.
Inabat Omiruzakkyzy Sapargali – Bachelor of Technical Sciences, Researcher; e-mail: sapargali.i@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-0258-8277.
Elriza Nurakimkyzy Eszhan – Master of Technical Sciences, Researcher; e-mail: yelriza.yeszhan@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4523-1211.
Makhabbat Seit-Zadaevna Kunarbekova – PhD, Senior Researcher, Satbayev University; e-mail: m.kunarbekova@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8640-0667.
Mukhtar Toktar – PhD, Associate Professor, Satbayev University; e-mail: m.toktar@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0953-7491.

Поступила в редакцию 05.06.2026
Поступила после доработки 04.09.2026
Принята к публикации 07.09.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-89

МРНТИ: 61.61.29; 61.61.81; 61.61.91

Y.O. Andrienko, R.M. Nesmeyanova, S.R. Massakbayeva*, S.Yu. Kovtareva, O.E. Mukashev
Torayghyrov University,
140000, Republic of Kazakhstan, Pavlodar, Lomov St 64
*e-mail: sofyamassakbayeva@gmail.com

MECHANISMS OF POLYOLEFIN (PP AND PE) DEGRADATION AND COMPARATIVE CHARACTERISTICS OF PRIMARY AND SECONDARY POLYOLEFINS

Abstract: *This review systematizes recent open-access data on the degradation of polyolefins, with emphasis on polypropylene (PP) and polyethylene (PE) and on the differences between virgin and secondary materials during ageing, processing, and reprocessing. The analysis covers photo-oxidative, thermo-oxidative, and thermomechanical pathways and relates them to changes in molecular architecture, molecular weight, melt rheology, thermal stability, and mechanical performance. It is shown that polypropylene degrades predominantly through chain scission because tertiary carbon atoms are highly reactive; as a result, the average molecular weight decreases and the melt flow index usually increases. Polyethylene exhibits a more complex scenario in which chain scission competes with branching and partial cross-linking, causing non-linear viscosity behavior and a higher risk of embrittlement at advanced oxidation stages. Comparative data indicate that recycled PE and PP generally lose tensile strength, impact resistance, and elongation at break relative to virgin grades, although properly selected blend composition, antioxidant stabilization, and rheology-based quality control can significantly improve recyclate performance. The practical conclusion is that recycled*

©Y.O. Andrienko, R.M. Nesmeyanova, S.R. Massakbayeva, S.Yu. Kovtareva, O.E. Mukashev, 2026

polyolefins should be evaluated using mechanism-based diagnostics, including Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), differential scanning calorimetry (DSC), size-exclusion chromatography (SEC), oxidation induction temperature (OIT), and rheological criteria, rather than relying on a single processing parameter.

Key words: *polyolefins, photo-oxidation, thermo-oxidation, mechanical recycling, secondary polymers, stabilization.*

Introduction

Polyethylene and polypropylene constitute the bulk of commercial plastics and at the same time dominate the stream of polymer waste; therefore, the issue of polyolefin degradation is directly related to the quality of mechanical recycling and to the realism of the circular economy [1-5]. This review focuses on the degradation mechanisms of polypropylene (PP) and polyethylene (PE), methods for diagnosing degradation, and the differences in the behavior of virgin and recycled materials [1,2, 6-8].

The aim of this work is to systematize the mechanisms of photo-oxidative, thermo-oxidative, and thermomechanical degradation of PP and PE and to show how these processes change the structure, molecular weight, rheological behavior, and mechanical properties of recycled polyolefins. The working hypothesis is that the difference between virgin and recycled polyolefins is determined not only by the degree of oxidation but also by the predominant type of molecular response: for PP, this is mainly chain scission, whereas for PE it is a combination of chain scission, macromolecular chain branching, and limited cross-linking [2, 7-10].

The relevance of the topic is reinforced by the fact that recycled materials are increasingly viewed not as a low-grade substitute for virgin polymers but as an independent class of engineering feedstock [11-13]. Therefore, for the practical use of recycled PP and PE, it is not enough to measure only strength or melt flow index; it is necessary to relate service properties to the degradation mechanism, processing history, and residual stabilization of the material [14-16].

Unlike reviews focused primarily on individual degradation mechanisms, stabilization strategies, or specific recycling technologies, this review considers polypropylene and polyethylene comparatively, with particular attention to the relationship between degradation mechanisms, changes in molecular architecture, diagnostic parameters, and the resulting properties of virgin and recycled materials. The review brings together data on photo-oxidative, thermo-oxidative, and thermomechanical degradation and relates these changes to approaches for the quality assessment and property recovery of recyclates. Thus, the focus is not only on describing degradation phenomena, but also on providing a mechanism-based framework for interpreting differences between virgin and secondary polyolefins and for selecting appropriate diagnostic and processing strategies.

Materials and methods

The work was carried out as a targeted analytical review. The review mainly included open publications from 2020-2025 devoted to the degradation of PP and PE during ageing, processing, and reprocessing. Priority was given to studies that simultaneously presented: (1) the degradation mechanism of PP and/or PE; (2) quantitative indicators of property changes; (3) reproducible methods of instrumental control; and (4) results applicable to comparing virgin and recycled polyolefins. In addition to recent open-access studies, a limited set of earlier foundational works and review papers was included where they were necessary to explain the core mechanisms of degradation, restabilization, and recyclate quality assessment [2-4, 8, 12, 16].

The analysis included data on photo-oxidation, thermo-oxidation, thermomechanical degradation, antioxidant stabilization, and rheological criteria for the quality of recycled feedstock [3, 8, 14-18]. When interpreting the results, the polymer type, ageing or processing conditions, the direction of changes in molecular architecture, and the corresponding response of mechanical and rheological characteristics were compared.

To compare the data, the following groups of indicators were used: chemical markers of oxidation (carbonyl and hydroxyl groups by Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR)), molecular-weight characteristics and indirect rheological indicators (melt flow index (MFI), complex viscosity, and the degradation value (V_{deg}) parameter), thermal indicators (oxidation temperature and oxidation induction temperature (OIT)), as well as standard mechanical properties, including tensile strength, elongation at break, impact strength, and flexural strength [14-16, 19, 20]. The illustrations in the review are placed in the sections where they strengthen the interpretation of the mechanism or confirm quantitative conclusions.

Results and discussion

Structural prerequisites for the differences between PP and PE

The key difference between PP and PE is determined by chain structure. In polypropylene, the presence of a tertiary carbon atom facilitates hydrogen abstraction and accelerates the formation of macroradicals; therefore, when heated and in the presence of oxygen, PP tends toward β-scission and a decrease in average molecular weight [6-8, 21]. For polyethylene, the situation is less unambiguous: depending on the type of PE, temperature, oxygen availability, and material history, chain scission, chain branching, and partial cross-linking occur in parallel, and for high-density polyethylene (HDPE) an increase in effective molecular weight is often observed owing to branching and microgel formation (Table 1) [7, 9, 22]. This difference explains why recycled PP usually shows an increase in melt flow, whereas recycled PE shows either a decrease or nonlinear behavior as oxidation develops [14, 18, 23-25].

Table 1 – Comparison of the predominant degradation mechanisms of PP and PE

Parameter	Polypropylene (PP)	Polyethylene (PE)
Most vulnerable structural unit	tertiary carbon atom and its adjacent C–H bonds	secondary C–H bonds; lower reactivity
Dominant response to processing	chain scission, decrease in average molecular weight, increase in MFI	chain scission + branching/cross-linking; viscosity may increase
Typical result of photo- and thermo-oxidation	increase in carbonyl index and decrease in ductility	increase in carbonyl index and crystallinity, accompanied by surface cracking
Risk for recycled material	loss of impact strength and elongation	unpredictable rheology, brittleness after prolonged ageing

Note – compiled based on data from [6-10, 21].

Photo-oxidation and thermo-oxidation of polyolefins

Photo-oxidative degradation does not begin with light absorption by an ideal hydrocarbon matrix, but with the activation of impurity chromophores and already formed oxygen-containing groups [17, 21, 26, 27]. For both polyolefins, the autocatalytic cycle is fundamental: radical formation, oxygen addition, hydroperoxide formation, and their decomposition with the initiation of new oxidation events (Figure 1) [6-8, 21]. In PP, this cycle more rapidly drives the system toward chain scission; in PE, it is more often accompanied by competing branching and cross-linking reactions [7-10]. Long-term thermal ageing of PP is further complicated by heterogeneity: local oxidation sites can spread through the material and through the gas phase, which reduces the predictability of secondary processing even at the same average chemical composition [6, 28, 29].

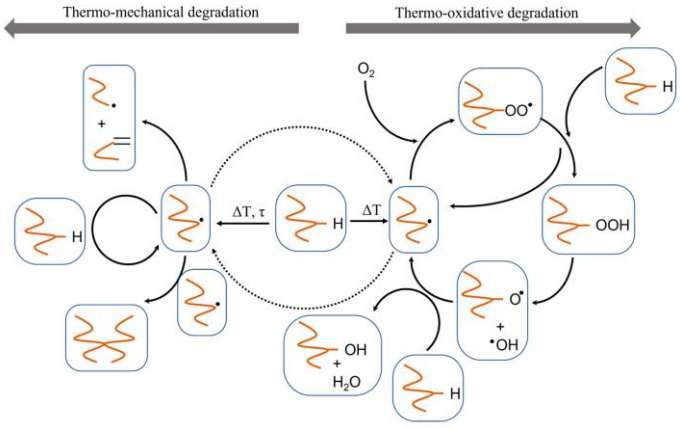


Figure 1 – General pathways of thermal and thermo-oxidative degradation of polymers; the scheme clearly illustrates the autocatalytic cycle common to PP and PE [1]

For polypropylene, long-term thermo-oxidative stability is especially sensitive to stabilization. According to the review by P. Gijsman and R. Fiorio, unstabilized PP at 80 °C degrades in about 32 days, whereas the introduction of 500 ppm of a phenolic antioxidant can increase the time to failure

to more than five years. This is important for recycled feedstock: the quality of the recyclate is determined not only by the degree of oxidation that has already occurred, but also by how properly the virgin grade was stabilized in its first life cycle [6, 16, 30].

For polyethylene, photo-oxidation often develops according to a staged scenario: the early stage is accompanied by a decrease in molecular weight; then crystallinity and the degree of structural fixation increase, which slows further oxidation but simultaneously increases brittleness [17, 27, 31]. In a study of Low-Density Polyethylene (LDPE) sheet degradation after 8 weeks of UV ageing, the molecular weight of the initial material decreased from 2.09×10^5 to 1.45×10^4 Da, and the use of pro-oxidants additionally accelerated degradation and increased crystallinity; therefore, the mere presence of oxygen-containing groups does not in itself imply improved processability [17].

Thermomechanical degradation during processing and reprocessing

During extrusion, injection moulding, and other processing operations, polyolefins are simultaneously subjected to thermal, mechanical, and oxidative stress [1, 4, 8, 18, 32]. For PP, the combination of shear and temperature usually leads to repeated chain scission and increased flowability [10, 18, 24, 33-35]. In the work of E. Esmizadeh and co-authors, reprocessing simulation showed that after only five mixing cycles the steady-state melt torque decreased by about 35%, while the melt flow index increased by more than 400% [6]. This is direct evidence of strong degradation of macromolecules and a reduction in average chain length [10, 18, 24, 36].

For PE, degradation during repeated processing is often less linear [9, 22, 25, 37]. In film systems containing virgin LLDPE, post-industrial rLLDPE, and post-consumer rPE, repeated cycles lead to deterioration of tensile strength and tear resistance, but some properties are retained due to structural rearrangement, changes in branching, and partial cross-linking [38-40]. Therefore, interpreting changes in the flowability of recycled PE without FTIR, differential scanning calorimetry (DSC), or size-exclusion chromatography (SEC) is risky: the same MFI may correspond to different oxidation levels and different residual strength [12, 14, 20, 25].

Comparison of virgin and recycled polyolefins based on quantitative data

The clearest comparison is obtained by comparing virgin and recycled materials of the same chemical class [12, 14, 39]. In the work of W. Zhang and co-authors, the melt flow index for PE decreased from 2.191 to 0.752 g/10 min after ageing, i.e., by 65.68%, whereas for PP it increased from 8.254 to 11.486 g/10 min, or by 39.16% (Table 2) (Figure 2) [23]. This multidirectional change confirms that chain scission dominates in recycled PP, whereas for recycled PE the later stages of degradation involving branching and cross-linking begin to play a substantial role [7, 9, 10, 23, 41].

Recent results further indicate that PP degradation during mechanical recycling can be related to its previous thermo-oxidative aging during service, as thermo-mechanical processing may induce additional changes in mechanical and thermal properties and affect the material's potential for a second life cycle [42].

Table 2 – Mechanical properties of virgin and recycled PE and PP

Property	vPE	rPE	vPP	rPP
Tensile strength, MPa	38.57	24.12	31.26	27.90
Elongation at break, %	168.44	44.23	107.45	67.52
Notched impact strength, kJ/m²	8.16	4.05	7.18	5.19
Flexural strength, MPa	32.52	22.63	29.43	21.43

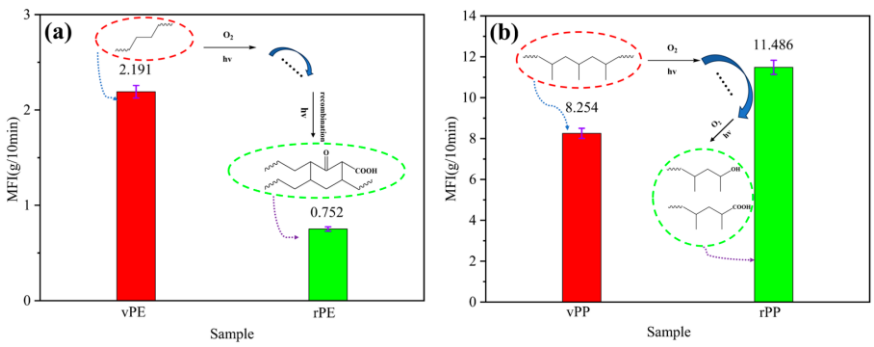


Figure 2 – Comparison of MFI (melt flow index) for virgin and recycled PE and PP [23]

The decrease in mechanical properties is also material-specific [23, 25, 39, 43]. For rPE, elongation at break decreased by 73.74% compared with the virgin material, whereas for rPP the decrease was 37.16%. In other words, recycled PE loses deformability more severely, which is consistent with the accumulation of oxidized groups, surface cracking, and the subsequent stiffening/embrittlement of the supramolecular structure [9, 17, 27]. At the same time, recycled PP loses molecular weight more rapidly and flows more readily in the melt, but under moderate degradation it still retains part of its load-bearing capacity [18, 24, 44].

For rPE/rPP blends, the most successful composition was 6:4 by weight: impact strength reached 7.48 kJ/m² and elongation at break reached 98.14% (Figure 3) [23]. This is important technologically because it shows that recycled polyolefins should not always be assessed separately [24, 35]. With the correct component ratio and the presence of oxidized functional groups, interfacial interactions are possible that increase the viscoelastic response and impact resistance [23, 45-48].

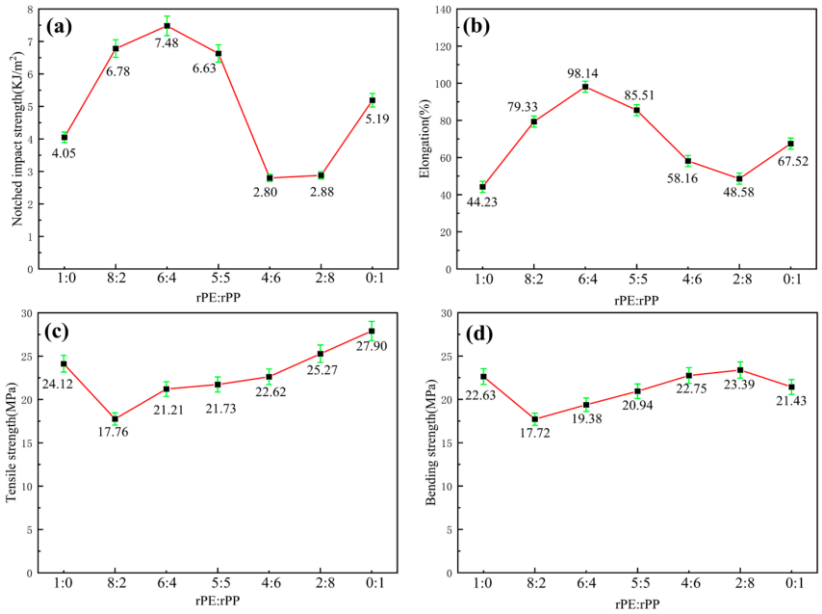


Figure 3 – Mechanical properties of rPE/rPP blends at different component ratios; maximum impact strength and elongation are achieved at 6:4 [23]

Antioxidant stabilization and quality-control methods for recycled feedstock

From the standpoint of practical recycling, not only the damage that has already occurred is important, but also the residual ability of the material to resist new oxidation [15, 16, 30, 49]. For recycled PP, this is especially clearly shown in the work of N. Knoben and co-authors: without the addition of antioxidants, OIT decreased sequentially from 225 to 198°C, whereas in a closed-loop cycle with additives an increase in OIT to 257°C was observed. At the same time, by the fifth cycle the content of Irgafos 168 increased to about 4170 ppm and Irganox 1010 to about 2050 ppm, indicating a risk of additive accumulation [19]. Consequently, stabilization improves processability, but in a closed loop it requires quantitative control, especially for packaging applications [16, 19, 30, 50].

Classical indicators such as MFI or a single viscosity point do not always make it possible to distinguish beneficial branching from critical degradation [12, 14, 20].

Therefore, the rheological parameter V_{deg}, proposed for assessing the quality of recycled HDPE, is promising. This indicator is calculated from changes in the shape of Van Gurp-Palmen curves and is linked to the degree of long-chain branching [14]. For HDPE, the change in complex viscosity in an inert atmosphere was about 14% at 10 rad/s, whereas in air the effect was about five times stronger at 0.1 rad/s (Figure 4) [14]. Higher V_{deg} values and an earlier plateau indicate a greater extent and/or faster development of structural rearrangement during reprocessing, which can be associated with lower recyclate quality [12, 14, 20, 25].

$$V_{\text{deg}} = \lim_{0.31 \le \omega \le 3.16} \frac{\partial \delta}{\partial |G^*|}$$

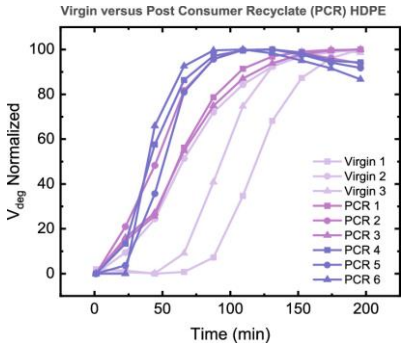


Figure 4 – Example of using the V_{deg} parameter for rapid assessment of recycled HDPE quality [14]

Additional data from recent studies on recycled PP

Recent publications supplement the main logic of the article primarily in the part where it is necessary to show the practical difference between acceptable processability of recycled PP and its residual resistance to further ageing [11, 15, 16, 30]. In the study on virgin/recycled polypropylene blends, it is shown that an increase in recycled content is accompanied by an increase in melt flow index, whereas the oxidation induction time decreases much faster [11]. Consequently, even a material that is technologically convenient in terms of flowability may have a limited reserve of antioxidant stability, which is important to take into account during re-extrusion and when choosing the fraction of rPP in a composition [11, 15, 16, 19, 30] (Table 3).

An additional applied aspect is revealed in the study devoted to post-consumer recycled polypropylene for automotive applications [51]. The authors showed that with proper formulation and feedstock preparation, recycled PP can retain acceptable thermal and mechanical stability as well as resistance to UV ageing [16, 51-54]. At the same time, the most sensitive characteristics remain low-temperature impact strength and, partially, flexural stiffness, i.e., precisely those properties that limit the use of recycled PP in the most highly loaded and cold-resistant parts [44, 51, 52] (Table 3).

Table 3 – Recent data supplementing the comparative characteristics of virgin and recycled PP

Source	Key observations	Significance for the article
[11]	As the fraction of recycled PP increases, MFI rises and oxidative stability decreases; already at 25% rPP, the oxidation induction time decreases by about 71%.	Confirms that processability and reserve oxidative stability should be assessed separately.
[51]	Post-consumer recycled polypropylene (PCR-PP) compounds for automotive applications retain acceptable thermal and mechanical properties and good UV resistance, but are inferior in low-temperature impact strength.	Shows the limits of applicability of recycled PP in technical products.

Practical conclusions for comparing virgin and recycled polyolefins

Comparison of contemporary data makes it possible to formulate several practical conclusions. First, recycled PP more often needs molecular-weight control and antioxidant replenishment, because chain scission quickly moves the material into the region of high flowability and loss of impact resistance [11, 15, 18, 19]. Second, recycled PE must be assessed more comprehensively: a decrease in MFI does not mean improvement, but may reflect a late stage of oxidation, branching, and a latent tendency toward brittle failure [9, 14, 17, 25]. Third, for mixed PE/PP streams, formulation approaches are promising in which degradation-induced functional groups are used not only as a defect but also as a source of interfacial interaction in compatible compositions [23, 45-48].

Finally, the difference between virgin and recycled polyolefins should be considered not as a binary opposition of “high-quality/low-quality material”, but as a continuum of structural state [12, 14, 16]. Given FTIR, DSC, SEC, and rheological data, recycled polyolefins can be classified quite accurately by degree of degradation and appropriate target applications can be selected for them – from less demanding film products to modified blends and composite materials [12, 14, 20, 39]. This classification becomes even more reliable when rheological screening is combined with additive-assisted property recovery strategies for recycled PP [15, 16, 30].

Conclusion

The analysis carried out showed that for the topic of PP and PE degradation, the three interrelated blocks of greatest importance are: the mechanism of formation of oxygen-containing defects, the change in molecular architecture during processing, and the resulting loss of mechanical properties of recycled materials. For polypropylene, chain scission associated with the reactivity of the tertiary carbon atom dominates; for polyethylene, a combination of chain scission, branching, and partial cross-linking is characteristic. This is why recycled PP more often demonstrates an increase in melt flow, whereas recycled PE shows more complex and sometimes opposite rheological behavior.

Quantitative data from recent open sources confirm that degradation worsens the strength, impact resistance, and especially the deformability of recycled polyolefins; however, these losses do not preclude the engineering use of recyclate. The most promising approaches are targeted blending of rPE and rPP, management of antioxidant stabilization, and implementation of rapid quality-control methods based on OIT and rheological criteria. The transition presented in this work from analysis of degradation mechanisms to the formation of an applied scheme of “degradation mechanism – diagnostic parameters – technological solutions” opens possibilities for targeted regulation of the properties of recycled polyolefins and for the development of methods for their rapid monitoring under processing conditions.

References

1. Molecular pathways for polymer degradation during conventional processing, additive manufacturing, and mechanical recycling / D. Ceretti et al // Molecules. – 2023. – Vol. 28, № 5. – P. 2344. https://doi.org/10.3390/molecules28052344.
2. Strömberg E. The design of a test protocol to model the degradation of polyolefins during recycling and service life / E. Strömberg, S. Karlsson // Journal of Applied Polymer Science. – 2009. – Vol. 112, № 3. – P. 1835-1844. https://doi.org/10.1002/app.29724.
3. Schyns Z.O.G. Mechanical Recycling of Packaging Plastics: A Review / Z.O.G. Schyns, M.P. Shaver // Macromolecular Rapid Communications. – 2021. – Vol. 42, № 3. – P. 2000415. https://doi.org/10.1002/marc.202000415.
4. Mechanical reprocessing of polyolefin waste: A review / S. Yin et al // Polymer Engineering & Science. – 2015. – Vol. 55, № 12. – P. 2899-2909. https://doi.org/10.1002/pen.24182.
5. Technical, Economic, and Environmental Comparison of Closed-Loop Recycling Technologies for Common Plastics / T. Uekert et al // ACS Sustainable Chemistry & Engineering. – 2023. – Vol. 11, № 3. – P. 965-978. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c05497.
6. Gijsman P. Long term thermo-oxidative degradation and stabilization of polypropylene (PP) and the implications for its recyclability / P. Gijsman, R. Fiorio // Polymer Degradation and Stability. – 2023. – Vol. 208. – P. 110260. https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2023.110260.
7. Peterson J.D. Kinetics of the Thermal and Thermo-Oxidative Degradation of Polystyrene, Polyethylene and Poly(propylene) / J.D. Peterson, S. Vyazovkin, C.A. Wight // Macromolecular Chemistry and Physics. – 2001. – Vol. 202, № 6. – P. 775-784. https://doi.org/10.1002/1521-3935(20010301)202:6<775::aid-macp775>3.0.co;2-g.
8. Gijsman P. Review on the thermo-oxidative degradation of polymers during processing and in service / P. Gijsman // e-Polymers. – 2008. – Vol. 8, № 1. https://doi.org/10.1515/epoly.2008.8.1.727.
9. Pinheiro L. The role of chain scission and chain branching in high density polyethylene during thermo-mechanical degradation / L. Pinheiro, M. Chinelatto, S. Canevarolo // Polymer Degradation and Stability. – 2004. – Vol. 86, № 3. – P. 445-453. https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2004.05.016.
10. Qian S. Thermal degradation behavior of polypropylene in the melt state: molecular weight distribution changes and chain scission mechanism / S. Qian, T. Igarashi, K.-H. Nitta // Polymer Bulletin. – 2011. – Vol. 67, № 8. – P. 1661-1670. https://doi.org/10.1007/s00289-011-0560-6.
11. Zhiltsova T. Sustainable Polypropylene Blends: Balancing Recycled Content with Processability and Performance / T. Zhiltsova, M. Oliveira // Polymers. – 2025. – Vol. 17, № 11. – P. 1556. https://doi.org/10.3390/polym17111556.
12. Vilaplana F. Quality Concepts for the Improved Use of Recycled Polymeric Materials: A Review / F. Vilaplana, S. Karlsson // Macromolecular Materials and Engineering. – 2008. – Vol. 293, № 4. – P. 274-297. https://doi.org/10.1002/mame.200700393.

13. Mixed post-consumer recycled polyolefins as a property tuning material for virgin polypropylene / G.W. Curtzwiler et al // Journal of Cleaner Production. – 2019. – Vol. 239. – P. 117978. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117978.
14. Defining quality by quantifying degradation in the mechanical recycling of polyethylene / A. Patel et al. // Nature Communications. – 2024. – Vol. 15, № 1. – P. 8733. https://doi.org/10.1038/s41467-024-52856-8.
15. Influence of Stabilization Additive on Rheological, Thermal and Mechanical Properties of Recycled Polypropylene / M. Mihelčič et al // Polymers. – 2022. Vol. 14, № 24. – P. 5438. https://doi.org/10.3390/polym14245438.
16. Pfaendner R. Restabilization - 30 years of research for quality improvement of recycled plastics review / R. Pfaendner // Polymer Degradation and Stability. – 2022. – Vol. 203. – P. 110082. https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2022.110082.
17. Du B. Study of Factors Affecting UV-Induced Photo-Degradation in Different Types of Polyethylene Sheets / B. Du, C. Lee, Y. Ji // Polymers. – 2024. – Vol. 16, № 19. – P. 2709. https://doi.org/10.3390/polym16192709.
18. Esmizadeh E. Degradation behavior of polypropylene during reprocessing and its biocomposites: Thermal and oxidative degradation kinetics / E. Esmizadeh, C. Tzoganakis, T. Mekonnen // Polymers. – 2020. – Vol. 12, № 8. – P. 1627. https://doi.org/10.3390/polym12081627.
19. Monitoring antioxidant consumption and build-up in polypropylene during open-loop and closed-loop mechanical recycling / N. Knoben et al // Materials. – 2025. – Vol. 18, № 7. – P. 1640. https://doi.org/10.3390/ma18071640.
20. Degradation indicators in multiple recycling processing loops of impact polypropylene and high density polyethylene / L. Douiri et al // Polymer Degradation and Stability. – 2024. – Vol. 219. – P. 110617. https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2023.110617.
21. How small molecules affect the thermo-oxidative aging mechanism of polypropylene: A reactive molecular dynamics study / F. Zhang et al // Polymers. – 2021. – Vol. 13, № 8. – P. 1243. https://doi.org/10.3390/polym13081243.
22. Influence of the repeated extrusion on the degradation of polyethylene. Structural changes in low density polyethylene / J. Dostál et al // European Polymer Journal. – 2008. – Vol. 44, № 8. – P. 2652-2658. https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2008.05.028.
23. Comprehensive investigation into the impact of degradation of recycled polyethylene and recycled polypropylene on the thermo-mechanical characteristics and thermal stability of blends / W. Zhang et al // Molecules. – 2024. – Vol. 29, № 18. – P. 4499. https://doi.org/10.3390/molecules29184499.
24. da Costa H.M. Degradation of polypropylene (PP) during multiple extrusions: Thermal analysis, mechanical properties and analysis of variance / H.M. da Costa, V.D. Ramos, M.G. de Oliveira // Polymer Testing. – 2007. – Vol. 26, № 5. – P. 676-684. https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2007.04.003.
25. Processability and mechanical properties of extensively recycled high density polyethylene / P. Oblak et al // Polymer Degradation and Stability. – 2015. – Vol. 114. – P. 133-145. https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2015.01.012.
26. Effect of hindered piperidine light stabilizer molecular structure and UV-absorber addition on the oxidation of HDPE. Part 1: Long-term thermal and photo-oxidation studies / C.M. Liauw et al // Journal of Vinyl and Additive Technology. – 2004. – Vol. 10, № 2. – P. 79-87. https://doi.org/10.1002/vnl.20011.
27. A fundamental study on photo-oxidative degradation of linear low density polyethylene films at embrittlement / Y.C. Hsu et al // Polymer. – 2012. – Vol. 53, № 12. – P. 2385-2393. https://doi.org/10.1016/j.polymer.2012.03.044.
28. Thermo-oxidative degradation of isotactic polypropylene at high temperatures: phenolic antioxidants versus HAS / R. Gensler et al // Polymer Degradation and Stability. – 2000. – Vol. 67, № 2. – P. 195-208. https://doi.org/10.1016/S0141-3910(99)00113-5.
29. Thermo-oxidative stability of PP waste films studied by imaging chemiluminescence / G. Ahlblad et al // Polymer Degradation and Stability. – 2001. – Vol. 73, № 1. – P. 15-22. https://doi.org/10.1016/S0141-3910(01)00038-6.

30. Recycling of metallocene isotactic polypropylene: importance of antioxidants / E. Blázquez-Blázquez et al // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2022. – Vol. 147, № 23. – P. 13363-13374. https://doi.org/10.1007/s10973-022-11505-2.
31. Focke W.W. Stabilization of low-density polyethylene films containing metal stearates as photodegradants / W.W. Focke, R.P. Mashele, N.S. Nhlapo // Journal of Vinyl and Additive Technology. – 2011. – Vol. 17, № 1. – P. 21-27. https://doi.org/10.1002/vnl.20248.
32. Degradation and stabilization of polyolefins from municipal plastic waste during multiple extrusions under different reprocessing conditions / A. Santos et al // Polymer Degradation and Stability. – 2002. – Vol. 77, № 3. – P. 441-447. https://doi.org/10.1016/S0141-3910(02)00101-5.
33. Delva L. The Effect of Multiple Extrusions on the Properties of Montmorillonite Filled Polypropylene / L. Delva, K. Ragaert, J. Degrieck, L. Cardon // Polymers. – 2014. – Vol. 6, № 12. – P. 2912-2927. https://doi.org/10.3390/polym6122912.
34. Abbas-Abadi M.S. Effect of the melt flow index and melt flow rate on the thermal degradation kinetics of commercial polyolefins / M.S. Abbas-Abadi, M.N. Haghighi, H. Yeganeh // Journal of Applied Polymer Science. – 2012. – Vol. 126, № 5. – P. 1739-1745. https://doi.org/10.1002/app.36775.
35. Berzin F. Rheological behavior of controlled-rheology polypropylenes obtained by peroxide-promoted degradation during extrusion: Comparison between homopolymer and copolymer / F. Berzin, B. Vergnes, L. Delamare // Journal of Applied Polymer Science. – 2001. – Vol. 80, № 8. – P. 1243-1252. https://doi.org/10.1002/app.1210.
36. Thermo-mechanical degradation of polypropylene (PP) and low-density polyethylene (LDPE) blends exposed to simulated recycling / S. Saikrishnan et al // Polymer Degradation and Stability. – 2020. – Vol. 182. – P. 109390. https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2020.109390.
37. Recent developments in recycling of post-consumer polyethylene waste / Y. Ma et al // Green Chemistry. – 2025. – Vol. 27. – P. 4040-4093. https://doi.org/10.1039/d4gc06566b.
38. Ballestar de las Heras R. Comparative analysis of the effects of incorporating post-industrial recycled LLDPE and post-consumer PE in films: Macrostructural and microstructural perspectives in the packaging industry / R. Ballestar de las Heras, X. Colom, J. Cañavate // Polymers. – 2024. – Vol.16, № 7. – P. 916. https://doi.org/10.3390/polym16070916.
39. Characterization of Composition and Structure-Property Relationships of Commercial Post-Consumer Polyethylene and Polypropylene Recyclates / M. Gall et al // Polymers. – 2021. – Vol. 13, № 10. – P. 1574. https://doi.org/10.3390/polym13101574.
40. Investigating the effect of accelerated weathering on the mechanical and physical properties of high content plastic solid waste (PSW) blends with virgin linear low density polyethylene (LLDPE) / S. Al-Salem et al // Polymer Testing. – 2015. – Vol. 46. – P. 116-121. https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2015.07.008.
41. Oxidative depolymerization of polyethylene (PE), polypropylene (PP) and polystyrene (PS) wastes to value-added chemicals / H.S. Raby et al // Polymer Degradation and Stability. – 2025. – Vol. 242. – P. 111709. https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2025.111709.
42. Enhancement of second life cycle potential of polypropylene exposed to combined thermo-oxidative aging during an automotive use phase and thermo-mechanical aging in mechanical recycling processing / S. Hoebel et al // Journal of Material Cycles and Waste Management. – 2026. – Vol. 28. – P. 3496–3512. https://doi.org/10.1007/s10163-026-02632-1.
43. Gnoffo C. Mechanical recycling of HDPE-based packaging: Interplay between cross contamination, aging and reprocessing / C. Gnoffo, R. Arrigo, A. Frache // Polymer Degradation and Stability. – 2025. – Vol. 236. – P. 111290. https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2025.111290.
44. Jansson A. Degradation of post-consumer polypropylene materials exposed to simulated recycling—mechanical properties / A. Jansson, K. Möller, T. Gevert // Polymer Degradation and Stability. – 2003. – Vol. 82, № 1. – P. 37-46. https://doi.org/10.1016/S0141-3910(03)00160-5.
45. Accurate determination of polyethylene (PE) and polypropylene (PP) content in polyolefin blends using machine learning-assisted differential scanning calorimetry (DSC) analysis / A. Bashirgonbadi et al // Polymer Testing. – 2024. – Vol. 131. – P. 108353. https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2024.108353.

46. Properties of Recycled High Density Polyethylene/Recycled Polypropylene Blends: Effect of Maleic Anhydride Polypropylene / A.M. Atiqah et al // Key Engineering Materials. – 2013. – Vol. 594-595. – P. 837-841. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.594-595.837.
47. Polypropylene/polyethylene blends as models for high-impact propylene-ethylene copolymers, part 2: Relation between composition and mechanical performance / C. Kock et al // Journal of Applied Polymer Science. – 2013. – Vol. 130, № 1. – P. 287-296. https://doi.org/10.1002/app.39181.
48. Bertin S. Study and characterization of virgin and recycled LDPE/PP blends / S. Bertin, J.J. Robin // European Polymer Journal. – 2002. – Vol. 38, № 11. – P. 2255-2264. https://doi.org/10.1016/S0014-3057(02)00111-8.
49. Recycled and restabilized HDPE bottle crates: Retention of critical properties after heat aging / C.N. Kartalis et al // Polymer Engineering & Science. – 2001. – Vol. 41, № 5. – P. 771-781. https://doi.org/10.1002/pen.10774.
50. Dopico-García M.S. Antioxidant Content of and Migration from Commercial Polyethylene, Polypropylene, and Polyvinyl Chloride Packages / M.S. Dopico-García, J.M. López-Vilariñó, M.V. González-Rodríguez // Journal of Agricultural and Food Chemistry. – 2007. – Vol. 55, № 8. – P. 3225-3231. https://doi.org/10.1021/jf070102+.
51. Characterization of Morphological, Thermal, and Mechanical Performances and UV Ageing Degradation of Post-Consumer Recycled Polypropylene for Automotive Industries / M. Arese et al // Materials. – 2025. – Vol. 18, № 5. – P. 1090. https://doi.org/10.3390/ma18051090.
52. Prior L. Assessment of the Impact of Superficial Contamination and Thermo-Oxidative Degradation on the Properties of Post-Consumer Recycled Polypropylene / L. Prior, M.S.A. Oliveira, T. Zhiltsova // Materials. – 2023. – Vol. 16, № 3. – P. 1198. https://doi.org/10.3390/ma16031198.
53. Jiménez A. Processing and properties of recycled polypropylene modified with elastomers / A. Jiménez, L. Torre, J. Kenny // Plastics, Rubber and Composites. – 2003. – Vol. 32, № 8-9. – P. 357-367. https://doi.org/10.1179/146580103225004126.
54. Towards a Circular Economy: Study of the Mechanical, Thermal, and Electrical Properties of Recycled Polypropylene and Their Composite Materials / T. Jamnongkan et al // Polymers. – 2022. – Vol. 14, № 24. – P. 5482. https://doi.org/10.3390/polym14245482.

Funding information: *This research is funded by the Committee of Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (grant IRN AP26199041 «Chemical and Technological Aspects of Creating Composites through Thermoplastic Processing of Polymer Waste»).*

Я.О. Андриенко, Р.М. Несмеянова, С.Р. Масакбаева*, С.Ю. Ковтарева, О.Е. Мукашев
Торайгыров университеті, 140000, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ., Ломов к-сі, 64
*e-mail: sofyamassakbayeva@gmail.com

ПОЛИОЛЕФИНДЕРДІҢ (ПП ЖӘНЕ ПЭ) ДЕСТРУКЦИЯ МЕХАНИЗМДЕРІ ЖӘНЕ БАСТАПҚЫ МЕН ҚАЙТАЛАМА ПОЛИОЛЕФИНДЕРДІҢ САЛЫСТЫРМАЛЫ СИПАТТАМАСЫ

Бұл шолу жұмысы полиолефиндердің деструкциясы туралы соңғы ашық қолжетімді деректерді жүйелейді және полипропилен (ПП) мен полиэтиленнің (ПЭ), сондай-ақ бастапқы және қайталама материалдардың қартаю, өңдеу және қайта өңдеу кезіндегі айырмашылықтарына ерекше назар аударады. Талдауда фото-тотығу, термо-тотығу және термомеханикалық деструкция жолдары қарастырылып, олардың молекулалық архитектураға, молекулалық массаға, балқыма реологиясына, жылулық тұрақтылыққа және механикалық қасиеттерге әсері салыстырылды. Көрсетілгендей, полипропилен негізінен тізбектің үзілуі арқылы ыдырайды, өйткені үшінші реттік көміртек атомдары жоғары реакциялық қабілетке ие; соның салдарынан орташа молекулалық масса төмендеп, балқыма ағынының индексі көбіне артады. Полиэтиленде үзілу процестері тармақталумен және ішінара торланумен қатар жүреді, сондықтан тұтқырлықтың өзгерісі сызықтық емес сипат алып, тотығудың терең сатысында морттану қаупі өседі. Салыстырмалы деректер қайталама PE мен PP-де созылу беріктігі, соққыға төзімділік және үзілу кезіндегі салыстырмалы ұзару әдетте бастапқы материалдарға қарағанда төмендейтінін көрсетті. Дегенмен қоспа құрамын дұрыс таңдау, антиоксиданттық тұрақтандыру және реологияға негізделген сапаны бақылау қайта өңделген материалдардың қолданылу мүмкіндігін едәуір жақсартады. Практикалық тұрғыдан екіншілік полиолефиндерді бір ғана технологиялық көрсеткішке сүйенбей, деградация механизмдеріне негізделген кешенді диагностика арқылы, оның

ішінде Фурье-түрлендіру инфрақызыл спектроскопиясы (FTIR), дифференциалды сканерлеуші калориметрия (DSC), эксклюзиялық хроматография (SEC), тотығу индукциясының температурасы (OIT) және реологиялық критерийлерді пайдалана отырып бағалау қажет.

Түйін сөздер: *полиолефиндер, фото-тотығу, термо-тотығу, механикалық қайта өңдеу, қайталама полимерлер, тұрақтандыру.*

Я.О. Андриенко, Р.М. Несмеянова, С.Р. Масакбаева*, С.Ю. Ковтарева, О.Е. Мукашев
Торайгыров университет, 140000, Республика Казахстан, г. Павлодар, ул. Ломова, 64
*e-mail: sofyamassakbayeva@gmail.com

МЕХАНИЗМЫ ДЕСТРУКЦИИ ПОЛИОЛЕФИНОВ (ПП И ПЭ) И СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПЕРВИЧНЫХ И ВТОРИЧНЫХ ПОЛИОЛЕФИНОВ

В обзоре систематизированы современные открытые данные о деструкции полиолефинов с акцентом на полипропилен (ПП) и полиэтилен (ПЭ), а также на различия между первичными и вторичными материалами при старении, переработке и повторной переработке. Рассмотрены фотоокислительные, термоокислительные и термомеханические пути деградации и показано, как они отражаются на молекулярной архитектуре, молекулярной массе, реологических свойствах расплава, термической стабильности и механических характеристиках. Показано, что полипропилен преимущественно деградирует по механизму разрыва цепи вследствие высокой реакционной способности третичных атомов углерода; поэтому средняя молекулярная масса снижается, а показатель текучести расплава обычно возрастает. Для полиэтилена характерен более сложный сценарий, при котором разрыв цепи сочетается с разветвлением и частичным сшиванием, что приводит к нелинейному изменению вязкости и повышенному риску охрупчивания на поздних стадиях окисления. Сопоставление количественных данных показывает, что вторичные PE и PP, как правило, уступают первичным материалам по прочности при растяжении, ударной вязкости и относительному удлинению при разрыве. Вместе с тем правильно подобранный состав смесей, антиоксидантная стабилизация и реологический контроль качества способны существенно расширить область применения вторичных полиолефинов. Практический вывод заключается в том, что вторичные полиолефины следует оценивать с использованием диагностики, основанной на механизмах деградации, включая инфракрасную Фурье-спектроскопию (FTIR), дифференциальную сканирующую калориметрию (DSC), эксклюзионную хроматографию (SEC), температура окислительной индукции (OIT) и реологические параметры, а не полагаться на один единственный параметр переработки.

Ключевые слова: *полиолефины, фотоокисление, термоокисление, механическая переработка, вторичные полимеры, стабилизация.*

Сведения об авторах

Ярослав Олегович Андриенко – магистрант кафедры «Химия и химические технологии», Торайгыров университет, город Павлодар, Республика Казахстан; e-mail: yaroslav.andrienko2002@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-6295-2170.

Римма Михайловна Несмеянова – кандидат химических наук, ассоциированный профессор (доцент), профессор кафедры «Химия и химические технологии», Торайгыров университет, город Павлодар, Республика Казахстан; e-mail: nesmeyanova.r@tou.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5949-4023.

Софья Руслановна Масакбаева* – кандидат химических наук, ассоциированный профессор (доцент), профессор кафедры «Химия и химические технологии», Торайгыров университет, город Павлодар, Республика Казахстан; e-mail: sofyamassakbayeva@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8668-472X.

Светлана Юрьевна Ковтарева – старший преподаватель кафедры «Химия и химические технологии», Торайгыров университет, город Павлодар, Республика Казахстан; e-mail: kovtarsw@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3946-1344.

Олжас Ержанович Мукашев – старший преподаватель кафедры «Химия и химические технологии»; Торайгыров университет, город Павлодар, Республика Казахстан; e-mail: mukashev.o@teachers.tou.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8040-6515.

Авторлар туралы мәліметтер

Ярослав Олегович Андриенко – «Химия және химиялық технологиялар» кафедрасының магистранты, Павлодар қаласы, Торайгыров университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: yaroslav.andrienko2002@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-6295-2170.

Римма Михайловна Несмеянова – химия ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор (доцент), «Химия және химиялық технологиялар» кафедрасының профессоры, Павлодар қаласы, Торайгыров университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: nesmeyanova.r@tou.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5949-4023.

Софья Руслановна Масакбаева* – химия ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор (доцент), «Химия және химиялық технологиялар» кафедрасының профессоры, Павлодар қаласы, Торайгыров университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: sofyamassakbayeva@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8668-472X.

Светлана Юрьевна Ковтарева – «Химия және химиялық технологиялар» кафедрасының аға оқытушысы, Павлодар қаласы, Торайгыров университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: kovtarsw@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3946-1344.

Олжас Ержанович Мукашев – «Химия және химиялық технологиялар» кафедрасының аға оқытушысы, Павлодар қаласы, Торайгыров университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: mukashev.o@teachers.tou.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8040-6515.

Information about the authors

Yaroslav Andriyenko – master's student of the department «Chemistry and Chemical Technology»; Toraigyrov University, Pavlodar, Republic of Kazakhstan; e-mail: yaroslav.andrienko2002@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-6295-2170.

Rimma Nesmeyanova – candidate of Chemical Science, associate Professor, Professor of the Department «Chemistry and Chemical Technology», Toraigyrov University, Pavlodar, Republic of Kazakhstan; e-mail: nesmeyanova.r@tou.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5949-4023.

Sofya Massakbayeva* – candidate of Chemical Science, associate Professor, Professor of the Department «Chemistry and Chemical Technology»; Toraigyrov University, Pavlodar, Republic of Kazakhstan; e-mail: sofyamassakbayeva@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8668-472X.

Svetlana Kovtareva – senior teacher at the Department «Chemistry and Chemical Technology»; Toraigyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan; e-mail: kovtarsw@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3946-1344.

Olzhas Mukashev – senior teacher at the Department «Chemistry and Chemical Technology»; Toraigyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan; e-mail: mukashev.o@teachers.tou.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8040-6515.

Received 01.06.2026
Revised 08.09.2026
Accepted 09.09.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-90

CC BY 4.0
Check for updates

МРНТИ: 31.25.15

Ш.А. Муздыбаева[*], К.Б. Мусабеков[2], Н.К. Нокербекова[1], А.Ж. Женисова[1], Д.М-К Ибраимова[2]

[1]Международный инженерно-технологический университет,
050060, Республика Казахстан, г. Алматы, пр. аль-Фараби, 93 Г/5,
[2]Казахский Национальный университет имени аль-Фараби,
050040, Республика Казахстан, г. Алматы, пр. аль-Фараби, 71,
[*]e-mail: Sharbanu1958@mail.ru

ФЛОКУЛЯЦИЯ ГИДРОСУСПЕНЗИИ БЕНТОНИТОВОЙ ГЛИНЫ, ИСПОЛЬЗУЕМОЙ В ОЧИСТКЕ ШАХТНОЙ ВОДЫ ГОРНОРУДНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ, ПОЛИАКРИЛАМИДНЫМИ ПОЛИЭЛЕКТРОЛИТАМИ

Аннотация: *Восточно-Казахстанская область обладает значительными запасами бентонитовых глин Таганского месторождения, которые характеризуются высокой сорбционной емкостью и способностью эффективно удалять ионы тяжёлых металлов из шахтных вод горнорудной промышленности до уровня предельно-допустимой концентрации рыбохозяйственного назначения.*

Однако применение бентонита сопровождается увеличением мутности очищаемой воды, что ограничивает его практическое использование в водоёмах. Для решения данной проблемы

©Ш.А. Муздыбаева, К.Б. Мусабеков, Н.К. Нокербекова, А.Ж. Женисова, Д.М-К Ибраимова, 2026

предложено использовать водорастворимые полиэлектролиты (ВРП) – производных полиакриламида катионного (Zetag-89) и анионного (Magnoflok-156) типов.

Установлено, что последовательное введение катионного и анионного ВРП приводит к формированию первичных, и в дальнейшем вторичных флокул, обладающих повышенной степенью компактизации, что обеспечивают ускоренную седиментацию, снижению мутности воды при сохранении высокой эффективности сорбции тяжёлых металлов.

Научная новизна работы заключается в разработке органоминеральных композиционных материалов нового поколения, основанных на сочетании природных минералов и синтетических полимеров. Такие материалы позволяют не только достичь глубокой очистки промышленных вод, но и минимизировать побочные эффекты, связанные с использованием природных сорбентов. Практическая значимость исследования состоит в возможности внедрения предложенной технологии для комплексной очистки шахтных вод горнорудной промышленности, что отвечает современным требованиям охраны окружающей среды по Международной Концепции устойчивого развития.

Ключевые слова: *бентонитовая глина, полиэлектролиты, флокуляция, шахтная вода, флокулирующая активность, приведенная вязкость, седиментация.*

Введение. Используемый в настоящее время традиционный метод очистки шахтной воды (ШВ) горнорудной промышленности, основанный на осаждении тяжелых металлов (ТМ) гидрооксидом железа, образующегося в момент нейтрализации (известкования), не всегда обеспечивает достижение норм предельно-допустимой концентрации рыбохозяйственного назначения ($ПДК_{р.-х.н.}$). В последнее время для извлечения ионов ТМ используют природные материалы – бентонитовые глины (БГ), которые обладают высокой сорбционной емкостью, селективностью катионного обмена.

Установлено, что использование термо-кислотноактивированной формы БГ 14-го горизонта Таганского месторождения Восточно-Казахстанской области (ВКО) позволяет удалить ионы ТМ Cu^{2+}, Pb^{2+}, Cd^{2+} и Zn^{2+} на 99,6; 94,7; 98,9 и 99,5% соответственно при установленных оптимальных условиях (pH 8,0-8,5; время контакта 15 мин; расход бентонита 6 г/дм³) [1-3]. Однако применение бентонита в очистке ШВ сопровождается повышением мутности, контролируемой по нормативам ПДК взвешенных веществ (0,25 мг/дм³ для высшей категории и 0,75 мг/дм³ для первой категории) [4]. Для ускорения седиментации гидросуспензии и снижения мутности целесообразно использовать водорастворимые полиэлектролиты (ВРП) и их композиции в качестве флокулянтов.

Известно, что эффективность флокулянтов зависит от природы, поверхностных характеристик дисперсной фазы, параметров полимерных флокулянтов [5]. В этой связи анализ математической модели, механизма кинетики флокуляции гидросуспензии БГ в присутствии ВРП, позволяет выбрать оптимальный режим осаждения взвешенных веществ (ВВ), сочетающий минимальный расход с максимальной интенсивностью водоочистки, что дает возможность оперативно использовать их для очистки производственных вод.

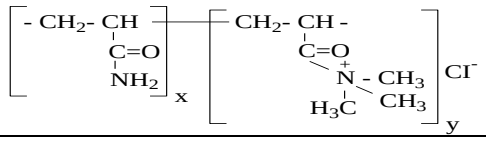
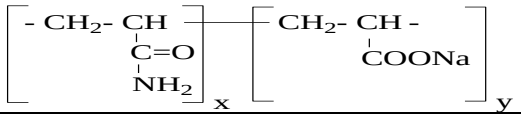
Материалы и методы исследования

Седиментационный анализ проведен по накоплению массы частиц дисперсной фазы с помощью торсионных весов (ВТ 500) по изменению массы частиц, оседающих на чашечку, помещенную в стеклянный цилиндр со суспензией исследуемого образца [6]. Вязкость растворов ВРП определяли на вискозиметре Уббелоде с висячим уровнем и временем истечения растворителя в пределах ~ 170-175 с. Эффективность флокуляции, под действием ВРП, оценивали по изменению приведённой вязкости системы по лабораторному практикуму [7]. В качестве флокулирующих агентов были испытаны ВРП катионного Zetag-89 и анионного Magnafloc-156 типов, характеристики которых представлены в таблице 1. Для модельной дисперсной системы использованы узкие фракции БГ 14-горизонта Таганского месторождения ВКО. Для устранения эффекта стесненного оседания, кинетику флокуляции проводили в режиме свободного падения.

Результаты и их обсуждение

Известно, что результативность применения ВРП зависит, прежде всего, от природы структурообразующего минерала, коллоидно-химических свойств частиц дисперсной фазы, используемой в качестве сорбирующего материала, а также параметров полимерных флокулянтов, вводимых для ускорения седиментации взвешенных веществ [8-10].

Таблица 1–Характеристика синтетических полиэлектролитов, использованных для флокуляции гидросуспензии бентонитовой глины

Полимер	Структурная формула	[η], дл/г
Zetag-89 (катионный		12
Magnaflok-156 (анионный)		13

Для выявления наиболее эффективного ВРП проанализированы три режима ввода их в гидросуспензию БГ: 1-режим, сначала Zetag-89 [К], затем Magnaflok-156 [А]; 2-режим, сначала Magnaflok-156 [А], затем Zetag-89 [К]; 3-режим, поликомплекс (предварительно смешивают Magnaflok-156 [А] и Zetag-89 [К]). Для описания влияния ВРП на седиментационную устойчивость системы был использован безразмерный параметр (γ-флокулирующий эффект) [6,7], который прямо пропорционален скорости седиментации дисперсной фазы в присутствии флокулянта и обратно пропорционален скорости седиментации в отсутствии флокулянта был рассчитан по формуле (1):

$$\gamma = \frac{\vartheta}{\vartheta_o} - 1 = \frac{\tau_{1/2(c=0)}}{\tau_{1/2(c)}} - 1, \qquad (1)$$

где, ϑ и ϑ_o – скорости седиментации в присутствии и отсутствии флокулянтов; $\tau_{1/2(c=0)}$ и $\tau_{1/2(c)}$ – время накопления половины массы осадка, соответственно, без добавок и в присутствии ВРП.

Для количественной оценки доли флокулирующего эффекта каждого из компонентов в бинарной смеси флокулянтов также рассчитаны флокулирующие активности компонентов. Известно [9, 14], что флокулирующую активность в расчете на единицу добавки характеризует величина λ, рассчитанной по формуле (2):

$$\lambda_i = \frac{\gamma}{c_i} = \left[\frac{\tau_{1/2(c=0)}}{\tau_{1/2(c)}} - 1\right]\frac{1}{c_i} \qquad (2)$$

где, $\tau_{1/2(c=0)}$ и $\tau_{1/2(c)}$ – время накопления половины (от максимальной) массы осадка, соответственно, без добавок и в присутствии ВРП, C_i – концентрация компонентов [А] и [К].

Полученные данные для трех режимов ввода компонентов при соотношении [А]/[К]=1 сведены в табл.2. Флокулирующий эффект−γ в различном режиме ввода компонентов для различных соотношений добавок А (режим1)/А режим 2 приведенные в табл.2 рассчитаны при сохранении постоянной суммарной концентрации ([А]+[К]=const). Необходимо отметить, что приведенная в табл.2 λ'_A − флокулирующая активность второго компонента в первом режиме ввода, когда компонент [К] является постоянной величиной; λ'_K − флокулирующая активность второго компонента во втором режиме ввода, когда компонент [А] является постоянной величиной, рассчитывается также по формуле (2) с учетом режима ввода. Согласно приведенным данным из табл. 2, прослеживается тенденция к увеличению флокулирующего эффекта−γ при первом режиме ввода, сначала [К], затем [А]. С повышением концентрации флокулянтов повышается γ, где максимальный эффект седиментации наблюдается в пределах 1,20-1,75·10^{-3} г/дм^3. Кроме того, из таблицы 2 видно, что при одновременном введении компонентов (поликомплекс) γ (флокулирующая активность) существенно ниже, чем при их последовательном введении. Сопоставление данных показывает, что последовательное введение катионного полиэлектролита Zetag-89, а затем анионного Magnofloc-156 приводит к образованию вторичных флокул, обладающих большей компактностью и размером по сравнению с первичными. Это подтверждает реализацию “мостичного” механизма флокуляции, при котором макромолекулы полимера связывают

несколько частиц одновременно. Таким образом, экспериментальные результаты согласуются с предложенным механизмом и объясняют повышение скорости седиментации при выбранном режиме [8-10]. Сравнительный анализ также демонстрирует соответствие современным зарубежным исследованиям, где показано, что полиакриламидные флокулянты существенно влияют на кинетику седиментации и структуру глинистых суспензий [11,12]. Эти работы подтверждают, что последовательное введение катионного и анионного полиэлектролитов обеспечивает формирование более компактных флокул и ускоряет процесс осаждения, что согласуется с нашими экспериментальными данными. Допускается нейтрализационный механизм нарушения устойчивости дисперсной системы, имеющих заряд противоположный по знаку заряду частиц, в присутствии сильно заряженных ВРП [13-15].

Таблица 2–Параметры флокуляции бентонитовой глины смесями анионного [А]-Magnafloc−156 и катионного [К]−Zetag-89 типов флокулянтов

(C_A=C_K) 10^{-3}, г/дм^3	Режим ввода компонентов [А] и [К]	γ	1-й режим		2-й режим		$\frac{\lambda'_A}{\lambda_A}$
			λ_K	λ'_A	λ_A	λ'_K	
0,6	1−[К] + [А]	0,45	0,21	0,24			0,63
	2−[А] + [К]	0,32			0,38	0,058	
	3−поликомплекс	0,27					
1,2	1−[К] + [А]	0,64	0,22	0,31			
	2−[А] + [К]	0,52			0,36	0,074	0,86
	3 -поликомплекс	0,47					
1,5	1−[К] + [А]	0,86	0,18	0,36	0,57	0,041	0,63
	2−[А] + [К]	0,75					
	3−поликомплекс	0,51					
1,75	1−[К] + [А]	1,04	0,29	0,23	0,39	0,047	0,59
	2− [А] + [К]	0,86					
	3−поликомплекс	0,79					
2,1	1−[К] + [А]	0,97	0,18	0,12			0.35
	2−[А] + [К]	0,88			0,34	0,060	
	3−поликомплекс	0,75					

Сопоставление флокулирующего эффекта (соотношение (λ'_i/λ_A) и (λ'_i/λ_K, где λ_i.−для i-го компонента «работающего» индивидуально и λ'_i − когда он является второй добавкой) композиции показывает, что флокулянты [А] и [К] выступают с функцией антагонистических добавок, так как их соотношение остается меньше единицы.

Таким образом, сравнение трёх режимов показало, что последовательное введение катионного, а затем анионного полиэлектролита ([К]+[А]) обеспечивает образование более компактных вторичных флокул и максимальный флокулирующий эффект. Обратный порядок ([А]+[К]) даёт менее выраженный результат, а одновременное введение компонентов (поликомплекс) демонстрирует наименьшую эффективность вследствие частичной блокировки активных центров при образовании интерполимерных комплексов.

Для проверки правильности этой гипотезы была проанализирована вязкость растворов [А] и [К], их смесей с различным соотношением компонентов. Экспериментальное значение приведенной вязкости определяли по формуле (3):

$$\eta_{\text{прив,экс}} = \left(\frac{\eta_{уд}}{C}\right)_{эксп} = \frac{\tau - \tau_o}{\tau_o \cdot C} \quad (3)$$

где, τ, τ_o – время истечения раствора и воды, с; С – концентрация раствора, г/дм^3.

Отношение приведенной вязкости компонентов к их концентраций, как теоретическое значение $(\eta_{уд}/c)_{теор}$ для бинарной смеси компонентов подсчитывали по формуле (4):

$$(\frac{\eta_{уд.}}{c})_{теор.} = (\frac{\eta_{уд.}}{c})_A \cdot \omega_A + (\frac{\eta_{уд.}}{c})_K \cdot (1-\omega_A), \quad (4)$$

где, $(\frac{\eta_{уд}}{c})_A$ и $(\frac{\eta_{уд}}{c})_K$ – приведенные вязкости компонентов [А] и [К], ω_A – массовая доля компонента [А] в смеси.

Количественной характеристикой взаимодействия между полимерами [А] и [К] служил параметр у, (формула 5):

$$y = \frac{(\frac{\eta_{уд}}{C})_{эксп}}{(\frac{\eta_{уд}}{C})_{теор}} = \frac{\eta_{прив,экс}}{\eta_{прив.теор.}} \quad (5)$$

Результаты изучения зависимости параметра у от состава бинарной смеси полиакриламидов [К] и [А] для различных валовых концентраций полимеров представлены на рисунке 1. Условие у=1 свидетельствует об отсутствии специфического взаимодействия между компонентами смеси, при у<1 среднеквадратичные размеры макромолекулярных клубков $(\bar{r})^{1/2}$ уменьшаются, при у>1 происходит увеличение $(\bar{r})^{1/2}$.

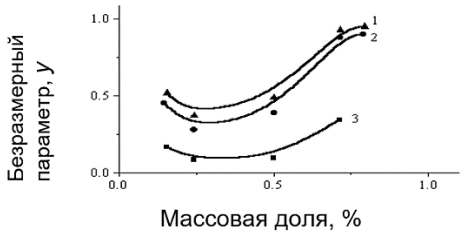


Рисунок 1 – Зависимость параметра у от состава бинарной смеси полиакриламидов [А] и [К] для различных валовых концентраций полимеров: 1-0,1 %; 2-0,005 %; 3-0,01%

Из рисунка 1 видно, что для всех составов [А] + [К] безразмерный параметр у <1, что свидетельствует об уменьшении эффективных размеров макромолекулярных клубков полимеров [А] и [К], чем при их одновременном введении в раствор.

Известно [16-18], что комплексы между полимерами катионного и анионного типов являются сложными полимер-полимерными системами и одновременно осуществляются взаимодействий внутри-и межмолекулярном уровнях, где превалируют силы электростатического взаимодействия, ответственные за внутримолекулярные взаимодействия и за образование интерполимерных комплексов между разнородными парами комплементарных полиэлектролитов. Уменьшение $(\frac{\eta_{уд}}{c})_A$ при наличии в растворе [К] и $(\frac{\eta_{уд}}{c})_K$ при наличии [А] связано с электростатическими взаимодействиями разноименно заряженных макромолекул [А] и [К]. Наиболее сильно этот эффект выражен при соотношениях [К]/[А] ~ 0,4 (минимальные значения параметров у). Смещение минимума для кривых y=f(ω) в сторону компонента [А], вероятно, связано с образованием нестехиометрического интерполимерного комплекса из-за более высоких молекулярных масс анионного ПАА по сравнению с катионным полиакриламидом.

Для проверки этого предположения была изучена концентрационная зависимость приведенной вязкости водных растворов анионного и катионного ПАА и их смесей. Полученные данные представлены на рисунке 2.

Из рисунка 2 видно, что приведенная вязкость ПАА катионного типа (Zetag-89) и ПАА анионного типа (Magnafloc-156) в водном растворе с уменьшением концентрации полиэлектролитов возрастает, что связано с ростом электростатической свободной энергии поли-иона [19-21]. Кроме того, (рис. 2), при титровании катионного ПАА (Zetag-89) анионным ПАА (Magnafloc-156) наблюдается снижение приведенной вязкости $\eta_{пр}$ до 0,2 дл/г при

n= $\frac{[Magnaflok-156]}{[Zetag-89]}$ = 5, в обратном титровании наименьшее значение приведенной вязкости системы $\eta_{пр}$ до 0,2 дл/г наблюдается при значении n = $\frac{[Zetag-89]}{[Magnjflok-156]}$ = 3.

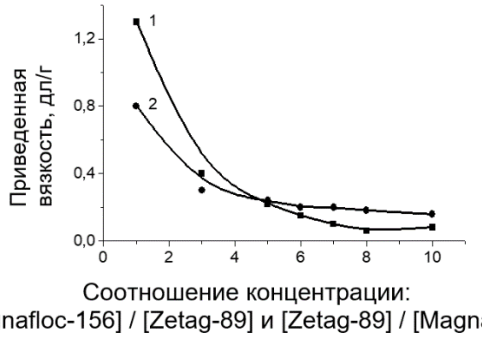
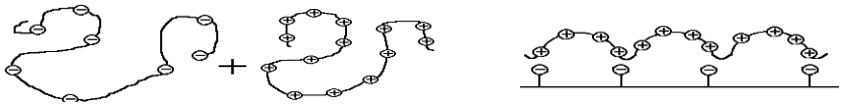
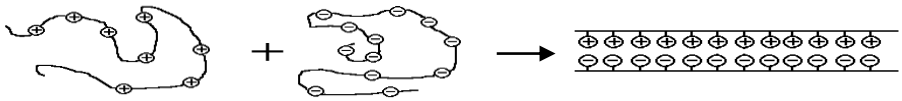


Рисунок 2 –Концентрационная зависимость приведенной вязкости растворов производных полиакриламида катионного и анионного типов, где 1 – Zetag-89 ($0{,}8\cdot10^{-3}$ г/дм^3), 2 – Magnafloc-156 ($0{,}5\cdot10^{-3}$ г/дм^3)

Такие сравнительно малые значения ηпр указывают на образование уплотненных (глобулярных) клубков макромолекул – формирование различных структур, образующих интерполимерные комплексы, где при взаимодействии полиэлектролитов с неодинаковой плотностью заряда, образуются нестехиометричные комплексы следующего строения:



При взаимодействии полиэлектролитов с равной плотностью заряда, по всей вероятности, образуются интерполимерные комплексы так называемого лестничного строения.



Из представленной схемы видно, что электростатическое связывание между противоположно заряженными функциональными группами полиакриламидов катионного и анионного типов должно приводить к изменению заряда вдоль полиэлектролитной цепочки полиакриламида, что не противоречит результатам представленных авторами [19-22].

Таким образом, изучение особенностей кинетики осаждения гидродисперсии БГ в присутствии ВРП различной природы и их смесей показывает, что флокулирующее их действие усиливается при введении в систему сначала катионного, затем анионного полиэлектролитов. ВРП, так как при малых концентрациях (когда макромолекулы находятся в развернутом состоянии) снижается седиментационная устойчивость гидродисперсии в результате адсорбции одной и той же макромолекулы на нескольких частицах с образованием флокул.

Выводы. Установлено, что композиции ВРП−производных полиакриламида−[К]. катионного (Zetag-89) и [А] анионного (Magnoflok−156) при последовательном введении компонентов оказывают лучшее флокулирующее действие, чем при их одновременном введении (поликомплекс) по следующим показателям: – кинетика флокуляции изученной по величине безразмерного параметра (γ) показывает, что образовавшиеся вторичные флокулы, которые были сформированы при взаимодействии гидросуспензий БГ вначале катионным ВРП (первичный флокул) и в дальнейшем анионным ВРП (вторичный флокул) превосходят по своему размеру первичных флокул и седиментируют с большей скоростью с образованием к«мостичного» механизма, а снижение безразмерного параметра (у) указывает на

образование интерполимерных комплексов, где происходит компактизация макромолекулярных участков между агрегируемыми частицами.

Таким образом, результаты проведённых исследований показали, что совместное флокулирующее действие полиэлектролитов катионного и анионного типов на бентонит, применённый для очистки шахтной воды от ионов тяжёлых металлов, усиливается при последовательном введении в систему сначала катионного, затем анионного полиэлектролита. В результате формируется глино-полимерная композиция, обеспечивающая достижение нормативов ПДКр.-х.н. по взвешенным веществам [4].

Представленные результаты исследований выполнены в рамках Программы целевого финансирования Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан по теме ИРН BR24993113 «Создание композитов на основе дифильных водорастворимых полимеров полифункционального назначения» под научным руководством доктора химических наук, профессора, академика Мусабекова К.Б.

Список литературы

1. Effectiveness of use of nanostructure minerals – bentonite of taganskiy deposit for waste water clearing in metallurgy industry / Sh. Muzdybaeva et al // European Journal of Sustainable Development. – 2014. – № 3(3). – P.19-200.
2. Муздыбаева Ш.А. Исследование наноструктурных минералов – бентонитов, используемых в очистке шахтной воды от ионов Cu2+, Pb2+, Cd2+, Zn2+ / Ш.А. Муздыбаева, Г.Ж. Турсбекова, М.К. Жаманбаева // Вестник Нац. инженерной академии РК. – 2020. – № 4(78). – С. 114-122.
3. Application of bentonite clay as a protective barrier in the disposal of radioactive waste of nuclear industry of Kazakhstan / K.B. Musabekov et al // Известия НАН РК. Серия Химии и технологии. – 2023. – № 1(54). – P. 66-77.
4. Приказ Минсельхоза РФ от 13.06.2024. № 320 О внесении изменений в приказ Минсельхоза РФ от 13.12.2016. № 552 Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения (зарег Минюсте РФ 07.08.2024. № 79044).
5. Flocculation and dewatering of the Kaolin slurry treated by single- and dual-polymer flocculants / S. Xu et al // Chemosphere. – 2023. – Vol. 328. – Art. 138445.
6. Седиментационный анализ / Е.С. Аманжолова и др. – Алматы, 2002. – 28 с.
7. Савицкая Т.А. Коллоидная химия: Лабораторный практикум. В 2 ч. Дисперсные системы / Т.А. Савицкая, М.Б. Черепенников, М.П. Шевелева. – Минск, БГУ, 2012. – 200 с.
8. Effect of formation of hydrophilic and hydrophobic-hydrophilic associates on the nature of phase transitions in solutions of copolymers of N-vinylpyrrolidone with methylacrylate and the formation of their complexes with polyacrylic acid / R. Shaikhutdinov et al // Polymers. – 2024. – № 16(584). – P. 1-19.
9. Flocculation of Clay Suspensions by Anionic and Cationic Polyelectrolytes: A Systematic Analysis / A. Shakeel et al // Minerals. – 2020. – Vol. 10, № 11. – Art. 999.
10. Musabekov K.B. Flocculation of kaolin hydrosuspenzion water-soluble polymers and their associates / K.B. Musabekov, Sh.A. Muzdybaeva, Sh. Barany // Abstracts The 4th Asian Symposium on Advanced Materials-Chemistry, Physics & Biomedicine of Functional and Novel Materials, (ASAM-4). Taiwan, October 22-23. – 2013. – P.114.
11. Nonionic polyacrylamide-clay interaction: Insight from sedimentation experiments and viscosity / Y. Choe et al // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2025. – Vol. 13, Issue 5. – Article 118597. https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.118597.
12. Anionic Polyacrylamide Combined with Slag for Enhancing Flocculation–Preloading–Electro-Osmosis Consolidation of High-Water-Content Bentonite Slurry / K. Wang et al // Applied Sciences. – 2026. – Vol. 16, № 13. – Article 6748. https://doi.org/10.3390/app16136748.
13. Adsorption and aggregation of cationic amphiphilic polyelectrolytes on silica / Y. Samoshina et al // Langmuir. – 2005. – Vol. 21, № 7. – P. 2855-2864.
14. Тусупбаев Н.К. Новые композиционные флокулянты / Н.К. Тусупбаев, К.Б. Мусабеков // Химия и химическая технология. – 2001. – № 1. – С. 113-137.

15. El-Mossalamy. Adsorption of Polyvinylpyrrolidone over the Silica Surface: As Affected by Pretreatment of Adsorbent and Molar Mass of Polymer Adsorbate / L.M. Al-Harbi et al // International Journal of Polymer Science. – 2016. – Vol. 2016. – Article ID 2417292.
16. Flocculation of Clay Colloids Induced by Model Polyelectrolytes: Effects of Relative Charge Density and Size / Y. Sakhawoth et al // ChemPhysChem. – 2017. – Vol. 18. – P. 2756-2765.
17. Stabilization of melon cloudy juice with biopolymer agar / S. Tazhibayeva et al // Eastern European Journal of Enterprise Technologies. – 2020. – № 4 (11). – P. 31-38.
18. Modified graft copolymers based on ethylene vinyl acetate as depressants for waxy crude oil and their effect on the rheological properties of oil / G. Mun et al // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2022. – Vol. 213. – Art. 110298.
19. Surface modification of montmorillonite clay with organic molecules / K.B. Musabekov et al // Rasayan Journal of Chemistry. – 2021. – № 14(1). – P. 635-640.
20. Влияние концентрации дисперсной фазы на закономерности флокуляции латекса катионным полиэлектролитом / В.Н. Вережников и др. // Коллоидн. журн. – 2000. – Т. 62, № 1. – С. 26-30.
21. Feng L. Dynamics of Polyelectrolyte Adsorption and Colloidal Flocculation upon Mixing Studied Using Monodispersed Polystyrene Latex Particles / L. Feng, M.A. Cohen Stuart, Y. Adachi // Langmuir. – 2015. – Vol. 31. – P. 850-857.
22. Surface interaction between phyllosilicate particles and sustainable polymers in flotation and flocculation / N. Molaei et al // RSC Advances. – 2022. – Vol. 12. – P. 3708-3715.

References

1. Effectiveness of use of nanostructure minerals – bentonite of taganskiy deposit for waste water clearing in metallurgy industry / Sh. Muzdybaeva et al // European Journal of Sustainable Development. – 2014. – № 3(3). – P.19-200. (in English).
2. Muzdybaeva Sh.A. Issledovanie nanostrukturnykh mineralov – bentonitov, ispol'zuemykh v ochistke shakhtnoi vody ot ionov Cu2+, Pb2+, Cd2+, Zn2+ / Sh.A. Muzdybaeva, G.Zh. Tursbekova, M.K. Zhamanbaeva // Vestnik Nats. inzhenernoi akademii RK. – 2020. – № 4(78). – S. 114-122. (in Russian).
3. Application of bentonite clay as a protective barrier in the disposal of radioactive waste of nuclear industry of Kazakhstan / K.B. Musabekov et al // Izvestiya NAN RK. Seriya Khimii i tekhnologii. – 2023. – № 1(54). – R. 66-77. (in English).
4. Prikaz Minsel'khoza RF ot 13.06.2024. № 320 O vnesenii izmenenii v prikaz Minsel'khoza RF ot 13.12.2016. № 552 Ob utverzhdenii normativov kachestva vody vodnykh ob"ektov rybokhozyaistvennogo znacheniya (zareg Minyuste RF 07.08.2024. № 79044). (in Russian).
5. Flocculation and dewatering of the Kaolin slurry treated by single- and dual-polymer flocculants / S. Xu et al // Chemosphere. – 2023. – Vol. 328. – Art. 138445. (in English).
6. Sedimentatsionnyi analiz / E.S. Amanzholova i dr. – Almaty, 2002. – 28 s. (in Russian).
7. Savitskaya T.A. Kolloidnaya khimiya: Laboratornyi praktikum. V 2 ch. Dispersnye sistemy / T.A. Savitskaya, M.B. Cherepennikov, M.P. Sheveleva. – Minsk, BGU, 2012. – 200 s. (in Russian).
8. Effect of formation of hydrophilic and hydrophobic-hydrophilic associates on the nature of phase transitions in solutions of copolymers of N-vinylpyrrolidone with methylacrylate and the formation of their complexes with polyacrylic acid / R. Shaikhutdinov et al // Polymers. – 2024. – № 16(584). – R. 1-19. (in English).
9. Flocculation of Clay Suspensions by Anionic and Cationic Polyelectrolytes: A Systematic Analysis / A. Shakeel et al // Minerals. – 2020. – Vol. 10, № 11. – Art. 999. (in English).
10. Musabekov K.B. Flocculation of kaolin hydrosuspenzion water-soluble polymers and their associates / K.B. Musabekov, Sh.A. Muzdybaeva, Sh. Barany // Abstracts The 4th Asian Symposium on Advanced Materials-Chemistry, Physics & Biomedicine of Functional and Novel Materials, (ASAM-4). Taiwan, October 22-23. – 2013. – P.114. (in English).
11. Nonionic polyacrylamide-clay interaction: Insight from sedimentation experiments and viscosity / Y. Choe et al // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2025. – Vol. 13, Issue 5. – Article 118597. https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.118597. (in English).
12. Anionic Polyacrylamide Combined with Slag for Enhancing Flocculation–Preloading–Electro-Osmosis Consolidation of High-Water-Content Bentonite Slurry / K. Wang et al // Applied Sciences. – 2026. – Vol. 16, № 13. – Article 6748. https://doi.org/10.3390/app16136748. (in English).

13. Adsorption and aggregation of cationic amphiphilic polyelectrolytes on silica / Y. Samoshina et al // Langmuir. – 2005. – Vol. 21, № 7. – P. 2855-2864. (in English).
14. Tusupbaev N.K. Novye kompozitsionnye flokulyanty / N.K. Tusupbaev, K.B. Musabekov // Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya. – 2001. – № 1. – S. 113-137. (in Russian).
15. El-Mossalamy. Adsorption of Polyvinylpyrrolidone over the Silica Surface: As Affected by Pretreatment of Adsorbent and Molar Mass of Polymer Adsorbate / L.M. Al-Harbi et al // International Journal of Polymer Science. – 2016. – Vol. 2016. – Article ID 2417292. (in English).
16. Flocculation of Clay Colloids Induced by Model Polyelectrolytes: Effects of Relative Charge Density and Size / Y. Sakhawoth et al // ChemPhysChem. – 2017. – Vol. 18. – P. 2756-2765. (in English).
17. Stabilization of melon cloudy juice with biopolymer agar / S. Tazhibayeva et al // Eastern European Journal of Enterprise Technologies. – 2020. – № 4 (11). – R. 31-38. (in English).
18. Modified graft copolymers based on ethylene vinyl acetate as depressants for waxy crude oil and their effect on the rheological properties of oil / G. Mun et al // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2022. – Vol. 213. – Art. 110298. (in English).
19. Surface modification of montmorillonite clay with organic molecules / K.B. Musabekov et al // Rasayan Journal of Chemistry. – 2021. – № 14(1). – R. 635-640. (in English).
20. Vliyanie kontsentratsii dispersnoi fazy na zakonomernosti flokulyatsii lateksa kationnym poliehlektrolitom / V.N. Verezhnikov i dr. // Kolloidn. zhurn. – 2000. – T. 62, № 1. – S. 26-30. (in Russian).
21. Feng L. Dynamics of Polyelectrolyte Adsorption and Colloidal Flocculation upon Mixing Studied Using Monodispersed Polystyrene Latex Particles / L. Feng, M.A. Cohen Stuart, Y. Adachi // Langmuir. – 2015. – Vol. 31. – P. 850-857. (in English).
22. Surface interaction between phyllosilicate particles and sustainable polymers in flotation and flocculation / N. Molaei et al // RSC Advances. – 2022. – Vol. 12. – P. 3708-3715. (in English).

Ш.А. Мұздыбаева[*], Қ.Б. Мұсабеков[2], Н.Қ. Нөкербекова[1], А.Ж. Жеңісова[1], Д.М-К Ибраимова[2]
[1*]Халықаралық инженерлік-технологиялық университеті,
050060, Қазахстан Республикасы, Алматы қ,әль-Фараби даңғылы, 93г/5,
[2]Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,
050040, Қазахстан Республикасы, Алматы қ,әль-Фараби даңғылы, 71
*e-mail: Sharbanu1958@mail.ru

ТАУ-КЕН ӨНЕРКӘСІБІНДЕГІ ШАХТА СУЛАРЫН ТАЗАРТУДА ҚОЛДАНЫЛАТЫН БЕНТОНИТ БАЛШЫҒЫ ГИДРОСУСПЕНЗИЯСЫНЫҢ ПОЛИАКРИЛАМИДТІ ПОЛИЭЛЕКТРОЛИТТЕРМЕН ФЛОКУЛЯЦИЯСЫ

Шығыс Қазақстан облысы Таған кен орнындағы бентонит балшықтары жоғары сорбциялық сыйымдылыққа ие болғандықтан тау-кен өнеркәсібі шахта суларынан ауыр металл иондарын, балық шаруашылығы үшін белгіленген шекті рұқсат етілген концентрация (ШРК) деңгейіне дейін тазарта алады. Дегенмен, бентонитті қолдану тазартылған судың лайлылығын арттырып, практикалық қолданылуына кедергі келтіреді.

Бұл мәселені шешу үшін суда еритін полиэлектролиттер (СЕП) – катиондық (Zetag-89) және аниондық (Magnoflok-156) полиакриамид туындыларын қолдану ұсынылады. Нәтижесінде, катиондық және аниондық СЕП-ді кезекпен енгізу арқылы жоғары компактизацияланған бірінші және екінші реттік флокулалар түзіледі. Бұл судың лайлылығын төмендетіп, ауыр металл иондарын сорбциялау тиімділігін сақтай отырып, тұндыру үрдісін жылдамдатады. Зерттеудің ғылыми жаңалығы табиғи минералдар мен синтетикалық полимерлерді біріктіретін жаңа буын - органоминералды композициялық материалды өндірістік суларды ШРК дейін терең тазартуға мүмкіндік береді. Практикалық маңызы – ұсынылған технология тау-кен өнеркәсібі шахта суларын кешенді тазарту үшін қолдану мүмкіндігі, әрі қоршаған ортаны қорғаудың Халықаралық тұрақты даму концепциясына сәйкес келеді.

Түйін сөздер: *бентонит балшығы, полиэлектролиттер, флокуляция, шахталық су, флокуляциялық белсенділік, салыстырмалы тұтқырлық, тұндыру.*

Sh. Muzdybaeva[*], K. Musabekov[2], N. Nokerbekova[1], A. Zhenisova[1], D. Ibraimova[2]
[1]International University of Engineering and Technology,
050060, Republik Kazakhstan, Almaty; 93г/5 al-Farabi Avenue
[2] Al-Farabi Kazakh National University,
050040, Republik Kazakhstan, Almaty; 71 al-Farabi Avenue
*e-mail: sh.muzdybaeva@kazetu.kz

FLOCCULATION OF BENTONITE CLAY SUSPENSION USED IN MINE WATER TREATMENT OF THE MINING INDUSTRY BY POLYACRYLAMIDE POLYELECTROLYTES

East Kazakhstan region possesses significant reserves of bentonite clays from the Tagan deposit, which are characterized by high sorption capacity and the ability to effectively remove heavy metal ions from mine waters of the mining industry down to the permissible concentration level for fisheries. However, the use of bentonite increases the turbidity of treated water, which limits its practical application in water bodies.

To address this issue, water-soluble polyelectrolytes (WSP) – cationic (Zetag-89) and anionic (Magnoflok-156) derivatives of polyacrylamide – are proposed as flocculants. Sequential introduction of cationic and anionic WSP leads to the formation of primary and secondary flocs with enhanced compaction. This accelerates sedimentation and reduces turbidity while maintaining high efficiency of heavy metal sorption. The scientific novelty of the study lies in the development of next-generation organo-mineral composite materials that combine natural minerals and synthetic polymers. Such materials enable deep purification of industrial waters and minimize side effects associated with natural sorbents. The practical significance of the research consists in the possibility of implementing the proposed technology for comprehensive mine water treatment, which meets modern environmental protection requirements and supports sustainable development of the mining industry.

Key words: *bentonite clay, polyelectrolytes, flocculation, mine water, flocculating activity, reduced viscosity, sedimentation.*

Сведения об авторах

Шарбану Акказиновна Муздыбаева* − кандидат химических наук, ассй профессор кафедры «Биохимическая инженерия» Международного инженерно-технологического университета, Алматы, Казахстан; e-mail: Sharbanu1958@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4882-3845.

Куанышбек Битуович Мусабеков − доктор химических наук, академик Высшей школы РК**,** профессор кафедры «Аналитическая, коллоидная химия и технология редких элементов» Казахского Национального университета имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан; e-mail: musabekov40@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1114-1901.

Назым Кыдырхановна Нокербекова − PhD, асс.профессор кафедры «Биохимическая инженерия» Международного инженерно-технологического университета, Алматы, Казахстан; e-mail: nnazik@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5761-8993.

Акбота Женискызы Женисова − кандидат химических наук, директор департамента по академическим вопросам Международного инженерно-технологического университета, Алматы, Казахстан; e-mail: zhenisova_a@metu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-5474-7328.

Дана Мыкты-Кереевна Ибраимова − кандидат химических наук, старший преподаватель, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан; e-mail: dana_kereevna@kaznu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1761-9745.

Авторлар туралы мәліметтер

Шарбану Акказиновна Мұздыбаева* − химия ғылымдарының кандидаты, Халықаралық инженерлік-технологиялық университеті «Биохимиялық инженерия» кафедрасының қауым. профессоры, Алматы, Қазақстан; e-mail: Sharbanu1958@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4882-3845.

Куанышбек Битуович Мұсабеков −химия ғылымдарының докторы, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті «Аналитикалық, коллоидтық химия және сирек элементтер технологиясы» кафедрасының профессоры, Алматы, Қазақстан; e-mail: musabekov40@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1114-1901.

Назым Кыдырхановна Нөкербекова − PhD, Халықаралық инженерлік-технологиялық университеті «Биохимиялық инженерия» кафедрасының қауым. проф., Алматы, Қазақстан; e-mail: nnazik@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5761-8993.

Ақбота Жеңісқызы Жеңісова − химия ғылымдарының кандидаты, Халықаралық инженерлік-технологиялық университеті Академиялық мәселелер жөніндегі департаменттың директоры, Алматы, Қазақстан; e-mail: zhenisova_a@metu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-5474-7328.

Дана Мыкты-Кереевна Ибраимова − химия ғылымдарының кандидаты, аға оқытушы, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті; Алматы, Қазақстан; e-mail: dana_kereevna@kaznu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1761-9745.

Information about the author

Sharbanu Muzdydayeva* − Candidate of chemical sciences, Ass.Professor Department of "Biochemical Engineering" International Engineering and Technological University, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: Sharbanu1958@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4882-3845.

Kuanyshbek Musabekov − doctors of chemical sciences, Professor Department of Analytical, Colloid Chemistry and Technology of Rare Elements Al-Farabi Kazakh National University. Almaty, Kazakhstan; e-mail: musabekov40@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1114-1901.

Nazym Nokerbekova − PhD, Ass. Professor Department of «Biochemical Engineering» International Engineering and Technological University, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: nnazik@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5761-8993.

Akbota Zhenisova − Candidate of chemical sciences, Director of the Department of Academic AffairsInternational Engineering Technological University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: zhenisova_a@metu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-5474-7328.

Dana Mykty-Kereevna Ibraimova − Candidate of chemical sciences, Senior Lecturer, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: dana_kereevna@kaznu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1761-9745.

Поступила в редакцию 23.06.2026
Поступила после доработки 27.08.2026
Принята к публикации 01.09.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-91

CC BY 4.0
Check for updates

ҒТАХР: 31.21.27

Р.А. Турманов*, Б.Г. Алимхан, Р.У. Жаппарбергенов, Н.Ә. Тоғызбаева, Н.О. Аппазов
Қорқыт Ата атындағы Қызылорда университеті,
120014, Қазақстан Республикасы, Қызылорда, Айтеке би көшесі, 29 А
*e-mail: rakowrakha@gmail.com

4*H*-1,2,4-ОКСАДИАЗИН-5(6*H*)-ОН ЖАҢА ТУЫНДЫЛАРЫНЫҢ СИНТЕЗІ

Аңдатпа: *Бұл жұмыста медицина және фармацевтика саласында қолдануға кең әлеуеті бар гетероциклді қосылыстардың маңызды түрі болып табылатын 4H-1,2,4-оксадиазин-5(6H)-онның жаңа туындыларын синтездеудің жетілдірілген әдісі ұсынылған. Синтез N'-гидрокси-4-метилбензимид және N'-гидрокси-5-метилтиофен-2-карбоксимидидтің карбон қышқылдарының метил және этил галоген туындыларымен әрекеттесуіне негізделген. Зерттеу барысында диметиосульфоксид ерітіндісіндегі натрий трет-бутилатын бөлме температурасында қолдану 76%-ға дейінгі шығыммен мақсатты өнімдердің түзілуі кезіндегі тиімді цикл түзілуді қамтамасыз ететіні анықталды. Бастапқы амидоксимдердің ароматты немесе гетероциклді фрагментіндегі орынбасарлардың әсері реакцияның жүруіне айтарлықтай әсер етпейтіндігі анықталды, бұл ұсынылған тәсілдің жан-жақтылығын көрсетеді. Барлық синтезделген қосылыстар ядролық магниттік резонанс және жоғары дәлдіктегі масс-спектрометр сияқты заманауи талдау әдістерімен сипатталды, бұл олардың құрылымы мен тазалығын толық растады. Әзірленген әдіс улы реагенттерді немесе метал катализаторларын пайдалануды қажет етпейтіндіктен, жұмсақ жағдайларымен, реакцияны жүргізудің қарапайымдылығымен және экологиялық тазалығымен сипатталады. Алынған оксадиазин туындылары жоғары биологиялық қасиеті бойынша, бактерияға қарсы, ісікке қарсы және нейропроткеторлық қасиеттері бар перспективалы фармакофорлар ретінде ерекше қызығушылық тудырады. Жүргізілген бағытталған синтез нәтижелері құрылымды түрлендіру және жаңа гетероциклді жүйелердің биологиялық белсенділігін зерттеу бағытындағы ғылыми жұмыстарды әрі қарай дамытуға негіз болады.*

Түйін сөдер: *4H-1,2,4-оксадиазин-5(6H)-он, амидоксимдер, циклдену, гетероциклді қосылыстар, реакцияны оңтайландыру, спектроскопиялық сипаттама.*

©Р.А. Турманов, Б.Г. Алимхан, Р.У. Жаппарбергенов, Н.Ә. Тоғызбаева, Н.О. Аппазов

Кіріспе

Химияда 1,2,4-оксадиазиндер мен оксадиазолдар синтезінің тиімді әдістерін әзірлеу маңызды бағыт болып табылады.

Амидоксимдердің малеиндік және фумар эфирлерімен әрекеттесуі арқылы 1,2,4-оксадиазиннің алынуының ерекше жолы ұсынылды [1]. Бұл синтездің нәтижесінің маңызы болмады және бұл синтездеудің басқа жолдарын іздеуге мүмкіндік берді.

Зерттеу барысында амидоксимдерден 1,2,4-оксадиазолдарды синтездеудің электрохимиялық әдісі жасалды [2]. Электрохимиялық жағдайларды пайдалану дегидрогендік цикл түзуді жұмсақ жағдайларда жүргізуге мүмкіндік береді, бұл тәсіл экологиялық таза және кең көлемде масштабтау үшін тиімді етеді.

Сілтемедегі еңбектер оңтайлы жағдайлардағы синтездің маңыздылығын көрсетеді [3-5]. Осылайша, мақалада бөлме температурасында биологиялық белсенді 1,2,4-оксадиазолдарды алу әдісі сипатталған, бұл өнімнің жоғары шығымын қамтамасыз етеді [3].

Мақалада амидоксимдер мен карбон қышқылының эфирлерінен қыздырмай 1,2,4-оксадиазолдардың бір сатылы синтезі көрсетілген алғашқы мақала болып табылады, бұл оксадиазол сақинасын қамтитын фармацевтикалық тұрғыдан маңызды карбон қышқылдарының процесін айтарлықтай жеңілдетеді.

Бұл мақала [4] амидоксимдер мен карбон қышқылының эфирлерінен қыздырмай 1,2,4-оксадиазолдардың бір сатылы синтезі көрсетілген алғашқы мақала болып табылады, бұл оксадиазол сақинасын қамтитын фармацевтикалық тұрғыдан маңызды карбон қышқылдарының процесін айтарлықтай жеңілдетеді [5].

Сонымен қатар, оксадиазол-5-ондарды синтездеу үшін пайдаланылған *N*-орынбасқан амидоксимдерді алудың ыңғайлы бір сатылы әдісі ұсынылды [6]. Бұл әдіс өзінің жан-жақтылығымен және қолжетімді туындылардың кең ауқымымен ерекшеленді.

Осылайша, оксадиазиндерді алудың заманауи тәсілдері процестерді жеңілдетуге, энергия шығындарын азайтуға және «жасыл» технологияларды пайдалануға ұмтылумен сипатталады.

Қосылыстар туындыларының құрылымы мен қасиеттерін түсінуге авторлар жаңа 1,2,4-оксадиазиндердің ядролық магниттік резонанс ^{13}C спектрлеріндегі химиялық ығысуларға әртүрлі орынбасарлардың әсерін анықтаған зерттеу айтарлықтай үлес қосты [7]. Бұл тәсіл құрылымдық-қасиеттік үлгілерді анықтауға мүмкіндік берді, бұл қосылыстарды одан әрі мақсатты түрде модификациялау үшін маңызды.

Мақалада металға тәуелсіз катализатор ретінде графен оксидін пайдаланып 1,2,4-оксадиазолдардың синтезі сипатталған [8]. Мұнда, бір мезгілде оттегі доноры және электрон акцепторы ретінде әрекет ететін графен оксиді қос каталитикалық белсенділігіне ерекше назар аударылды. Бұл тәсіл оксадиазиндерді функционализациялау және бірегей қасиеттері бар туындыларды алу үшін жаңа мүмкіндіктерді ашады.

Сонымен, осы бағыттағы зерттеулер, алмастырғыштардың молекуланың электрондық сипаттамаларына әсерін тереңірек түсінуге мүмкіндік береді және жаңа туындыларды мақсатты түрде синтездеу мүмкіндіктерін кеңейтуде ерекше рөл атқарады.

Оксадиазиндер мен оксадиазолдарға деген айтарлықтай қызығушылық олардың фармакологиялық қасиетіне байланысты. Бұл қосылыстарды дәрілік заттарды әзірлеу үшін мүмкіндігі зор құрылымдар ретінде қарастыруға болады. Шолу мақалада 1,2,4-оксадиазолдарға синтетикалық тәсілдер туралы ақпарат жүйеленді және олардың инфекцияға қарсы тұру әлеуетіне баса назар аударылды [9]. Осылайша, әдебиет деректерді 1,2,4-оксадиазиндердің туындылары және онымен байланысты құрылымдар органикалық синтез үшін ғана емес, сонымен қатар айтарлықтай фармакологиялық әлеуетке ие екенін көрсетеді. Бұл соңғы жылдары осы саладағы зерттеулердің белсенді дамуын түсіндіреді.

Оксадиазиндер мен оксадиазинон туындыларының рентгендік дифракциялық талдауына арналған бірқатар жұмыстар бар. Зерттеу барысында жаңа 2-арил-5-фенил-1,3,4-оксадиазин-6-ондардың және прекурсорларының құрылымдық сипаттамалары зерттелді [10].

D-камфорадан оксадиазинонның туындысы алынды, ол рентгендік дифракциялық талдау арқылы сипатталды [11]. Қатты камфора жүйесінің болуы оксадиазинондарды хиральді қосалқы топтар ретінде стереохимиялық пайдалануға шектеулер қоятыны анықталды.

Классикалық зерттеулер оксадиазиндердің геометриясын түсінуге де үлес қосты: оларда 2,5-дифенил-6-оксо-1,3,4-оксадиазиндер үшін бірқатар кристаллографиялық деректер бар, бұл олардың құрылымы мен реакцияға түсу қабілеттілігі арасындағы байланысты бақылауға мүмкіндік береді [12].

Спетроскопиялық әдістер заманауи түрде гетероциклдердің құрылымын анықтауда маңызды рөл атқарады. Тиофенилмен алмастырылған оксадиазол-тион үшін кешенді эксперименттік талдау (FT-IR, лазер-Раман және ядролық магниттік резонанс) және кванттық-химиялық есептеулермен салыстыру жүргізілді [13].

Осыған ұқсас әдістер зерттеуде [14] қолданылды, онда 5-(тиофен-2-ил)-2,3-дигидро-1,3,4-оксадиазол-2-тион үшін спектроскопиялық және теориялық талдау жүргізілді. Бұл сипаттама жұтылу жолақтарын анықтауға және қосылыстың электрондық құрылымын нақтылауға мүмкіндік берді.

1,2,4-оксадиазол-5(4*H*)-он туындыларының инфрақызыл және ядролық магниттік резонанс спектрлеріне еріткіштің әсері қарастырылды. Авторлар ортаның полярлығы химиялық ығысуларға және жолақтардың қарқындылығына айтарлықтай әсер ететінін көрсетті, бұл спектрлерді түсіндіру кезінде ескерілуі керек.

Тәжірибелік әдістермен қатар, аралас тәсілдер белсенді қолданылады. Мақала автолары 2,5-диарилоксадиазинондардың синтезін сипаттап, оларды әрі қарай құрылымдық зерттеулерде қолдану мүмкіндіктерін көрсетті [15].

Зерттеуде оксадиазинон мен оксадиазолон туындыларының қатты фазалы синтезі жүзеге асырылды, содан кейін салынған қаңқалардың сәйкестігін растау үшін спектроскопиялық және құрылымдық зерттеулер жүргізілді [16].

Шолу мақалада оксадиазол лигандтары бар металл кешендері қарастырылды [17]. Авторлар координация, спектроскопия және электронды эффектілер туралы деректерді жүйеледі, бұл орынбасарлардың және қоршаған ортаның физика-химиялық қасиеттерге әсерін түсіну үшін құнды.

Соңында, тұрақсыз аралық өнімдерден оксадиазинондардың түзілуінің механикалық аспектілеріне баса назар аударылады [18]. Мақалада өтпелі күйлердің спектроскопиялық және теориялық сипаттамаларының нәтижелері ұсынылған, бұл осы қосылыстардың белсенділігін тереңірек түсінуге мүмкіндік береді.

Антибактериалды белсенділік: оксадиазол ядросына негізделген бактерияға қарсы жаңа агенттерді әзірлеу маңызды міндет болып қала береді. Шолу мақалада оксадиазол мен тиадиазол туындыларының, соның ішінде төзімді штамдарға қарсы, бактерияларға қарсы белсендлігі туралы ақпарат бар [19]. Зерттеуде [20] 1,2,4-оксадиазол бөлігі бар қосылыстар метициллин-резистентті алтын түсті стафилококк-қа (MRSA) қарсы антибиотикалық әсерді күшейтетіні, айқын синергияны қамтамасыз ететіні көрсетілген. Мұндай әсер етулер инфекцияларды біріктірілген емдеу үшін мүмкіндіктер ашады. Жұмыста [21] грам оң спора түзетін тек анаэробты бактерияларға (*Clostridioides difficile*) қарсы жоғары арнайы белсенділігі бар жаңа 1,2,4-оксадиазол сипатталған, бұл әсіресе ауыр ішек инфекцияларын емдеу үшін маңызды. Соңында, мақалада [22] антимикробты заттарды, метаболизмдерді жою үшін оксадиазолдардың құрылымдық модификациясының стратегиялары талқыланады.

Кейбір оксадиазол туындылары нейродегенеративті процестерге қатысатын ферменттерге қарсы перспективалы белсенділік көрсетеді [23]. Альцгеймер ауруымен байланысты негізгі ферменттерге қарсы ингибиторлық белсенділік көрсететін жаңа қосылыстар синтезделді. Молекулалық докинг бұл құрылымдардың белсенді фермент орындарына байланысу қабілетін растады. Зерттеу [24] моноаминоксидазаның (МАО) тежелеуін көрсеткен оксадиазол-пиперазин гибридтеріне арналған. Мұндай қосылыстарды жаңа антидепрессанттар мен нейропротекторларды жасауға кандидаттар ретінде қарастыруға болады.

Паразиттік ауруларға қарсы жаңа дәрілерді іздеу маңызды бағыт болып қала береді. Мұнда 1,2,4-оксадизол туындыларының висцеральды лейшманиозды тудыратын жасушаішілік паразиттік протистке (*Leishmania infantum)* қарсы белсенділігі көрсетілген [25]. Бірқатар қосылыстардың паразиттерге қарсы айтарлықтай әсері бар екені тәжірибе жүзінде анықталды, бұл лейшманиозға қарсы дәрілік заттарды әзірлеуге мүмкіндік береді.

Оксадиазол туындыларының ісікке қарсы қасиеттері соңғы жылдары белсенді түрде зерттелді. Ісік жасушаларына қарсы айқын цитотоксикалық белсенділік көрсеткен 1,2,4-

оксадиазолдың сульфонамидпен конъюгаттары синтезделді [26]. Зерттеуде [27], 1,2,5-оксадиазол туындыларының жинағын профильге қарсы скрининг жүргізілді, ісікке қарсы жоғары белсенділігі бар қосылыстар анықталды және құрылымдық-белсенділік талдауы шеңберіндегі негізгі заңдылықтар белгілі болды. Шолу мақалада [28] оксадиазолдардың 2019-2023 жылдарға арналған ісікке қарсы әсер етуі туралы деректер қорытындыланған, молекулаларды жобалауға стратегиялық тәсілдер мен оларды ісікке қарсы терапияда қолдану мүмкіндіктері атап көрсетілген.

Материалдар мен әдістер

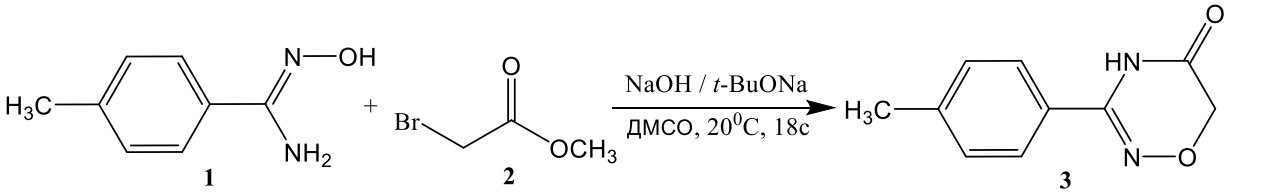
Реагенттер мен еріткіштер Merck-тен алынды және қосымша тазартусыз қолданылды. Реакцияның барысы ультракүлгін сәуленің астында Macherey-Nagel Silufol UV-254 пластиналарында аналитикалық жұқа қабатты хроматография (ЖҚХ) көмегімен бақыланды.

Ядролық магниттік резонанс спектрлері Bruker Avance DPX 400 спектрометрінде тіркелді, еріткіш ретінде диметилсульфоксид-d_6 немесе дейтерохлороформ қолдана отырып, ^{1}H үшін 400 МГц, ^{13}C үшін 101 МГц жиілікте жұмыс жасайды. Химиялық ығысулар (δ) ішкі сілтемелер ретінде еріткіш сигналдары бар миллионға шаққандағы бөліктермен (ppm) көрсетіледі: DMSO-d_6-де 2.50 ppm (^{1}H) және 39.50 ppm (^{13}C), $CDCl_3$-де 7.26 ppm (^{1}H) және 77.16 ppm (^{13}C). Сигналдың еселіктері с (синглет), д (дуплет), т (триплет), кв (квартет), м (мультиплет) және br (кеңейтілген) деп қысқартылған. Байланыс константы (J) Герцпен (Гц) берілген. Балқу температуралары IA 9300 электротермиялық цифрлық балқу температурасы аппаратында ашық капиллярлық түтіктер арқылы өлшенді. Жоғары дәлдіктегі масс-спектрометр (HRMS) Bruker Maxis-qTOF қондырғысында электроспрейді иондау (ESI) теріс режимінде алынды.

Нәтижелер мен талқылау

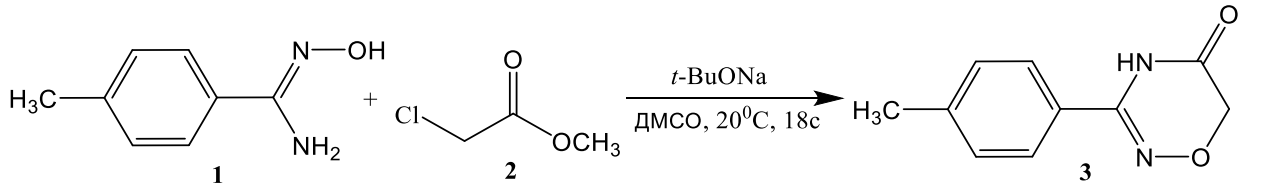
Бұл зерттеуде ең алдымен *N*'-гидрокси-4-метилбензимидтің 1 метил 2-галоацетаттармен 2 конденсациялану жағдайларын оңтайландыру міндеті қойылды. *N*'-гидрокси-4-метилбензимидпен 1 2-бромацетамид 2 реакциясы бөлме температурасында диметилсульфоксидте натрий гидроксидінің қатысында 18 сағат бойы жүргізілді (1-сызба). Өнімнің шығымдылығы 29.5% құрады. Әрі қарай натрий гидроксидінің орнына натрий *трет*-бутилатын қолдандық. Бұл бізге 43% шығымдылықпен шектелген циклдену өнімінің 3-(*p*-толил)-4*H*-1,2,4-оксадиазин-5(6*H*)-он **3** үлесін арттыруға мүмкіндік берді.

1-сызба



N'-гидрокси-4-метилбензимид 1 метил 2-хлорацетатымен 2 натрий *трет*-бутилаты қатысында диметилсульфоксидте бөлме температурасында реакциясы барысында 3-(*P*-толил)-4*H*-1,2,4-оксадиазин-5(6*H*)-он 3 қосылысы 51% шығыммен синтезделді. (2-сызба). Реакция уақытын 48 сағатқа дейін ұзарту өнімнің шығымына әсер етпеді.

2-сызба

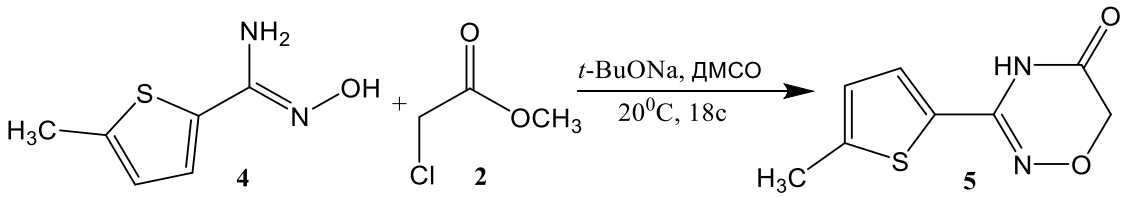


Метил 2-хлорацетатты субстрат ретінде пайдалану 3-(*p*-толил)-4*H*-1,2,4-оксадиазин-5(6*H*)-онды 3 51% шығыммен алуға жағдай жасайды, осылайша реакцияның оңтайлы шарттары анықталды (негізді таңдау, әрекеттесуші заттардың мөлшері, еріткіш және уақыт).

Реакцияның оңтайландырылған жағдайын қолдана отырып, *N*'-гидрокси-5-метилтиофен-2-карбоксимидамидтың 4 карбонильді қосылыстармен реакциясы жүргізілді 2,6,8. *N*'-гидрокси-5-метилтиофен-2-карбоксимидамидтың 4 метил 2-хлорацетатпен 2

реакциясы диметилсульфоксидте бөлме температурасында натрий *трет*-бутилаты қатысында әрекеттесті, реакцияның ұзақтығы 18 сағат, өнімнің шығымы 76% көрсетті (3-сызба).

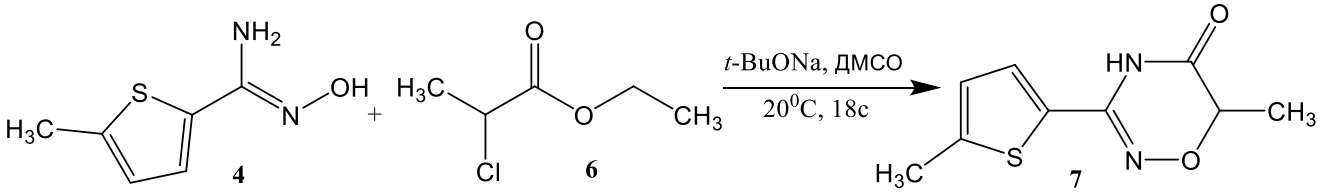
3-сызба



4 2 5

N'-гидрокси-5-метилтиофен-2-карбоксимидамид 4 этил-2-хлорпропаноатпен 6 қосылуы барысында 75% шығыммен 6-метил-3-(5-метилтиофен-2-ил)-4*H*-1,2,4-оксадиазин-5(6*H*)-он 7 түзілді (4-сызба).

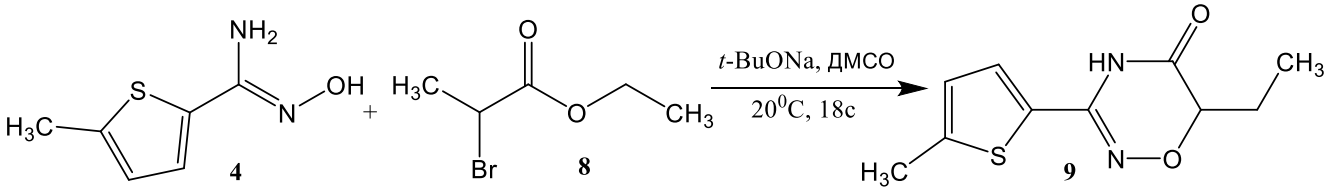
4-сызба



4 6 7

N'-гидрокси-5-метилтиофен-2-карбоксимидамид 4 этил-2-бромбутаноатпен 8 реакциясы нәтижесінде 6-этил-3-(5-метилтиофен-2-ил)-4*H*-1,2,4-оксадиазин-5(6*H*)-он 9 алынды, өнім шығымы 75% құрады (5-сызба).

5-сызба



4 8 9

Барлық қосылыстар жоғары шығыммен алынды. Амидоксимдердің фенил сақинасында электрон-акцептор немесе электрон-донор алмастырғыштарының болуы мақсатты өнімнің шығымына айтарлықтай әсер етпейтіндігі анықталды.

4H-1,2,4-оксадиазин-5(6H)-он туындылары синтезінің жалпы әдістері (3,5,7,9).

N'-гидрокси-4-метилбензимид 1 және *N*'-гидрокси-5-метилтиофен-2-карбоксимидамидтың 4 (2 ммоль) бөлме температурасында диметилсульфоксидте (3 мл) ерітіліп, түзілген ерітіндіге натрий *трет*-бутилаты (384 мг, 4 ммоль) құйылды. Реакциялық қоспа 10 минут араластырылып, оған күрделі эфир 2,6,8 (2.4 ммоль) қосылды. Әрі қарай қоспа бөлме температурасында 18 сағат бойы араластырылды, одан кейін тұз қышқылымен сұйылтылды (10%-дық судағы ерітіндісі) (30 мл). Сүзу арқылы алынған тұнбаны жинап, салқын сумен жуылды (5 мл), 50°C температурада ауада кептірілді.

3-(4-Метилфенил)-4*H*-1,2,4-оксадиазин-5(6*H*)-он (3). Ақ ұнтақ; шығымы 51%; балқу температурасы 140-141°C. Ядролық магниттік резонанс ^{1}H (400 МГц, $CDCl_3$) δ 9.05 (с, 1H), 7.66 (д, J = 8.2 Гц, 2H), 7.31 (д, J = 8.0 Гц, 2H), 4.47 (с, 2H), 2.43 (с, 3H). Ядролық магниттік резонанс ^{13}H (101 МГц, $CDCl_3$) δ 166.6, 151.0, 142.3, 129.8, 126.0, 125.7, 66.9, 21.5. Жоғары дәлдікті масс-спектрометр (ESI), m/z: $[M-H]^-$ $C_{10}H_9N_2O_2$. есептелді 189.0669; анықталды 189.0667.

3-(5-Метилтиофен-2-ил)-4*H*-1,2,4-оксадиазин-5(6*H*)-он (5). Бозғылт-сарғыш ұнтақ; шығымы 76%; балқу температурасы 216-218°C. Ядролық магниттік резонанс ^{1}H (400 МГц, $CDCl_3$) δ 9.30 (с, 1H), 7.35 (д, J = 3.7 Гц, 1H), 6.80 (д, J = 3.5 Гц, 1H), 4.47 (с, 2H), 2.54 с, 3H). Ядролық магниттік резонанс ^{13}C (101 МГц, ДМСО-d_6) δ 166.4, 148.4, 144.6, 129.7, 128.9, 126.8, 67.5, 15.7. Жоғары дәлдікті масс-спектрометр (ESI), m/z: $[M-H]^-$ есептелді $C_8H_8N_2O_2S^-$ 195.0234; анықталды 195.0235.

6-Метил-3-(5-метилтиофен-2-ил)-4*H*-1,2,4-оксадиазин-5(6*H*)-он (7). Бозғылт-сарғыш ұнтақ; шығымы 75%; балқу температурасы 167-169°C. Ядролық магниттік резонанс ^{1}H (400 МГц, ДМСО-d_6) δ 11.41 (с, 1H), 7.56 (д, J = 3.7 Гц, 1H), 6.85 (д, J = 2.4 Гц, 1H), 4.34 (кв, J = 6.7

Гц, 1H), 2.45 (с, 3H), 1.35 (д, J = 6.7 Гц, 3H). Ядролық магниттік резонанс ^{13}C (101 МГц, ДМСО-d_6) δ 168.3, 148.4, 144.5, 129.6, 129.0, 126.7, 72.7, 15.7, 13.8. Жоғары дәлдікті масс-спектрометр (ESI), m/z: $[M-H]^-$ есептелді $C_9H_9N_2O_2S^-$ 209.0390; анықталды 209.0391.

6-Этил-3-(5-метилтиофен-2-ил)-4*H*-1,2,4-оксадиазин-5(6*H*)-он (9). Бозғылт-сарғыш ұнтақ; шығымы 75%; балқу температурасы 151-153°C. Ядролық магниттік резонанс ^{1}H (400 МГц, ДМСО-d_6) δ 11.40 (с, 1H), 7.55 (д, J = 3.7 Гц, 1H), 6.85 (д, J = 3.7 Гц, 1H), 4.19 (дд, J = 7.8, 4.6 Гц, 1H), 2.45 (с, 3H), 1.90-1.81 (м, 1H), 1.73-1.65 (м, 1H), 0.99 (т, J = 7.4 Гц, 3H). Ядролық магниттік резонанс ^{13}C (101 МГц, ДМСО-d_6) δ 167.8, 148.2, 144.5, 129.6, 129.0, 126.7, 77.2, 21.5, 15.7, 10.0. Жоғары дәлдікті масс-спектрометр (ESI), m/z: $[M-H]^-$ есептелді $C_{10}H_{11}N_2O_2S^-$ 223.0547; анықталды 223.0554.

Қорытынды

4*H*-1,2,4-оксадиазин-5(6*H*)-онның жаңа туындыларын алудың зерттеу жұмыстары барысында *N*'-гидрокси-4-метилбензимид және *N*'-гидрокси-5-метилтиофен-2-карбоксимидамидтің карбон қышқылдарының әртүрлі галоген туындыларымен реакцияларына негізделген синтездеудің тиімді әдісі жасалды және тәжірибе жүзінде расталды. Реакцияның жүру жағдайларын оңтайландыру бөлме температурасында диметилсульфоксидте натрий *трет*-бутилатын қолдана отырып, жақсы нәтижелерге қол жеткіуге болатынын анықтауға мүмкіндік берді, бұл 76%-ға дейінгі шығымдылықпен мақсатты өнімдердің түзілуін қамтамасыз етеді. Реакция уақытын 48 сағатқа ұзарту өнімнің шығымына айтарлықтай әсер етпейді, бұл процестің тұрақты екенін және 18 сағат ішінде аяқталатынын көрсетеді.

Бастапқы амидоксимдердің ароматты немесе гетероциклді фрагментіндегі орынбасарлардың табиғаты циклденудің тиімділігіне айтарлықтай әсер етпейтіндігі, бұл әдісті жан-жақты және қайталанатын ететіндігі көрсетілген. Барлық синтезделген қосылыстар ядролық магнитті резонанс ^{1}H, ^{13}C және жоғары дәлдікті масс-спектрометрия арқылы сапалық және сандық құрамы сипатталды, бұл қондырғыларда қосылыстардың құрылымы мен құрамының тазалығы анықталды.

Әзірленген әдіс қарапайым, экологиялық таза және улы реагенттерді немесе метал катализаторлары қолданылмайды, бұл оны кең көлемді зертханалық және өнеркәсіптік пайдалану үшін тиімді етеді. Алынған оксадиазин туындылары айқын биологиялық қасиеті бар – бактерияға қарсы, ісікке қарсы және нейропротекторлық әлеуеті бар фармакофорлар ретінде айтарлықтай қызығушылық тудырады. Бағытталған синтездің алынған нәтижелері құрылымдық модификация және жаңа гетероциклді жүйелердің биологиялық белсенділігін бағалау саласындағы зерттеулерді одан әрі жүргізуге негіз болады.

Әдебиеттер тізімі

1. Unusual Formation of 1,2,4-Oxadiazine Core in Reaction of Amidoximes with Maleic or Fumaric Esters / S.I. Presnukhina et al // Molecules. – 2022. – Т. 27, № 21. – P. 7508. https://doi.org/10.3390/molecules27217508.
2. Electrochemical synthesis of 1,2,4-oxadiazoles from amidoximes through dehydrogenative cyclization / C. Jiang et al // Org. Biomol. Chem. – 2021. – Т. 19, № 48. – P. 10611-10616. https://doi.org/10.1039/D1OB02040D.
3. Room Temperature Synthesis of Bioactive 1,2,4-Oxadiazoles / S.V. Baykov et al // Int. J. Mol. Sci. – 2023. – Т. 24, № 6. – P. 5406. https://doi.org/10.3390/ijms24065406.
4. The first one-pot ambient-temperature synthesis of 1,2,4-oxadiazoles from amidoximes and carboxylic acid esters / S. Baykov et al // Tetrahedron. – 2017. – Т. 73, № 7. – P. 945-951. https://doi.org/10.1016/j.tet.2017.01.007.
5. Room-temperature synthesis of pharmaceutically important carboxylic acids bearing the 1,2,4-oxadiazole moiety / M. Tarasenko et al // Tetrahedron Lett. – 2017. – Т. 58, № 37. – P. 3672-3677. https://doi.org/10.1016/j.tetlet.2017.08.020.
6. A convenient one-pot synthesis of N -substituted amidoximes and their application toward 1,2,4-oxadiazol-5-ones / W. Phakhodee et al // RSC Adv. – 2018. – Т. 8, № 67. – P. 38281-38288. https://doi.org/10.1039/C8RA08207C.
7. Kara Y.S. Synthesis of novel 1,2,4-oxadiazine derivatives and the substituent effect study on 13C NMR spectra / Y.S. Kara, D. Diran // J. Mol. Struct. – 2024. – Т. 1310. – P. 138309. https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2024.138309.

8. Basak P. Convenient one-pot synthesis of 1,2,4-oxadiazoles and 2,4,6-triarylpyridines using graphene oxide (GO) as a metal-free catalyst: importance of dual catalytic activity / P. Basak, S. Dey, P. Ghosh // RSC Adv. – 2021. – T. 11, № 51. – P. 32106-32118. https://doi.org/10.1039/D1RA06331F.
9. A review on synthetic account of 1,2,4-oxadiazoles as anti-infective agents / T.M. Dhameliya et al // Mol. Divers. – 2022. – T. 26, № 5. – P. 2967-2980. https://doi.org/10.1007/s11030-021-10375-4.
10. Structural characterization of new 2-aryl-5-phenyl-1,3,4-oxadiazin-6-ones and their N-aroylhydrazone precursors / M.L. Ţînţaş et al // J. Mol. Struct. – 2014. – T. 1058. – P. 106-113. https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2013.11.005.
11. Squire M.D. et al. Synthesis, X-ray crystallography and computational studies concerning an oxadiazinone derived from d-camphor: a structural limitation of oxadiazinones as chiral auxiliaries / M.D. Squire et al // Tetrahedron: Asymmetry. – 2005. – T. 16, № 5. – P. 1047-1053. https://doi.org/10.1016/j.tetasy.2005.01.020.
12. Herstellung und Reaktionen von 2,5-Diphenyl-6-oxo-1,3,4-oxadiazin / W. STEGLICH et al // Synthesis (Stuttg). – 1977. – T. 1977, № 04. – P. 252-253. https://doi.org/10.1055/s-1977-24339.
13. Experimental (FT-IR, Laser-Raman and NMR) and theoretical spectroscopic analysis of 3-[(N-methylanilino)methyl]-5-(thiophen-2-yl)-1,3,4-oxadiazole-2(3H)-thione / Y. Sert et al // J. Theor. Comput. Chem. – 2017. – T. 16, № 03. – P. 1750024. https://doi.org/10.1142/S0219633617500249.
14. Synthesis, characterization and in vitro anticancer activity of 18-membered octaazamacrocyclic complexes of Co(II), Ni(II), Cd(II) and Sn(II) / A. Kareem et al // J. Mol. Struct. – 2014. – T. 1075. – P. 17-25. https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2014.06.073.
15. Kelleghan V. Synthesis of 2,5-Diaryloxadiazinones / V. Kelleghan // Org. Synth. – 2020. – T. 97. – P. 189-206.
16. Solid phase synthesis of 1,3,4-oxadiazin-5 (6R)-one and 1,3,4-oxadiazol-2-one scaffolds from acyl hydrazides / B.K. Sarma et al // Org. Biomol. Chem. – 2015. – T. 13, № 1. – P. 59-63. https://doi.org/10.15227/orgsyn.097.0189.
17. Salassa G. Metal Complexes of Oxadiazole Ligands: An Overview / G. Salassa, A. Terenzi // Int. J. Mol. Sci. – 2019. – T. 20, № 14. – P. 3483. https://doi.org/10.3390/ijms20143483.
18. Leveraging Fleeting Strained Intermediates to Access Complex Scaffolds / S.M. Anthony et al // JACS Au. American Chemical Society. – 2021. – T. 1, № 7. – P. 897-912. https://doi.org/10.1021/jacsau.1c00214.
19. Atmaram U.A. Biological activity of oxadiazole and thiadiazole derivatives / U.A. Atmaram, S.M. Roopan // Appl. Microbiol. Biotechnol. – 2022. – T. 106, № 9-10. – P. 3489-3505. https://doi.org/10.1007/s00253-022-11969-0.
20. Synergism of a Novel 1,2,4-oxadiazole-containing Derivative with Oxacillin against Methicillin-Resistant Staphylococcus aureus / E. Buommino et al // Antibiotics. – 2021. – T. 10, № 10. – P. 1258. https://doi.org/10.3390/antibiotics10101258.
21. Barbachyn M.R. Identification of a 1,2,4-Oxadiazole with Potent and Specific Activity against Clostridioides difficile, the Causative Bacterium of C. difficile Infection, an Urgent Public Health Threat / M.R. Barbachyn // J. Med. Chem. American Chemical Society. – 2023. – T. 66, № 20. – P. 13888-13890. https://doi.org/10.1021/acs.jmedchem.3c01778.
22. Development of 1,2,4-Oxadiazole Antimicrobial Agents to Treat Enteric Pathogens within the Gastrointestinal Tract / N.P. Pitcher et al // ACS Omega. American Chemical Society. – 2022. – T. 7, № 8. – P. 6737-6759. https://doi.org/10.1021/acsomega.1c06294.
23. New 1,2,4-oxadiazole derivatives as potential multifunctional agents for the treatment of Alzheimer's disease: design, synthesis, and biological evaluation / M.S. Ayoup et al // BMC Chem. – 2024. – T. 18, № 1. – P. 130. https://doi.org/10.1186/s13065-024-01235-x.
24. Design, synthesis and biological evaluation of oxadiazole clubbed piperazine derivatives as potential antidepressant agents / B. Sahu et al // Bioorg. Chem. – 2023. – T. 136. – P. 106544. https://doi.org/10.1016/j.bioorg.2023.106544.
25. 1,2,4-Oxadiazole Derivatives: Physicochemical Properties, Antileishmanial Potential, Docking and Molecular Dynamic Simulations of Leishmania infantum Target Proteins / D.C.S. Barbosa et al // Molecules. – 2024. – T. 29, № 19. – P. 4654. https://doi.org/10.3390/molecules29194654.

26. Synthesis of 1,2,4-Oxadiazole-sulfonamide Conjugates and Their Synergistic Effect with Ampicillin as Antimicrobial Agents / F. Habib et al // ChemistrySelect. – 2023. – Т. 8, № 45. https://doi.org/10.1002/slct.202302360.
27. Exploring the Biological Activity of a Library of 1,2,5-Oxadiazole Derivatives Endowed With Antiproliferative Activity / A. GELAIN et al // Anticancer Res. – 2019. – Т. 39, № 1. – P. 135-144. https://doi.org/10.21873/anticanres.13089.
28. Unveiling the therapeutic potential of 1,2,4-oxadiazole derivatives: An updated review / H.E.N. Khasawneh et al // Results Chem. – 2025. – Т. 15. – P. 102271. https://doi.org/10.1016/j.rechem.2025.102271.

Алғыс: *Авторлар зерттеу жүргізу барысында көрсетілген техникалық қолдауы үшін Қорқыт Ата атындағы Қызылорда университетінің Инженерлік бейіндегі зертханасына алғыс білдіреді.*

Қаржыландыру: *Зерттеу жұмысы Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі Ғылым комитеті қаржыландырды (Жоба № AP23490015).*

R. Turmanov*, B. Alimkhan, R. Zhapparbergenov, N. Togyzbayeva, N. Appazov
Korkyt Ata Kyzylorda University, 120014, Republic of Kazakhstan, Kyzylorda, Aiteke bi street, 29 A
*e-mail: rakowrakha@gmail.com

SYNTHESIS OF NEW 4H-1,2,4-OXADIAZIN-5(6H)-ONE DERIVATIVES

This study introduces an enhanced approach to synthesizing novel derivatives of 4H-1,2,4-oxadiazine-5(6H)-one, a significant heterocyclic class with broad medical and pharmaceutical potential. The synthesis relied on the reaction of N'-hydroxy-4-methylbenzimide and N'-hydroxy-5-methylthiophene-2-carboxymidide with various methyl and ethyl halogen derivatives of carboxylic acids. The findings show that using sodium tert-butylate in dimethyl sulfoxide at room temperature enables efficient cyclization, achieving target product yields up to 76%. Substituents on the aromatic or heterocyclic part of the starting amidoximes were found to have little impact on reactivity, demonstrating the broad applicability of this method. All newly synthesized compounds underwent thorough characterization using modern analytical techniques such as NMR and high-resolution mass spectrometry, which fully validated their structure and purity. This method stands out for its mild conditions, operational simplicity, and environmentally friendly nature, as it avoids toxic reagents and metal catalysts. The resulting oxadiazine derivatives are of particular interest as promising pharmacophores with high biological activity, antibacterial, antitumor, and neuroprotective properties. The results of this targeted synthesis will serve as the basis for further research into structural modification and biological activity studies of new heterocyclic systems.

Key words: *4H-1,2,4-oxadiazin-5(6H)-one, amidoximes, cyclization, heterocyclic compounds, reaction optimization, spectroscopic characterization.*

Р.А. Турманов*, Б.Г. Алимхан, Р.У. Жаппарбергенов, Н.Ә. Тоғызбаева, Н.О. Аппазов
Кызылординский университет имени Коркыт Ата,
120014, Республика Казахстан, г. Кызылорда, улица Айтеке би, 29 А
*e-mail: rakowrakha@gmail.com

СИНТЕЗ НОВЫХ ПРОИЗВОДНЫХ 4*Н*-1,2,4-ОКСАДИАЗИН-5(6*Н*)-ОНА

В данном исследовании представлен усовершенствованный подход к синтезу новых производных 4Н-1,2,4-оксадиазин-5(6Н)-она – важного класса гетероциклов, обладающего широким медицинским и фармацевтическим потенциалом. Синтез основан на реакции N'-гидрокси-4-метилбензимида и N'-гидрокси-5-метилтиофен-2-карбоксимидида с различными метил- и этилгалогенопроизводными карбоновых кислот. Полученные результаты показывают, что использование трет-бутилата натрия в диметилсульфоксиде при комнатной температуре обеспечивает эффективную циклизацию, позволяя достичь выхода целевого продукта до 76%. Было установлено, что заместители на ароматической или гетероциклической части исходных амидоксимов оказывают незначительное влияние на реакционную способность, что свидетельствует о широкой применимости данного метода. Все вновь синтезированные соединения прошли тщательную характеристику с использованием современных аналитических методов, таких как ЯМР и масс-спектрометрия высокого разрешения, что полностью подтвердило

их структуру и чистоту. Данный метод выделяется мягкими условиями, простотой в применении и экологичностью, поскольку позволяет избежать использования токсичных реагентов и металлических катализаторов. Полученные производные оксадиазина представляют особый интерес в качестве перспективных фармакофоров с высокой биологической активностью, обладающих антибактериальными, противоопухолевыми и нейропротективными свойствами. Результаты данного целенаправленного синтеза послужат основой для дальнейших исследований по структурной модификации и изучению биологической активности новых гетероциклических систем.

Ключевые слова: *4H-1,2,4-оксадиазин-5(6H)-он, амидоксимы, циклизация, гетероциклические соединения, оптимизация реакции, спектроскопическая характеристика.*

Авторлар туралы мәліметтер

Рахымжан Ахметханович Турманов* – PhD, аға ғылыми қызметкер, Қорқыт Ата атындағы Қызылорда университеті, Қазақстан; e-mail: rakowrakha@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7268-1699.

Бекжан Галымжанулы Алимхан – Магистр, инженер, Қорқыт Ата атындағы Қызылорда университеті, Қазақстан; e-mail: mortalbeka@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-7375-9778.

Рахметулла Умирбекович Жаппарбергенов – PhD докторант, ғылыми қызметкер, Қорқыт Ата атындағы Қызылорда университеті, Қазақстан; e-mail: r.zhapparbergenov@korkyt.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0567-3226.

Нұрила Әбілқайырқызы Тоғызбаева – Химия ғылымдарының кандидаты, аға оқытушы, Қорқыт Ата атындағы Қызылорда университеті, Қазақстан; e-mail: nurila2009@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4310-0661.

Нұрбол Орынбасарұлы Аппазов – Химия ғылымдарының кандидаты, профессор, Қорқыт Ата атындағы Қызылорда университеті, Қазақстан; e-mail: nurasar.82@korkyt.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-1147-4836.

Information about the authors

Rakhymzhan Turmanov* – PhD, Senior researcher, Korkyt Ata Kyzylorda University, Republic of Kazakhstan; e-mail: rakowrakha@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7268-1699.

Bekzhan Alimkhan – Master, engineer, Korkyt Ata Kyzylorda University, Republic of Kazakhstan; e-mail: mortalbeka@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-7375-9778.

Rakhmetulla Zhapparbergenov – PhD student, research associate, Korkyt Ata Kyzylorda University, Republic of Kazakhstan; e-mail: r.zhapparbergenov@korkyt.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0567-3226.

Nurila Togyzbayeva – Candidate of chemical sciences, senior lecturer, Korkyt Ata Kyzylorda University, Republic of Kazakhstan; e-mail: nurila2009@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4310-0661.

Nurbol Appazov – Candidate of chemical sciences, professor, Korkyt Ata Kyzylorda University, Republic of Kazakhstan; e-mail: nurasar.82@korkyt.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-1147-4836.

Информация об авторах

Рахымжан Ахметханович Турманов* – PhD, старший научный сотрудник, Кызылординский университет имени Коркыт Ата, Республика Казахстан; e-mail: rakowrakha@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7268-1699.

Бекжан Галымжанулы Алимхан – Магистр, инженер, Кызылординский университет имени Коркыт Ата, Республика Казахстан; e-mail: mortalbeka@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-7375-9778.

Рахметулла Умирбекович Жаппарбергенов – PhD докторант, научный сотрудник, Кызылординский университет имени Коркыт Ата, Республика Казахстан; e-mail: r.zhapparbergenov@korkyt.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0567-3226.

Нұрила Әбілқайырқызы Тоғызбаева – Кандидат химических наук, старший преподаватель, Кызылординский университет имени Коркыт Ата, Республика Казахстан; e-mail: nurila2009@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4310-0661.

Нұрбол Орынбасарұлы Аппазов – Кандидат химических наук, профессор, Кызылординский университет имени Коркыт Ата, Республика Казахстан; e-mail: nurasar.82@korkyt.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-1147-4836.

Редакцияға енуі 09.06.2026
Өңдеуден кейін түсуі 04.09.2026
Жариялауға қабылданды 07.09.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-92

МРНТИ: 61.49.31

А.Б. Маханбетов[1], Т.Э. Гаипов[1], Д.Х. Юлдашбек[*], А.М. Кенжегалиев[2], Г.Д. Исенова[2]
[1]Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмеда Ясави, Республика Казахстан, 161200, г. Туркестан, проспект Бекзата Саттарханова, 29
[2]Казахский научно-исследовательский институт защиты и карантина растений им. Ж. Жиембаева, Республика Казахстан, 050070, г. Алматы, ул. Култобе, д. 1
*e-mail: davlat.yuldashbek@ayu.edu.kz

ПОЛУЧЕНИЕ ПОЛИСУЛЬФИДНОЙ КОМПОЗИЦИИ ИЗ ПРОМЫШЛЕННОГО ОТХОДА И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ В ФИТОСАНИТАРНОЙ ЗАЩИТЕ РАСТЕНИЙ

Аннотация: *В условиях усиления экологических требований и роста устойчивости вредных организмов актуальной задачей является разработка экологически безопасных средств защиты растений на основе промышленных отходов. Особый интерес представляют серосодержащие кеки сернокислотного производства как потенциальное сырьё для получения биологически активных соединений, обладающих широким спектром действия. Разработана технология щелочной экстракции серного кека с использованием гидроксида кальция при температуре 90-95 °С и соотношении компонентов 2,5 : 1 : 10. Полученные полисульфиды кальция исследованы на антибактериальную, фунгицидную и инсектицидную активность с применением лабораторных и полевых методов (лунковый и диско-диффузионный методы, фитосанитарный мониторинг яблоневых насаждений). Установлено, что полученный состав обладает выраженным дозозависимым антибактериальным действием против Erwinia amylovora, при этом фунгицидная активность против Fusarium sp. и Alternaria sp. не выявлена. В полевых условиях отмечена высокая инсектицидная и акарицидная эффективность (до 90 %) против основных вредителей яблоневых культур, включая наиболее распространённые фитофаги. Показана перспективность переработки серосодержащих промышленных отходов для получения экологически безопасных фитосанитарных препаратов многофункционального действия, сочетающих утилизацию отходов, снижение экологической нагрузки и повышение эффективности защиты сельскохозяйственных культур.*

Ключевые слова: *промышленные отходы, полисульфиды, фитосанитарная защита, инсектицидная активность, антибактериальное действие, сельское хозяйство.*

Введение

В современных условиях развития сельского хозяйства особую актуальность приобретает разработка эффективных и экологически безопасных средств защиты растений, способных обеспечить высокий уровень фитосанитарной устойчивости агроценозов при минимальной нагрузке на окружающую среду. Усиление антропогенного воздействия, накопление устойчивых к пестицидам популяций вредных организмов, а также усиление требований к качеству сельскохозяйственной продукции стимулируют поиск альтернативных решений, основанных на принципах устойчивого и ресурсосберегающего земледелия [1-3].

Одним из перспективных направлений является создание биологически активных препаратов на основе побочных продуктов промышленных производств, что соответствует концепции циркулярной экономики и рационального природопользования [4, 5]. Особый интерес в этом отношении представляют серосодержащие отходы, в том числе серные кеки, образующиеся в процессах сернокислотного производства. Их переработка позволяет не только снизить экологическую нагрузку, связанную с накоплением техногенных отходов, но и получить ценные соединения с выраженными биоцидными свойствами [6].

Сера и её соединения широко применяются в агрохимической практике благодаря инсектицидным, акарицидным и фунгицидным свойствам [7]. Современные исследования показывают, что полисульфиды кальция способны трансформироваться с образованием высокодисперсной элементарной серы, обладающей высокой реакционной способностью и выраженным антимикробным действием [8]. Механизм действия серосодержащих препаратов связан с нарушением дыхательных процессов клеток патогенов, ингибированием ферментных систем и взаимодействием с тиоловыми группами белков [9].

©А.Б. Маханбетов, Т.Э. Гаипов, Д.Х. Юлдашбек, А.М. Кенжегалиев, Г.Д. Исенова, 2026

Анализ современных научных публикаций свидетельствует о том, что различные группы средств защиты растений существенно различаются по механизму действия, спектру контролируемых вредных организмов, продолжительности защитного эффекта и экологическим характеристикам [10-13]. В частности, синтетические инсектициды характеризуются высокой эффективностью и пролонгированным действием, однако их применение может сопровождаться накоплением остаточных количеств и негативным воздействием на полезную энтомофауну. Биологические препараты обладают более благоприятным экологическим профилем, но зачастую уступают по стабильности действия.

Серосодержащие композиции, включая известково-серные отвары, сочетают достаточно широкий спектр биологической активности с относительно низким экологическим риском. Они проявляют контактное действие и могут эффективно использоваться в интегрированных системах защиты растений (IPM), особенно в условиях экологически ориентированного земледелия [14, 15].

Сравнительная характеристика основных групп средств защиты растений представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнительные свойства ИСО, биопрепаратов и синтетических инсектицидов

Показатель	Известково-серный отвар	Биопрепараты (*Bacillus thuringiensis*, авермектины)	Синтетические инсектициды (неоникотиноиды, пиретроиды)
Основной механизм действия	Контактное действие; фунгицидный и акарицидный эффект	Кишечное или контактно-кишечное действие	Системное, контактное или контактно-кишечное действие
Спектр контролируемых объектов	Клещи, тли, некоторые сосущие вредители, возбудители грибных заболеваний	Листовёртки, совки, гусеницы, тли, клещи, трипсы (в зависимости от препарата)	Тли, белокрылки, жуки, трипсы, клещи и другие вредители
Проникающая способность	Ограниченная, преимущественно поверхностное действие	Обычно ограниченная	От умеренной до высокой, в зависимости от действующего вещества
Продолжительность защитного эффекта	Умеренная, зависит от погодных условий и кратности обработок	От кратковременной до умеренной	Обычно более продолжительная по сравнению с контактными препаратами
Вероятность остаточных количеств в продукции	Низкая при соблюдении регламентов применения	Низкая	Может требовать строгого соблюдения сроков ожидания
Воздействие на полезную энтомофауну и пчёл	Относительно низкое при соблюдении регламентов применения	Обычно низкое или умеренное	От умеренного до высокого для отдельных групп действующих веществ
Температурная зависимость эффективности	Умеренная	Может возрастать при оптимальных температурах	Обычно менее выраженная
Экологические особенности	Перспективен для интегрированных систем защиты растений при регламентированном применении	Соответствует биологизированным системам земледелия	Высокая эффективность, но для ряда препаратов требуется оценка экологических рисков

В отличие от ряда синтетических препаратов, серосодержащие препараты представляют значительный интерес для интегрированных систем защиты растений

благодаря сочетанию эффективности, доступности и экологической приемлемости. Дополнительным преимуществом является возможность их получения из техногенных отходов, что способствует повышению ресурсной эффективности производства и снижению экологических рисков.

Таким образом, разработка технологий переработки серосодержащих отходов с получением эффективных инсектицидных и акарицидных препаратов является актуальной научно-практической задачей, направленной на обеспечение устойчивого развития аграрного сектора.

Материалы и методы исследования

Для разработки эффективного способа получения биологически активного серосодержащего препарата для фитосанитарной защиты была отработана принципиальная технологическая схема щелочной экстракции активных соединений из отходов сернокислотного производства с последующей очисткой и стабилизацией получаемой полисульфидной композиции (рис. 1). В основу процесса было положено взаимодействие измельчённого серосодержащего кека с водной суспензией гидроксида кальция при повышенной температуре и интенсивном перемешивании, что обеспечивало достаточный контакт твёрдой и жидкой фаз.

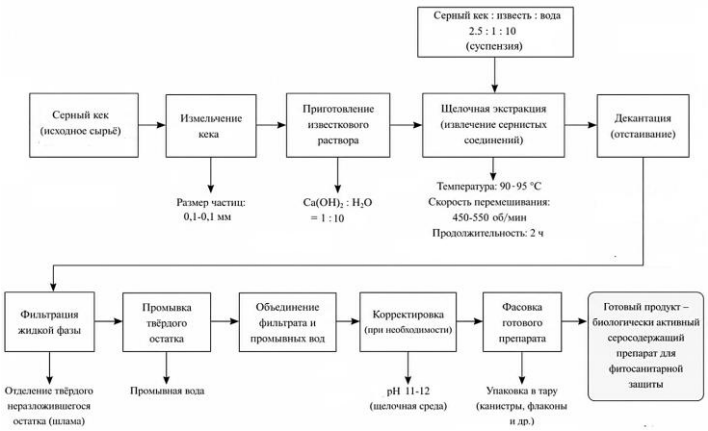


Рисунок 1 – Принципиальная схема технологии получения биологически активного состава из серного кека

Предварительно подготовленное сырьё с размером частиц 0,1-1,0 мм вводили в реакционную среду, содержащую воду и известковое молоко. Соотношение компонентов подбирали с учётом содержания серы в исходном материале и необходимой щёлочности среды. Основным направлением процесса являлось взаимодействие элементарной серы с гидроксидом кальция с образованием растворимых полисульфидных соединений кальция, которое в упрощённом виде может быть представлено следующим уравнением:

$$Ca(OH)2 + xS \rightarrow CaSx + H2O \quad (1)$$

Экстракцию проводили при температуре 90-95 °C в течение около 2 часов при скорости перемешивания 450-550 об/мин (рис. 2). Соотношение компонентов процесса составляло кек : известь : вода = 2,5 : 1 : 10, при котором обеспечивались необходимая щёлочность среды и эффективное взаимодействие твёрдой и жидкой фаз. При повышенной вязкости пульпы и затруднённых условиях перемешивания количество воды можно увеличить до 18 массовых частей. В указанных условиях достигался интенсивный переход активных серосодержащих компонентов в жидкую фазу. Отдельные параметры процесса могли корректироваться в зависимости от характеристик исходного сырья и требуемой активности получаемого состава.

После завершения процесса реакционную массу направляли на декантацию и фильтрацию для отделения нерастворимого минерального остатка. С целью снижения потерь действующих веществ твёрдую фазу дополнительно промывали водой, а полученные промывные растворы объединяли с основным фильтратом. Далее раствор при необходимости корректировали по содержанию активных компонентов и величине pH, после чего подвергали финишной фильтрации и фасовке.

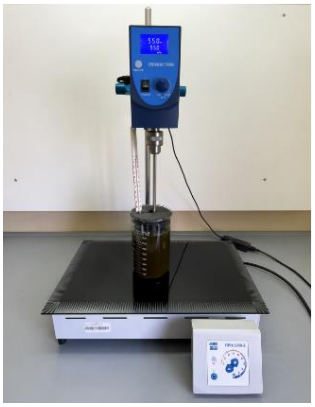


Рисунок 2 – Процесс получения серосодержащего экстракта из серного кека сернокислотного производства

Химическая характеристика полученной полисульфидной композиции. Получаемый после экстракции и фильтрации продукт представляет собой водную полисульфидную композицию, основными активными серосодержащими компонентами которой являются растворимые полисульфиды кальция общей формулы CaSx (x=2-5). Формирование полисульфидов обусловлено взаимодействием элементарной серы исходного кека с гидроксидом кальция при повышенной температуре. После отделения нерастворимого остатка продукт дополнительно фильтровали, при необходимости корректировали по содержанию активных компонентов и pH и фасовали. При оптимальных условиях получения композиции содержание серы в полученном растворе составляло 13,512 мас.%, плотность раствора – 1,130 г/см3 (17 град (0) Боме). Расчётное суммарное содержание активных серосодержащих веществ, представленных смесью полисульфидов и тиосульфата кальция, составляло около 20 мас.%.

Для определения биологической активности разработанной полисульфидной композиции, полученного из серных кеков на основе полисульфидов кальция, были выбраны следующие методы: оценка бактерицидных свойств методом лунок и фунгицидной активности диско-диффузионным методом по Егоровой. В качестве тест-объектов использовали основных возбудителей заболеваний сельскохозяйственных культур: Erwinia amylovora, Fusarium sp. и Alternaria sp.

Проведены исследования в лабораторных и полевых условиях для установления эффективности полученных на основе продуктов утилизации серосодержащих отходов инновационных инсектицидных средств и возможности их применения для борьбы с вредителями, а также для выявления оптимального компонентного состава, расхода и кратности применения разработанных инсектицидных составов.

Проведен мониторинг распространения болезней на яблоне в крестьянском хозяйстве «Олжас», расположенном в Алматинской области Карасайского района. При визуальном осмотре было установлено поражение разных частей яблони. На листьях отмечали краевой некроз и некротические пятна, хлороз, усыхание ветвей, побурение, а также механические повреждения.

Отобраны образцы заражённых листьев и плодов яблони для изоляции возбудителей болезней в чистую культуру. Образцы с симптомами болезней с соблюдением всех требований антисептики с каждого больного дерева отбирали в 3-4 местах. При отборе проб вырезали поражённые части растений с захватом здоровой ткани. Один образец состоял из различных частей растений, собранных с одного дерева. Отобранные образцы помещали в пакеты из фильтровальной бумаги и хранили в холодильнике.

Анализ отобранных образцов проводили по общепринятым в фитопатологии и бактериологии методикам [16, 17]. Проводили стерилизацию инструментов, стеклопосуды и других материалов в сушильном шкафу при температуре 150-200 ºС. Питательные среды стерилизовали в автоклаве при 1 атм в течение 45 минут. Выделение бактерий проводили на питательной среде Nutrient Agar, селективной среде Левана и Miller Schroth, выделение грибов – на среде картофельно-декстрозный агар (КДА) (рис. 3).

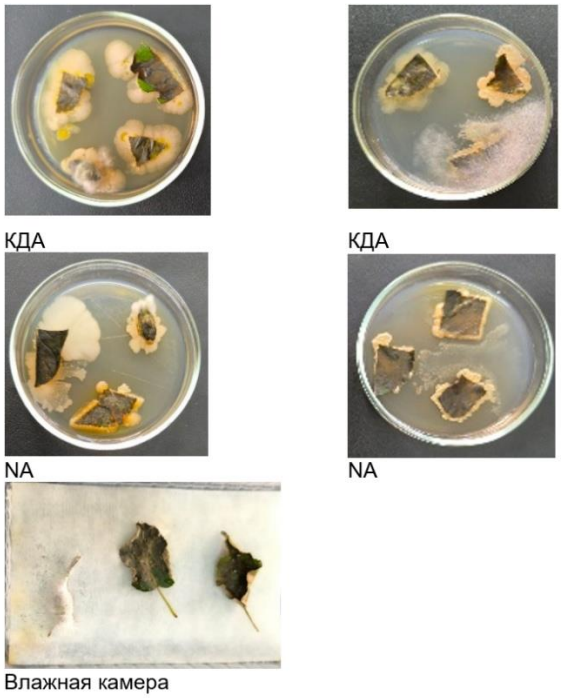


Рисунок 3 – Грибная и бактериальная микрофлора пораженных образцов яблони

Для изучения биологической активности серосодержащего состава, полученного из серных кеков на основе полисульфидов кальция, была подготовлена схема лабораторных опытов (табл. 2).

Таблица 2 – Схема лабораторных опытов по изучению биологической активности серосодержащего состава, полученного из серных кеков на основе полисульфидов кальция против возбудителей болезней Erwinia amylovora, Fusarium sp., Alternaria sp.

п/п	Вариант	Концентрация	Объём технического раствора	Возбудитель болезней	Кратность обработки
1	Водный раствор полисульфида кальция	1%	30 мл	Erwinia amylovora	однократная
2		2%	30 мл	Erwinia amylovora	однократная
3		3%	30 мл	Erwinia amylovora	однократная
4		4%	30 мл	Erwinia amylovora	однократная
5		5%	30 мл	Erwinia amylovora	однократная
6		6%	30 мл	Erwinia amylovora	однократная

Исследование биологической активности полисульфида кальция в различных концентрациях против бактерий Erwinia amylovora проводили методом лунок [18, 19]. В стерильные чашки Петри по 30 мл разливали питательную среду Nutrient Agar, затем засевали 1 мл тест-объекта – чистой культуры фитопатогенной бактерии Erwinia amylovora. Концентрация инокулюма составляла 109 кл/мл по стандарту мутности. В центр чашек Петри с засеянной бактериальной культурой на питательной среде формировали лунки диаметром 10 мм, в которые вносили исследуемые вещества и эталонный образец необходимой концентрации. В контроле использовали стерильную дистиллированную воду. Чашки Петри 1 час выдерживали при комнатной температуре, затем помещали в термостат при 25-27 °С, через двое суток определяли диаметр зоны задержки роста бактерий вокруг лунок.

В лабораторных условиях также исследовали фунгицидные свойства водного раствора полисульфида кальция различных концентраций против грибов Fusarium sp. и Alternaria sp. с использованием диско-диффузионного метода согласно методическим указаниям [20]. В стерильные чашки Петри разливали по 20 мл питательной среды – картофельно-декстрозный агар (КДА), затем в каждую чашку Петри засевали 1000 мкл инокулюма – чистой культуры фитопатогенного гриба Fusarium sp. и Alternaria sp. с концентрацией 109 кл/мл согласно

стандарту мутности. На поверхность засеянной грибами питательной среды помещали стерильные фильтровальные бумажные диски диаметром 10 мм, пропитанные испытываемыми веществами и эталоном соответствующей концентрации. В качестве контроля использовали стерильную дистиллированную воду. Чашки Петри 1 час выдерживали при комнатной температуре, затем помещали в термостат при 25-27 °С, через двое суток определяли диаметр зоны задержки роста гриба вокруг каждого диска.

Статистическую обработку результатов лабораторных исследований проводили на основании четырех параллельных определений для каждой исследованной концентрации. Для количественной характеристики экспериментальных данных рассчитывали среднее арифметическое значение (M) и стандартное отклонение (SD). Результаты представлены в виде M ± SD (n = 4).

Полевые испытания проводили в яблоневом саду крестьянского хозяйства «Олжас» (Карасайский район Алматинской области) на яблоне сорта Апорт.

Объектами фитосанитарного мониторинга являлись яблонная плодожорка (Cydia pomonella), мучнистые червецы (сем. Pseudococcidae), красный плодовый клещ (Panonychus ulmi) и бурый плодовый клещ (Bryobia rubrioculus). При обследовании оценивали повреждённость плодов, осматривали ловчие пояса, стволы деревьев и листовой аппарат, включая нижнюю сторону листьев и межжилковые участки. Для полевых испытаний использовали рабочие растворы полисульфидной композиции концентрацией 1, 2 и 3 %. Обработку яблоневых насаждений проводили однократно с использованием ручного ранцевого опрыскивателя «Solo 451». В качестве контроля использовали вариант без обработки. Биологическую активность препарата оценивали на 5-е, 10-е и 15-е сутки после обработки путём последовательного мониторинга состояния растений и степени повреждённости плодов и листьев вредителями. Биологическую эффективность определяли по снижению повреждённости плодов и листьев в опытных вариантах по сравнению с необработанным контролем.

Результаты и обсуждение

Проведённые исследования показали, что предложенная технологическая схема позволяет рационально перерабатывать серосодержащие отходы с получением полисульфидной композиции, содержащей активные соединения серы, пригодного для дальнейшего использования в составе средств фитосанитарной защиты. В процессе щелочной экстракции элементарная сера взаимодействует с гидроксидом кальция с образованием растворимых полисульфидов кальция общей формулы CaSx, где x может изменяться в пределах от 2 до 5. Наиболее устойчивыми в растворе считаются соединения x=4-5, обеспечивающие основные функциональные свойства получаемого состава.

На рисунке 4 представлены основные стадии превращения серного кека в биологически активный серосодержащий состав: исходный серный кек (а), полученный экстракт активных серосодержащих соединений (б) и тонкодисперсная сера, образующаяся после нанесения препарата на растения и последующего окисления.



Рисунок 4 – Основные стадии превращения серного кека в активный серосодержащий состав и образование тонкодисперсной серы после нанесения на растения: (а) серный кек; (б) экстракт активных серосодержащих соединений; (с) тонкодисперсная биоцидная сера

С химической точки зрения полученный продукт представляет собой водную полисульфидную композицию на основе кальция, содержащую растворимые полисульфидные формы CaSx (x = 2-5) и тиосульфат кальция. При оптимальных условиях содержание серы в растворе составляло 13,512 мас.%, плотность – 1,130 г/см3 (17° Боме), а

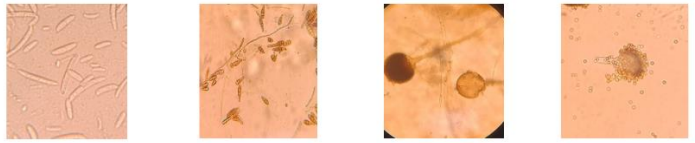
расчётное суммарное содержание активных серосодержащих веществ – около 20 мас.%. Нерастворимые минеральные компоненты исходного кека удаляются на стадиях декантации и фильтрации, в результате чего формируется очищенная жидкая полисульфидная композиция.

В водной среде полисульфиды кальция являются химически активными соединениями и при контакте с кислородом воздуха постепенно подвергаются окислительным превращениям с образованием промежуточных серосодержащих форм и свободной элементарной серы. Более интенсивно данный процесс протекает под действием влаги и диоксида углерода воздуха:

$$CaS5 + CO2 + H2O = CaCO3 + H2S + 4S \quad (2)$$

В результате указанных превращений происходит постепенное высвобождение высокодисперсной элементарной серы. Такая форма серы характеризуется развитой поверхностью и может проявлять выраженные биоцидные свойства. Известно, что препараты серы выделяют пары элементарной серы, проникающие в споры и мицелий грибов, где сера взаимодействует с клеточными компонентами с образованием сероводорода. Последний ингибирует ферментные системы дыхания и нарушает метаболические процессы патогенов. Дополнительно сера способна связывать ионы металлов, входящих в состав ферментов, что также снижает жизнеспособность микроорганизмов.

В результате микробиологического анализа из поражённых образцов яблони были выделены грибные культуры. Проверка их патогенных свойств на тест-объектах (листья комнатной герани и клубни картофеля) не выявила выраженной патогенности выделенных изолятов (рис. 5).



макро- и микроконидии гриба рода Fusarium | макро- и микроконидии гриба рода Alternaria | спорангий со спорами гриба рода Mucor | споры гриба рода Aspergillus

Рисунок 5 – Грибная микрофлора изолированная из образцов яблони (микроскопирование)

Исследование антибактериальной активности показало, что полисульфидная композиция проявляет умеренное ингибирующее действие в отношении Erwinia amylovora. Количественные результаты антибактериального действия представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Зона подавления бактерии Erwinia amylovora при различных концентрациях изучаемых веществ

Варианты	Концентрация	Повторности, мм				Средняя зона, мм
		I	II	III	IV	
Водный раствор полисульфида кальция	1 %	0,6	0,6	0,4	0,5	0,525
	2 %	0,7	0,8	0,6	0,8	0,725
	3 %	1,0	0,8	0,8	0,9	0,875

Статистическая обработка результатов четырех параллельных определений показала, что средняя зона подавления роста Erwinia amylovora составляла 0,525 ± 0,096 мм при концентрации 1 %, 0,725 ± 0,096 мм при 2% и 0,875 ± 0,096 мм при 3% (M ± SD; n = 4). С увеличением концентрации полисульфида кальция от 1 до 3% наблюдалось последовательное увеличение средней зоны ингибирования, при этом максимальное среднее значение было установлено при концентрации 3 %.

Полученные результаты свидетельствуют о наличии у полисульфидного состава антибактериального потенциала, что представляет практический интерес для ограничения распространения бактериальных заболеваний плодовых культур.

Лабораторные испытания фунгицидных свойств показали, что применение полисульфида кальция в концентрациях от 1 до 6 % не сопровождалось образованием

выраженных зон ингибирования роста Fusarium sp. и Alternaria sp. В исследованных условиях фунгицидный эффект не проявился, что подтверждается данными, представленными на рисунках 6 и 7.

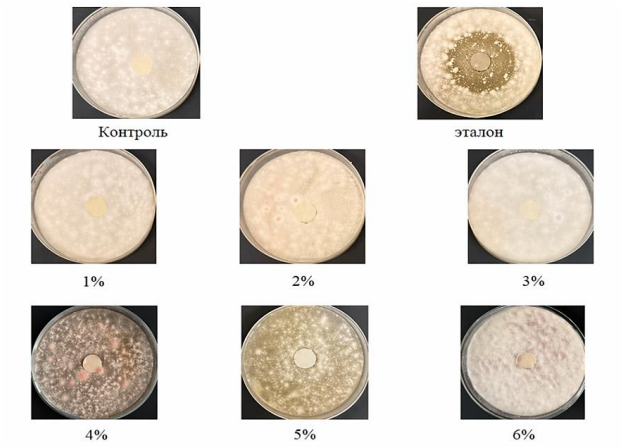


Рисунок 6 – Зона подавления гриба Fusarium sp. при различных концентрациях полисульфида кальция

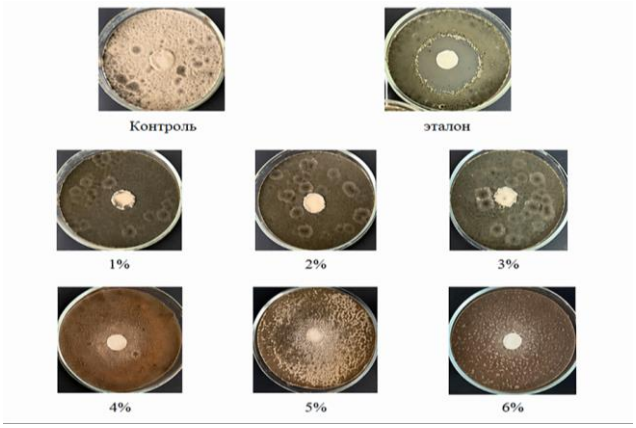


Рисунок 7 – Зона подавления гриба Alternaria sp. при различных концентрациях полисульфида кальция на питательной среде

В то же время эталонный препарат показал слабую активность: средний диаметр зон подавления составил 2,53 мм для Fusarium sp. и 1,85 мм для Alternaria sp., тогда как контрольный вариант ожидаемо не оказывал действия.

Отсутствие выраженного фунгицидного эффекта может быть связано с недостаточной концентрацией действующих компонентов, ограниченной диффузией активных веществ в агаризованной среде либо высокой устойчивостью исследованных штаммов. Это указывает на необходимость дальнейшей оптимизации концентрации рабочего раствора, экспозиции и методики лабораторной оценки.

Ранее проведённые полевые испытания подтвердили, что разработанная полисульфидная композиция на основе полисульфидов кальция обладает выраженной инсектицидной и акарицидной активностью в отношении основных вредителей плодовых культур (рис. 8).

Полевые испытания подтвердили выраженную инсектицидную и акарицидную активность разработанной полисульфидной композиции. В контрольном варианте без обработки повреждённость плодов яблонной плодожоркой составляла 35%, а поражённость листьев красным и бурым плодовыми клещами – 31%. При применении 1%-ного рабочего раствора биологическая эффективность составляла 74,2% против яблонной плодожорки и 74,1% против плодовых клещей. Повышение концентрации до 2% увеличивало эффективность соответственно до 80,0 и 83,8%. Максимальный эффект был достигнут при концентрации 3%: биологическая эффективность составляла 88,5% против яблонной плодожорки и 90,3% против красного и бурого плодовых клещей.

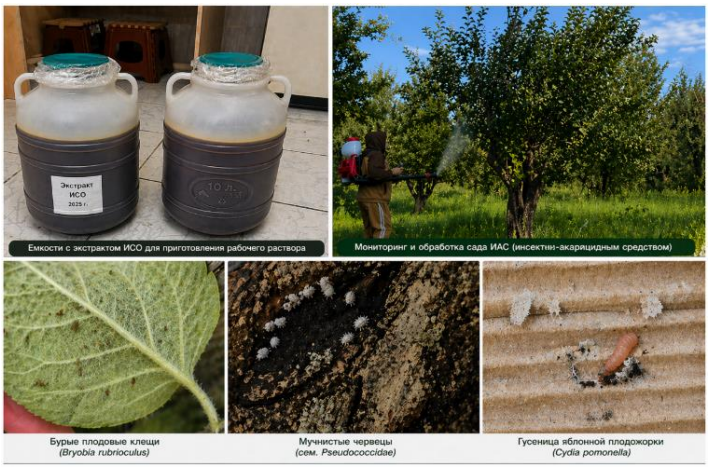


Рисунок 8 – Полевые испытания серосодержащего состава на основе полисульфидов кальция в яблоневом саду: приготовление рабочего раствора, обработка насаждений и основные объекты инсектицидного и акарицидного действия

Таким образом, в исследованном диапазоне концентраций наблюдалось последовательное повышение эффективности препарата с увеличением концентрации рабочего раствора. Наиболее выраженный акарицидный эффект установлен при 3 %-ной концентрации, при которой эффективность против комплекса плодовых клещей достигала 90,3 %. Полученные результаты подтверждают перспективность применения разработанной композиции для фитосанитарной защиты яблоневых насаждений.

Заключение

Разработана технологически и экологически обоснованная схема переработки серных кеков сернокислотного производства с получением биологически активного серосодержащего состава фитосанитарного назначения.

Установлено, что оптимальные условия экстракции достигаются при соотношении компонентов кек : известь : вода = 2,5 : 1 : 10, температуре 90-95 °C и продолжительности процесса около 2 часов. При указанных параметрах обеспечивается эффективный переход серы в жидкую фазу с образованием кальциевых полисульфидов.

Показано, что растворённые полисульфиды кальция в водной среде способны к постепенным окислительным превращениям с образованием тонкодисперсной элементарной серы, что может обусловливать дополнительное биоцидное действие состава после нанесения на поверхность растений.

Лабораторные исследования подтвердили наличие антибактериальной активности разработанной полисульфидной композиции в отношении фитопатогенной бактерии Erwinia amylovora. Установлен дозозависимый эффект, при котором увеличение концентрации раствора сопровождалось ростом зоны ингибирования тест-культуры.

Статистическая обработка результатов четырех параллельных определений показала увеличение средней зоны ингибирования Erwinia amylovora с 0,525 ± 0,096 мм при концентрации 1 % до 0,875 ± 0,096 мм при концентрации 3 % (M ± SD; n = 4).

В полевых условиях установлена высокая инсектицидная и акарицидная эффективность разработанной полисульфидной композиции: при концентрации рабочего раствора 3 % биологическая эффективность достигала 88,5 % против яблонной плодожорки и 90,3 % против красного и бурого плодовых клещей.

В отношении Fusarium sp. и Alternaria sp. выраженного фунгицидного действия в исследованном диапазоне концентраций не выявлено, что определяет необходимость дальнейшей оптимизации состава и режимов применения.

Практическая значимость работы заключается в том, что предложенная технология одновременно решает две важнейшие задачи: обеспечивает утилизацию токсичных серосодержащих промышленных отходов с получением экологически безопасного продукта и позволяет создать высокоэффективное средство защиты растений, пригодное для широкого применения в сельском хозяйстве Казахстана.

Список литературы

1. Evaluation of remediation of Cr(VI)-contaminated soils by calcium polysulfide: Long-term stabilization and mechanism studies / S. Hu et al // Science of the Total Environment. – 2021. – № 790. – P. 148140. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148140.
2. Effect of adjuvants on physicochemical properties of lime sulfur on flower/paraffin and application on flower thinning / Y. Li et al // Frontiers in Plant Science. – 2023. – № 14. – P. 1257672. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1257672/
3. Design, synthesis, and insecticidal activities of the novel sulfur-containing meta-amide compounds as potential pesticides / Y. Zhang et al // Journal of Chemical Research. – 2024. – № 48(2). https://doi.org/10.1177/17475198241234629.
4. Preparation of phosphogypsum-based polysulfide and its application in solidified copper-contaminated soil / Y. Dai et al // Environmental Research. – 2025. – № 285. – P. 122403. https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.122403.
5. Technological Progress in Sulfur-Based Construction Materials: The Role of Modified Sulfur Cake in Concrete and Bitumen / M. Hashami et al // Applied Sciences. – 2025. – № 15(16). – P. 8790. https://doi.org/10.3390/app15168790.
6. Abdireiim G. Improving the properties of building materials from limestone-shell rock by impregnating sulfur-containing preparations based on local raw materials / G. Abdireiim, F. Urakaev // Complex Use of Mineral Resources. – 2021. – № 2(317). – P. 57-63. https://doi.org/10.31643/2021/6445.18.
7. A Review of Sooty Blotch and Flyspeck Disease in German Organic Apple Production / R. Weber et al // Erwerbs-Obstba. – 2016. – № 58. – P. 63-79. https://doi.org/10.1007/s10341-016-0266-x.
8. Kinetics of sulfur nanoparticle growth during their precipitation from aqueous solutions of calcium polysulfide / I. Massalimov et al // Russian Journal of Physical Chemistry. – 2024. – № 98(1). – P. 124-140. https://doi.org/10.31857/S0044453724010179.
9. Effectiveness of lime sulphur and other inorganic fungicides against pear scab as affected by rainfall and timing application / L. Jamar et al // Journal of Plant Diseases and Protection. – 2017. – № 124. – P. 383-391. https://doi.org/10.1007/s41348-017-0085-9.
10. Sparks T.C. IRAC: Mode of action classification and insecticide resistance management / T.C. Sparks, R. Nauen // Pesticide Biochemistry and Physiology. – 2015. – № 121. – P. 122-128. https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2014.11.014.
11. Effects of neonicotinoids and fipronil on non-target invertebrates / L.W. Pisa et al // Environmental Science and Pollution Research. – 2015. – № 22. – P. 68-102. https://doi.org/10.1007/s11356-014-3471-x.
12. Damalas C.A. Current Status and Recent Developments in Biopesticide Use / C.A. Damalas, S.D. Koutroubas // Agriculture. – 2018. – № 8(1). – P. 13. https://doi.org/10.3390/agriculture8010013.
13. Holb I.J. Efficacy and phytotoxicity of lime sulphur in organic apple production / I.J. Holb, P.F. de Jong, B. Heijne // Annals of Applied Biology. – 2003. – № 142. – P. 225-233. https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2003.tb00245.x.
14. Popp J. Pesticide Productivity and Food Security. A Review / J. Popp, K. Pető, J. Nagy // Agronomy for Sustainable Development. – 2013. – № 33. – P. 243-255. https://doi.org/10.1007/s13593-012-0105-x.
15. Johnson K.B. Evaluation of Strategies for Fire Blight Control in Organic Pome Fruit Without Antibiotics / K.B. Johnson, T.N. Temple // Plant Disease. – 2013. – № 97(3). – P. 402-409. https://doi.org/10.1094/PDIS-07-12-0638-RE.
16. Metodicheskoe ukazanie po bakterial'nomu ozhogu plodovykh kul'tur Erwinia amylovora (Burrill.) Winslow et al. – Moskva, 2009. – 21s. (in Russian).
17. Metodicheskie ukazaniya po diagnostike i meram bor'by s bakterial'nym nekrozom i ozhogom plodovykh kul'tur / R.I. Gvozdyak i dr. – Moskva, 1987. – 32 s. (in Russian).
18. Abylayeva U. Diagnostika bakterial'nogo ozhoga plodovykh kul'tur v usloviyakh Yugo-Vostoka Respubliki Kazakhstan / U. Abylayeva. – Ġylym žăne bìlìm. – 2024. – № 2(3 (76)). – S. 38-47. https://doi.org/10.52578/2305-9397-2024-3-2-38-47. (in Russian).
19. Izuchenie ehffektivnosti preparatov Fitolavin, Farmaiod, Strekar protiv vozbuditelya bakterial'nogo ozhoga plodovykh kul'tur / N.V. Drenova i dr. // Karantin rastenii. Nauka i praktika. – 2017. – № 4 (22). – S. 40-46. (in Russian).

20. Astapchuk I. Efficacy of fungicides against pathogens of apple core rot from the genera Fusarium Link, Alternaria Nees and Botrytis (Fr.) under laboratory conditions / I. Astapchuk, G. Yakuba, A. Nasonov // E3S Web of Conferences. – 2021. – № 285. – P. 03015. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128503015.

А.Б. Маханбетов[1], Т.Э. Гаипов[1], Д.Х. Юлдашбек[1]*, А.М. Кенжегалиев[2], Г.Д. Исенова[2]
[1]Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті,
Қазақстан Республикасы, 161200, Түркістан қ., Бекзат Саттарханов даңғылы, 29
[2]Жазкен Жиембаев атындағы Қазақ өсімдік қорғау және карантин ғылыми-зерттеу институты,
Қазақстан Республикасы, 050070, Алматы қ., Рахат шағынауданы, Күлтөбе көшесі, 1-үй
*e-mail: davlat.yuldashbek@ayu.edu.kz

ӨНЕРКӘСІПТІК ҚАЛДЫҚТАН ПОЛИСУЛЬФИДТІК КОМПОЗИЦИЯ АЛУ ЖӘНЕ ОНЫҢ ФИТОСАНИТАРЛЫҚ ҚОРҒАУДАҒЫ ТИІМДІЛІГІН БАҒАЛАУ

Экологиялық талаптардың күшеюі және зиянды организмдердің төзімділігінің артуы жағдайында өнеркәсіптік қалдықтар негізінде экологиялық қауіпсіз өсімдіктерді қорғау құралдарын әзірлеу өзекті міндет болып табылады. Күкірт қышқылы өндірісінің күкіртқұрамды кектері биологиялық белсенді қосылыстар алуға арналған әлеуетті шикізат ретінде ерекше қызығушылық тудырады. Кальций гидроксидін пайдалана отырып, 90-95°C температурада және компоненттердің 2,5 : 1 : 10 арақатынасында күкіртті кекті сілтілік экстракциялау технологиясы әзірленді. Алынған кальций полисульфидтері негізіндегі полисульфидтік композиция зертханалық және далалық әдістерді (ұяшықтық және дискілі-диффузиялық әдістер, алма бақтарының фитосанитарлық мониторингі) қолдана отырып, антибактериялық, фунгицидтік және инсектицидтік белсенділігі бойынша зерттелді. Алынған құрамның Erwinia amylovora-ға қарсы дозаға тәуелді антибактериялық әсері бар екені анықталды, ал Fusarium sp. және Alternaria sp. қарсы айқын фунгицидтік белсенділік байқалмады. Далалық жағдайда алма дақылдарының негізгі зиянкестеріне қарсы жоғары инсектицидтік және акарицидтік тиімділік (90 %-ға дейін) тіркелді. Алынған нәтижелер өсімдіктерді фитосанитарлық қорғауға арналған көпфункционалды полисульфидтік композиция алу және екінші реттік ресурстарды ұтымды пайдалану үшін өнеркәсіптік қалдықтарды қайта өңдеудің перспективалы бағыт екенін растайды.

Түйін сөздер: *өнеркәсіптік қалдықтар, полисульфидтер, фитосанитарлық қорғау, инсектицидтік белсенділік, антибактериялық әсер, ауыл шаруашылығы.*

A.B. Makhanbetov[1], T.E. Gaipov[1], D.Kh. Yuldashbek[1]*, A.M. Kenzhegaliev[2], G.D. Issenova[2]
[1]Khoja Ahmed Yasawi International Kazakh-Turkish University,
29 Bekzat Sattarkhanov Avenue, Turkistan, 161200, Republic of Kazakhstan
[2]Zhazken Zhiembayev Kazakh Research Institute of Plant Protection and Quarantine,
1 Kultobe Street, Rakhat Microdistrict, Nauryzbay District, Almaty 050070, Republic of Kazakhstan
*e-mail: davlat.yuldashbek@ayu.edu.kz

PREPARATION OF A POLYSULFIDE COMPOSITION FROM INDUSTRIAL WASTE AND EVALUATION OF ITS EFFICIENCY IN PHYTOSANITARY PLANT PROTECTION

Under conditions of increasing environmental requirements and growing resistance of harmful organisms, the development of environmentally safe plant protection products based on industrial waste is an urgent task. Sulfur-containing cakes generated during sulfuric acid production are of particular interest as potential raw materials for obtaining biologically active compounds. A technology for the alkaline extraction of sulfur cake using calcium hydroxide at 90-95 °C and a component ratio of 2.5 : 1 : 10 was developed. The obtained polysulfide composition based on calcium polysulfides was investigated for antibacterial, fungicidal, and insecticidal activity using laboratory and field methods (well diffusion and disk diffusion methods, phytosanitary monitoring of apple orchards). It was established that the obtained composition exhibits dose-dependent antibacterial activity against Erwinia amylovora, while no pronounced fungicidal activity against Fusarium sp. and Alternaria sp. was observed. Under field conditions, high insecticidal and acaricidal efficiency (up to 90%) against the main pests of apple crops was recorded. The obtained results confirm the prospects of industrial waste processing for the production of a multifunctional polysulfide composition intended for phytosanitary plant protection and rational utilization of secondary resources.

Key words: *industrial waste, polysulfides, phytosanitary protection, insecticidal activity, antibacterial effect, agriculture.*

Сведения об авторах

Арман Беркинбаевич Маханбетов – ассоцированный профессор, PhD, главный научный сотрудник НИИ «Экология» Международного казахско-турецкого университета имени Ходжи Ахмеда Ясави, г. Туркестан; e-mail: arman.makhanbetov@ayu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1620-6922.

Тулкинжон Эркинович Гаипов – кандидат химических наук, директор научно-исследовательского центра Устойчивого развития Международного казахско-турецкого университета имени Ходжи Ахмеда Ясави, г. Туркестан; e-mail: tulkinzhon.gaipov@ayu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9723-3745.

Давлат Хасанулы Юлдашбек* – магистр химии, старший научный сотрудник НИИ «Экология» Международного казахско-турецкого университета имени Ходжи Ахмеда Ясави, г. Туркестан; e-mail: davlat.yuldashbek@ayu.edu.kz.ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9342-7502.

Арнур Мирамулы Кенжегалиев – заведующий лабораторией энтомологии испытательного центра Фитосанитарного лабораторного анализа Казахского научно-исследовательского иснтитута защиты и карантина растений им. Ж. Жиембаева, г. Алматы; e-mail: arnur_1992@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0308-222X.

Гульмира Джанибековна Исенова – кандидат биологических наук, начальник испытательного центра Фитосанитарного лабораторного анализа Казахского научно-исследовательского иснтитута защиты и карантина растений им. Ж. Жиембаева, г. Алматы; e-mail: isenova.gd@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3608-3146.

Авторлар туралы мәліметтер

Арман Беркинбаевич Маханбетов – қауымдастырылған профессор, PhD, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті «Экология» ғылыми-зерттеу институтының бас ғылыми қызметкері, Түркістан қ.; e-mail: arman.makhanbetov@ayu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1620-6922.

Тулкинжон Эркинович Гаипов – PhD, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті Тұрақты даму ғылыми-зерттеу орталығының директоры, Түркістан қ., e-mail: tulkinzhon.gaipov@ayu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9723-3745.

Давлат Хасанұлы Юлдашбек* – химия магистрі, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті «Экология» ғылыми зерттеу институтының аға ғылыми қызметкері, Түркістан қ., e-mail: davlat.yuldashbek@ayu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9342-7502.

Арнур Мирамулы Кенжегалиев – Ж. Жиембаев атындағы Қазақ өсімдік қорғау және карантин ғылыми-зерттеу институты энтомология зертханасының меңгерушісі, Алматы қ.; e-mail: arnur_1992@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0308-222X.

Гульмира Джанибековна Исенова – биология ғылымдарының кандидаты, Ж. Жиембаев атындағы Қазақ өсімдік қорғау және карантин ғылыми-зерттеу институты Фитосанитарлық зертханалық сынақ орталығының басшысы, Алматы қ.; e-mail: isenova.gd@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3608-3146.

Information about the authors

Arman Berkinbayevich Makhanbetov – Associate Professor, PhD, Chief Researcher at the Research Institute «Ecology», International Kazakh-Turkish University named after Khoja Ahmed Yasawi, Turkestan; e-mail: arman.makhanbetov@ayu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1620-6922.

Tulkinzhon Erkinovich Gaipov – PhD, Director of the Sustainable Development Research Center, International Kazakh-Turkish University named after Khoja Ahmed Yasawi, Turkestan; e-mail: tulkinzhon.gaipov@ayu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9723-3745.

Davlat Khasanuly Yuldashbek* – Master of Chemistry, Senior Researcher at the Research Institute «Ecology», International Kazakh-Turkish University named after Khoja Ahmed Yasawi, Turkestan; e-mail: davlat.yuldashbek@ayu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9342-7502.

Arnur Miramuly Kenzhegaliev – head of the entomology laboratory of the Kazakh Research Institute of Plant Protection and Quarantine named after Zh. Zhiembayev, Almaty city; e-mail: arnur_1992@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0308-222X.

Gulmira Dzhanibekovna Issenova – Candidate of Biological Sciences, Head of the Testing Center for Phytosanitary Laboratory Analysis of the Kazakh Scientific Research Institute of Plant Protection and Quarantine named after Zh. Zhiembaev, Almaty; e-mail: isenova.gd@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3608-3146.

Поступила в редакцию 01.06.2026
Поступила после доработки 05.09.2026
Принята к публикации 07.09.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-93

МРНТИ: 87.21.03

BY 4.0
Check for updates

У.Е. Жантикеев*, Л.Н. Сеймуханова, Д.Р. Мулдаш, Ш.Т. Султахан, М. Токтар
Satbayev University, 050043, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22
*e-mail: nurlybekov.ulan@gmail.com

ВЛИЯНИЕ ХОЛОДНОЙ ПЛАЗМЫ НА СВОЙСТВА ПОЧВЫ И РЕМЕДИАЦИЮ ЗАГРЯЗНЁННЫХ ГРУНТОВ: ОБЗОР

Аннотация: *В обзоре систематизированы современные исследования по применению холодной (нетепловой) плазмы для ремедиации почв, загрязнённых органическими соединениями и тяжёлыми металлами. Рассмотрены механизмы образования активных форм кислорода и азота (АФКН) в плазменных разрядах, их перенос в пористой почвенной среде и участие в окислительной деструкции органических загрязнителей, изменении pH, окислительно-восстановительного потенциала и химических форм неорганических компонентов. Проведено сравнительное рассмотрение диэлектрического барьерного и коронного разрядов, прямых и дистанционных способов воздействия с учётом параметров разряда, влажности и свойств почвы, природы и концентрации загрязнителя, продолжительности обработки и энергетических характеристик. Показано, что в лабораторных исследованиях степень деструкции отдельных органических загрязнителей достигает 85-99 %, однако снижение концентрации исходного соединения не всегда соответствует степени его минерализации. Поэтому эффективность ремедиации необходимо оценивать с учётом остаточной концентрации загрязнителя, общего органического углерода, продуктов трансформации и энергетических затрат. Для тяжёлых металлов плазменное воздействие связано преимущественно с изменением химических форм, подвижности, выщелачиваемости и биодоступности, а не с деструкцией или удалением элемента. В зависимости от способа воздействия возможны как иммобилизация металла, так и изменение его доступности для растений. Установлено, что эффективность холоднoплазменной обработки ограничивается глубиной проникновения активных частиц и неоднородностью почвенной среды. Сделан вывод о перспективности холодной плазмы как компонента интегрированных технологий поверхностной и приповерхностной ремедиации и необходимости стандартизации критериев эффективности и энергопотребления.*

Ключевые слова: *холодная плазма, почва, ремедиация, органические загрязнители, тяжёлые металлы.*

Введение

Проблема загрязнения почв промышленным и агрохимическим отходами остается актуальной в последние годы, так как помимо локальных источников загрязнения происходит их трансформация через водный, вымывающий, размывающий и атмосферно-ветровой перенос с образованием диффузного загрязнения почвы и вторичного риска для экосистем и здоровья человека [1].

Среди наиболее значимых классов почвенных поллютантов выделяют тяжёлые металлы и стойкие органические соединения (включая пестициды, полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) и нефтяные углеводороды), которые длительно сохраняются в матрице почвы, могут переходить в пищевые цепи и проявлять токсичность на уровне микробных сообществ и почвенных функций [2]. Традиционная ремедиация (вывоз/замена грунта, промывки, химический окислительный и биологический разложение загрязнителей) обычно является компромиссной - одни методы занимают много времени, другие очень энергоемки и требуют сложной инфраструктуры, а третьи могут образовывать новые отходы либо работают лишь с определенной эффективностью на практике из-за неравномерности почвы и состава загрязняющих веществ [3].

В этой связи актуализируются исследования процессов продвинутого окисления, включая применения технологий «холодной» (нетепловой) плазмы – метода для создания у поверхности почвенных частиц активных кислород- и азотсодержащих форм (АФКН), способных стимулировать быструю деградацию органических загрязнителей почвы без существенного введения количеств химических реагентов [4].

©У.Е. Жантикеев, Л.Н. Сеймуханова, Д.Р. Мулдаш, Ш.Т. Султахан, М. Токтар, 2026

В актуальных обзорах указывается на важности типа разряда (DBD, коронный, скользящая дуга и т. д.) питания(импульсный или постоянный ток/частота/мощность) газового состава, физико-химических характеристик среды(влажность, пористость, органика, pH), определяющих соотношение процесса формирования активных частиц и доставки последних к целевой зоне в поверхностных слоях грунта [5].

Критически важным механизмом считается участие водной плёнки на частицах почвы: в присутствии влаги повышается вероятность образования •OH, H_2O_2 и других окислителей, а также протекания кислотно-основных и редокс-сдвигов в микрозоне контакта, что может ускорять распад органических молекул и изменять миграционные формы ряда неорганических компонентов [6].

Несмотря на возрастающее число исследований, посвящённых применению холодной нетепловой плазмы в процессах ремедиации, непосредственное сопоставление опубликованных результатов остаётся затруднительным вследствие существенных различий в конструкции плазменных систем, типах разряда, энергетических параметрах, свойствах почвенной матрицы, влажности, природе и исходной концентрации загрязнителей, а также используемых критериях эффективности. При этом одинаковое снижение концентрации загрязнителя не всегда характеризует одинаковый ремедиационный результат. Для органических соединений необходимо разграничивать деструкцию исходной молекулы и степень её минерализации, тогда как для тяжёлых металлов принципиальное значение имеет не разрушение или удаление элемента, а изменение его подвижности, выщелачиваемости и биодоступности.

В связи с этим целью настоящего обзора является критическое сопоставление современных исследований по применению холодной нетепловой плазмы для ремедиации загрязнённых почв с учётом типа разряда, параметров плазменной обработки, физико-химических характеристик почвы и природы загрязнителя, а также анализ взаимосвязи между генерацией и переносом активных форм кислорода и азота, деструкцией органических загрязнителей, изменением форм нахождения тяжёлых металлов и энергетической эффективностью процесса.

Отличительной особенностью настоящего обзора является рассмотрение плазменной ремедиации не только с позиции конечного снижения концентрации загрязнителя, но как последовательности взаимосвязанных стадий: генерации активных форм кислорода и азота в зоне разряда, их переноса через газовую, водную и пористую фазы почвы и последующего физико-химического воздействия на загрязнитель и почвенную матрицу. Такой подход позволяет отдельно оценивать окислительную деструкцию органических соединений и плазменно-индуцированную иммобилизацию тяжёлых металлов, а также выявлять ограничения, связанные с глубиной воздействия, массопереносом и энергетическими затратами.

Схема основных процессов в результате воздействия холодной плазмой на почво-растительный покров приведена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Общая схема механизмов воздействия холодной плазмы на почву

Методология обзора

Отбор и анализ литературы проводили с учётом основной цели обзора – сопоставления механизмов и эффективности применения холодной нетепловой плазмы для ремедиации

загрязнённых почв и грунтов. В анализ включали экспериментальные и обзорные исследования, посвящённые плазменной обработке почв, содержащих органические загрязнители и тяжёлые металлы, а также работы, раскрывающие механизмы генерации и переноса активных форм кислорода и азота в пористых и увлажнённых средах [4].

При отборе публикаций основное внимание уделяли исследованиям, содержащим данные хотя бы по одному из следующих параметров: типу плазменного разряда, способу контакта плазмы с почвой, времени обработки, мощности или другим электрическим параметрам, составу рабочей газовой среды, влажности и характеристикам почвы, природе и исходной концентрации загрязнителя, а также конечному показателю ремедиационного эффекта. Работы, в которых рассматривалось исключительно образование плазмы без связи с воздействием на почвенную среду или загрязнитель, не использовались в качестве основной доказательной базы при сравнении эффективности ремедиации [5].

При сопоставлении опубликованных результатов учитывали, что прямое сравнение значений эффективности, полученных различными исследовательскими группами, ограничено существенными различиями в массе и составе почвенных образцов, влажности, начальной концентрации загрязнителей, конструкции плазменных реакторов, типах разряда и способах расчёта энергетических характеристик. Поэтому основной единицей сравнения являлся не только процент снижения концентрации загрязнителя, но совокупность условий, при которых данный эффект был достигнут.

Для органических загрязнителей анализировали снижение концентрации исходного соединения, характер его трансформации и, при наличии соответствующих данных, степень минерализации и образование промежуточных продуктов. Для тяжёлых металлов результаты оценивали отдельно, поскольку плазменная обработка не приводит к деструкции химического элемента. В данном случае учитывали изменения форм связывания, подвижности, миграционной способности и биодоступности металлов.

Таким образом, рассмотренные исследования сопоставлялись по следующим основным группам критериев: (1) тип и параметры плазменного разряда; (2) способ воздействия – прямой или дистанционный; (3) характеристики почвенной матрицы, включая влажность и физико-химические свойства; (4) тип и концентрация загрязнителя; (5) продолжительность обработки; (6) достигнутый ремедиационный эффект; (7) энергетические характеристики процесса, если соответствующие данные были представлены авторами исследования.

Анализ публикаций также показывает особенности взаимодействия плазмы с почвой. Так в одних работах, разряд создаётся над поверхностью почвы либо внутри поры и таким образом активные частицы находятся в непосредственной близости от загрязнённой фазы, а в других воздействия осуществляются на расстоянии - поэтому главными агентами оказываются долгоживущие окислители (озон, пероксид водорода, нитриты, нитраты). Такие формы живут дольше чем короткоживущие радикалы но перемещение через почву все же ограничено пористой структурой, влажностью и расположением загрязнителя, поэтому в литературе обычно сравнивали прямую и дистанционную обработку как отдельные случаи по разным принципам действия и результатам.

Для систематизации рассмотренных данных использован трёхуровневый принцип сравнительного анализа плазменно-индуцированных процессов. Первый уровень включает генерацию активных форм кислорода и азота непосредственно в зоне плазменного разряда и определяется типом разряда, электрическими характеристиками и составом газовой среды. Второй уровень характеризует транспорт образованных активных частиц к поверхности почвенных агрегатов и в приповерхностное поровое пространство; на данной стадии определяющее значение имеют время жизни активных форм, влажность, пористость, гранулометрический состав и особенности массопереноса. Третий уровень отражает конечные физико-химические последствия взаимодействия плазменно-индуцированных частиц с загрязнителем и почвенной матрицей: деструкцию и частичную или глубокую минерализацию органических соединений, изменение pH и окислительно-восстановительного потенциала, а также перераспределение тяжёлых металлов между подвижными и малоподвижными формами.

Применение такого подхода позволяет избежать оценки эффективности плазменной ремедиации исключительно по продолжительности обработки или мощности разряда и

связать конечный результат с последовательностью процессов «генерация активных частиц → массоперенос → взаимодействие с загрязнителем → ремедиационный эффект».

Следует подчеркнуть, что настоящий обзор не является формальным мета-анализом, поскольку опубликованные экспериментальные исследования характеризуются высокой методической неоднородностью: различаются типы и массы почвенных образцов, влажность и пористость грунта, начальные концентрации загрязнителей, конструкции плазменных реакторов, режимы электрического питания, продолжительность обработки и способы расчёта энергетических затрат. Кроме того, в разных исследованиях используются различные критерии результата – от снижения концентрации исходного загрязнителя до изменения общего органического углерода, токсичности, подвижности или биодоступности.

Поэтому в настоящей работе применён критико-сравнительный подход, при котором численные показатели эффективности рассматриваются совместно с экспериментальными условиями их получения. Особое внимание уделено выявлению факторов, ограничивающих прямое сопоставление результатов, включая глубину проникновения активных частиц, неоднородность реальных грунтов, влажность, массоперенос, образование промежуточных продуктов деструкции и различия в определении энергопотребления.

Такой подход позволяет не только обобщить имеющиеся данные, но и определить параметры, которые должны быть стандартизированы в дальнейших исследованиях холоднoплазменной ремедиации почв для обеспечения корректного сравнения лабораторных и перспективных масштабированных процессов.

Механизм воздействия холодной плазмы на почву

При воздействии на поверхность почвенная плазма с холодным разрядом в газовой фазе образуются высокоэнергетические электроны вызывающие диссоциацию кислородных, азотных и водяных паров.

На молекулярном уровне указанные процессы могут быть описаны через элементарные плазмохимические реакции, приводящие к образованию реактивных форм кислорода и азота. Первичным агентом плазменного воздействия являются не сами радикалы, а высокоэнергетические электроны, которые определяют скорость генерации активных форм и характер протекающих плазмохимических реакций [4].

$$e^- + O_2 \rightarrow 2O\bullet + e^- \quad (1)$$

$$e^- + H_2O \rightarrow \bullet OH + H\bullet + e^- \quad (2)$$

$$O\bullet + O_2 + M \rightarrow O_3 + M \quad (3)$$

$$e^- + N_2 \rightarrow 2N\bullet + e^- \quad (4)$$

$$N\bullet + O_2 \rightarrow NO + O\bullet \quad (5)$$

$$NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2 \quad (6)$$

Радикалы и молекулярные окислители обладают большой степенью активности и как раз именно они выступают первичными агентами химического воздействия плазмы на поверхность почвенных частиц. Формируются различные активные формы кислорода и азота, в основном – гидроксильные радикалы, атомарный кислород, озон, оксиды азота. Данные частицы лишь немного проникают на ограниченную глубину в почву, однако они эффективно реагируют с верхним слоем почвы, содержащий большую часть органики и функциональные группы минералов [7]. Основной механизм воздействия холодной плазмы на почву происходит именно в приповерхностном слое грунта из-за недолгого времени их движения внутри почвы, что видно на рисунке 2.

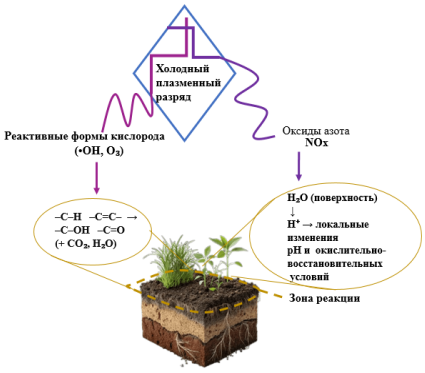


Рисунок 2 – Схематическое представление приповерхностных процессов при воздействии холодной плазмы на почву

Ключевым элементом механизма является наличие влаги на поверхности почвенных частиц. В присутствии тонкой водной плёнки на поверхности частиц плазменно-индуцированные активные формы вовлекаются в ряд вторичных реакций, протекающих в жидкой фазе [6].

$$\bullet OH + \bullet OH \rightarrow H_2O_2 \quad (7)$$

$$NO_2 + NO + H_2O \rightarrow 2HNO_2 \quad (8)$$

$$2NO_2 + H_2O \rightarrow HNO_2 + HNO_3 \quad (9)$$

Реакции протекают с образованием пероксидов и азотсодержащих веществ и локальным повышением концентрации H^+, изменяющих кислотно-основное и окислительно-восстановительное состояние верхнего слоя почвы.

Даже при сравнительно невысокой общей влажности на поверхности почвенных частиц может сохраняться тонкая водная плёнка, в которой активно протекают процессы образования и последующих реакций гидроксильных радикалов. В этой поверхностной водной фазе и происходят главные окисления. Гидроксильные радикалы имеют очень высокий окислительный потенциал и атакуют органические соединения по связям C-H и C-C. В итоге сложные органики разлагаются на более простые кислородосодержащие соединения, которые далее частично минерализуются в CO_2 и H_2O [5].

Одновременно происходит образование в системе азотсодержащих активных форм. Оксиды азота, реагируя с водной фазой на поверхности, генерируют протоны и ионы азота, изменяя локально кислотность-основность и окислительно-восстановительный потенциал приповерхностного слоя почвы; эти локальные изменения являются пространственно ограниченными, однако они же обуславливают химию трансформации загрязнителей и составляющих матрицу почвы [6].

В отношении тяжелых металлов холодная плазма не обеспечивает их разложения или деструкции, а меняет степень окисления. Вследствие локального изменения pH и редокс потенциала изменяется распределение металла между подвижной и малоподвижной формами. Часть ионов переходят в формы более устойчивого состава либо прочнее связываются с функциональными группами органики и поверхностей минералов, что приводит к снижению миграционной способности и биодоступности [4].

Таким образом, механизм действия холодной плазмы по отношению к почве сводится к комбинации поверхностного окисления загрязнений-органики и химического «возбуждения» почвенной матрицы посредством реактивных форм кислорода и азота. Действие происходит преимущественно в приповерхностном слое почвы (зона контакта плазмы с поверхностью почвы) и зависит от влажности грунта, типа загрязнения и параметров разряда - это объясняет почему холодная плазма эффективна для поверхностных и приповерхностных задач ремедиации.

Факторы, определяющие эффективность плазменной ремедиации почвы

Эффективность холоднoплазменной ремедиации определяется совокупностью параметров плазменного разряда и характеристик почвенной системы. К основным факторам относятся влажность, пористость и гранулометрический состав грунта, содержание органического вещества, природа и концентрация загрязнителя, а также напряжение, частота, мощность, длительность импульсов, газовая среда и способ контакта плазмы с почвой.

Влажность оказывает неоднозначное влияние на процесс. Тонкая водная плёнка на поверхности частиц способствует образованию и переносу $\bullet OH$, H_2O_2 и других активных форм, тогда как избыточная влажность может снижать интенсивность микроразрядов в порах и ограничивать доступ активных частиц к загрязнителю [5,6]. Поэтому определяющим является не максимальное содержание воды, а оптимальная влажность, обеспечивающая одновременно развитие плазменного разряда и образование вторичных окислителей.

Пористость и гранулометрический состав определяют условия транспорта газовой фазы и долгоживущих окислителей. В рыхлых и песчаных грунтах массоперенос обычно эффективнее, тогда как в плотных, глинистых и гумусированных почвах он ограничивается сорбцией загрязнителей и конкурентным расходованием активных частиц на органические и минеральные компоненты матрицы.

Увеличение мощности или продолжительности обработки, как правило, повышает степень деструкции органических загрязнителей, однако зависимость не является линейной.

После разрушения наиболее доступной части загрязнителя дальнейшая обработка сопровождается ростом удельных энергетических затрат при меньшем приросте эффективности. Поэтому при сопоставлении плазменных систем необходимо учитывать не только степень удаления, но и энергетическую эффективность процесса. Для корректного сравнения следует указывать массу и влажность образца, тип почвы, начальную концентрацию загрязнителя, параметры разряда и метод расчёта энергозатрат.

Изменение свойств почвы после обработки холодной плазмой

Механизм действия холодной плазмы на почву связан с образованием АФКН, реагирующих с минеральной и органической составляющей почвенного комплекса преимущественно в поверхностных слоях. По мнению современных исследователей данный процесс происходит в области взаимодействия плазмы с увлажненной поверхностью почвы без значительного повреждения ее физической структуры [6].

Среди прочих наиболее частых изменений после плазменной обработки отмечается изменение pH почвы. При разных почвах, их буферности, влажностном состоянии и параметрах разряда могут наблюдаться как небольшие смещения в кислой зоне, так и небольшие увеличения pH; эти явления ассоциируют с появлением кислород и азотсодержащих групп (нитраты, нитриты, пероксидные структуры) при реакции активных компонентов плазмы с составляющими матрицы почвы [8].

Сдвиг электропроводности почвы в ходе обработки ее холодной плазмой свидетельствует о преобразовании ионного состава почвенного раствора. Как увеличение, так и уменьшение значения электропроводности можно связать и с образованием растворенных продуктов окисления органики и перераспределением ионных форм неорганической составляющей части из-за локальных ОВП. Направление и величина изменений электропроводности существенно зависят от исходных свойств почвы и режима плазменной обработки [6, 9, 10].

Концентрация органического вещества почвы уменьшается при воздействии на нее холодной плазмы за счет процесса окисления органики. Образующиеся при плазменной обработке •OH, атомарный кислород и озон способны инициировать разрыв C–H- и C–C-связей органических соединений с образованием более простых кислородсодержащих продуктов и их последующей частичной минерализацией до CO_2 и H_2O [5,11].

Биопараметры почв также подвержены влиянию холодной плазмы. Указывалось на уменьшение количества микробов в обработанной области, а механизм явления объяснялся действием окислительного стресса на клеточные мембраны и органоиды. Обсуждался факт дозозависимости явления и его обратимости. Тем не менее существует ряд исследований в которых отмечается частичное восстановление сообщества микроорганизмов после отключения плазмы, тем более если обработка происходила в мягком режиме. Это объясняется уменьшением токсичной среды из-за разрушения органики и нормализации химических показателей почв [12, 13].

В целом, большинство исследователей считают, что воздействие холодной плазмы приводит к системным изменениям химических и биологических характеристик почвы, но не нарушает ее структурной целостности при среднем уровне воздействия [14].

Основные изменения химических, биологических и физических свойств почвы после обработки холодной плазмой, отмеченные в литературных источниках, обобщены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные изменения свойств почвы после обработки холодной плазмой

Показатель	Характер изменения	Источник
pH	слабые сдвиги в кислую или щелочную сторону	[4, 8]
Электропроводность	изменение ионного состава, возможный рост электропроводности	[4, 6]
Органическое вещество	частичная окислительная минерализация органических соединений	[5]
Микробиота	снижение численности микроорганизмов в зоне обработки	[4, 15]
Физическая структура	существенных изменений макроструктуры не выявлено	[4]

Воздействие холодной плазмы на тяжёлые металлы и органические загрязнители в почве

Холодная плазма пока не рассматривается в качестве средства для экстракции тяжелых металлов из почв, но она оказывает существенное влияние на состояние химических соединений тяжелыми металлами и их миграционную способность. В основе этого явления лежит взаимодействие активных форм кислорода и азота с поверхностью почвенных агрегатов, функциональных групп минеральных и органических компонентов почвы. В результате изменяются формы связывания металлов и их распределение между подвижными и малоподвижными фракциями, при этом целостность почвенной структуры сохраняется [14, 15].

Стабильность катионов тяжелых металлов в матрице почвы описывается реакцией со специфическими группами на поверхности и формированием малорастворимых продуктов.

$$\equiv SO^- + Me^{2+} \rightarrow \equiv SO–Me^+ \quad (10)$$

$$Me^{2+} + OH^- \rightarrow Me(OH)_2\downarrow \quad (11)$$

Данная совокупность процессов вызывает уменьшение миграционной активности и биологической доступности металлов при сохранении в почве (плазменно-индуцированная иммобилизация).

Поскольку плазменное воздействие на тяжёлые металлы связано прежде всего с изменением их химических форм, для количественной оценки необходимо анализировать не только общее содержание элемента, но также его подвижность, выщелачиваемость и биодоступность. Характерные результаты опубликованных исследований приведены в таблице 2.

Данные таблицы 2 показывают, что воздействие холодной плазмы на тяжёлые металлы не может быть описано единым механизмом «удаления». Наиболее прямой пример плазменно-индуцированной стабилизации продемонстрирован для Tl, где нетепловая плазма использовалась для модификации стабилизирующих реагентов, а эффективность оценивалась по снижению концентрации Tl в выщелате и перераспределению его химических форм [22]. В оптимизированных условиях концентрация выщелачиваемого Tl составляла 0,37-7,34 мкг/л, что свидетельствует именно об иммобилизации загрязнителя, тогда как его общее содержание в почве при этом не рассматривается как показатель удаления.

Для Cd и Pb результаты имеют иной характер. Предварительная плазменная обработка семян Cd-толерантных растений увеличивала накопление Cd на 8,8-54,4%, то есть способствовала фитоэкстракции металла из почвы [17]. Напротив, в опытах с плазменно-активированной водой и водяным шпинатом в ряде режимов наблюдалось снижение накопления Cd в растительной биомассе на 17,8-22,9%, тогда как для Pb выраженного положительного эффекта не установлено [16]. Таким образом, изменение содержания металла в растениях не следует автоматически интерпретировать как изменение его общего содержания в почве: оно отражает прежде всего изменение биодоступности и транспорта элемента в системе «почва – растение».

Плазменно-индуцированные изменения pH, окислительно-восстановительного состояния и свойств почвенной или ризосферной среды могут изменять распределение тяжёлых металлов между подвижными и малоподвижными формами. Направление этого перераспределения зависит от способа плазменного воздействия и свойств системы и может проявляться как в снижении выщелачиваемости и иммобилизации металла, так и в повышении его биодоступности при стимулировании фитоэкстракции [16-18].

Органические вещества имеют большую чувствительность к воздействию холодной плазмы относительно неорганических веществ. Высокая окислительная активность частиц, индуцируемых плазмой может приводить к разрыву связей между атомами в структуре органических соединений.

Окислительное разрушение органических загрязнителей под действием холодной плазмы реализуется по радикальному механизму и может быть описано обобщённой схемой реакций.

$$R–H + \bullet OH \rightarrow R\bullet + H_2O \quad (12)$$

$$R\bullet + O_2 \rightarrow ROO\bullet \quad (13)$$

$$ROO\bullet \rightarrow \text{фрагментация} \rightarrow CO_2 + H_2O + \text{низкомолекулярные кислоты} \quad (14)$$

Таблица 2 – Количественные показатели влияния холодноплазменных технологий на подвижность, выщелачиваемость и биодоступность тяжёлых металлов

Металл	Способ плазменного воздействия	Условия / объект	Исходное содержание	Оцениваемый показатель	Количественный эффект	Интерпретация	Источник
1	2	3	4	5	6	7	8
Tl	Нетепловая плазма для предварительной модификации стабилизаторов KH_2PO_4 и SDDC	NTP-обработанные стабилизаторы вносили в искусственно загрязнённую Tl^+ почву; варьировали напряжение, время NTP-обработки и молярное соотношение KH_2PO_4/SDDC	Искусственно загрязнённая почва	Выщелачиваемость Tl и изменение химических форм	В ортогональной серии концентрация Tl в выщелате составляла 5,11-52,37 мкг/л; после последующей оптимизации – 0,37-7,34 мкг/л	Выраженная иммобилизация Tl за счёт снижения выщелачиваемости и перераспределения химических форм	[22]
Cd	Предварительная обработка семян холодной плазмой	Bidens pilosa, Solanum nigrum, Trifolium repens; оптимальная мощность 100 Вт для B. pilosa и 500 Вт для двух других видов; время 60 с	Cd-загрязнённая почва	Накопление Cd растениями и эффективность фитоэкстракции	Накопление Cd увеличилось на 8,8-54,4 %, сухая биомасса – на 17,3-45,0 % по сравнению с контролем	Усиление фитоэкстракции, а не иммобилизации; эффект связывается с ростом кислоторастворимой фракции Cd в ризосфере	[17]
Cd	Плазменно-активированная вода и/или плазменная обработка семян	Водяной шпинат, выращенный на Cd-загрязнённой почве	18,18-20,43 мг/кг сухой почвы	Содержание Cd в растительной биомассе	При использовании только PAW содержание Cd в растении снизилось на 17,8%; при обработке только семян – на 22,9%; при сочетании двух воздействий – на 4,5%	Снижение бионакопления Cd, но не доказанное удаление или иммобилизация общего Cd в почве	[16]

1	2	3	4	5	6	7	8
Pb	Плазменно-активированная вода и/или плазменная обработка семян	Водяной шпинат, выращенный на Pb-загрязнённой почве	2064-2492 мг/кг сухой почвы	Содержание Pb в растительной биомассе	Снижение Pb в растении составляло 0,57% при PAW и 1,42% при обработке семян; сочетание двух воздействий, напротив, увеличивало накопление Pb на 64,8%	Эффект зависит от режима; однозначной иммобилизации Pb не установлено	[16]
Cd, Pb	Плазменно-активированная вода, полученная DBD с жидким электродом	Cannabis sativa в среде с различными концентрациями Cd или Pb	Варьировалось	Бионакопление и локализация металлов	LIBS-картирование показало преимущественное накопление Cd и Pb в корнях; PAW повышала рост растений при Pb-стрессе	Доказан эффект на биодоступность и фитоаккумуляцию, но количественное снижение содержания металла в почве не установлено	[18]

В отличие от тяжёлых металлов органические загрязнители могут непосредственно подвергаться окислительной деструкции под действием •OH, атомарного кислорода и озона. Последовательное окисление приводит к фрагментации исходных молекул и образованию промежуточных кислородсодержащих соединений с последующей частичной или глубокой минерализацией [19-21]. Однако в реальной почвенной матрице загрязнитель конкурирует с гумусом и поверхностными функциональными группами за активные частицы, поэтому эффективность зависит не только от плазменной мощности, но и от состава почвы.

Для количественного сопоставления эффективности холоднoплазменной ремедиации были обобщены результаты экспериментальных исследований, в которых приведены основные параметры разряда, начальная концентрация загрязнителя, продолжительность обработки и достигнутый эффект. Такое сопоставление является более информативным, чем оценка только конечной степени удаления, поскольку одинаковый уровень деструкции может быть достигнут при существенно различающихся режимах плазменного воздействия, времени обработки и энергетических затратах. В таблице 3 представлены характерные результаты для различных классов органических загрязнителей и конфигураций плазменных разрядов. При интерпретации данных учитывалось, что используемые в литературе энергетические показатели выражаются в различных единицах и рассчитываются по неодинаковым методикам, что ограничивает возможность их прямого количественного сравнения.

Представленные данные демонстрируют, что холоднoплазменная обработка способна обеспечивать высокую степень деструкции различных органических загрязнителей, однако продолжительность обработки и энергетическая эффективность существенно зависят от типа разряда, свойств загрязнителя и условий взаимодействия плазмы с почвенной матрицей. Так, для атразина при DBD-обработке в течение 60 мин степень деградации достигала 86,9%, тогда как минерализация по общему органическому углероду составляла 65,5% [7]. Данное различие принципиально важно, поскольку исчезновение исходного соединения ещё не свидетельствует о его полном превращении в конечные неорганические продукты.

Для фенантрена степень деградации 87,3% была достигнута за 20 мин при энергетической эффективности 0,01 мг/кДж [8], тогда как применение наносекундного импульсного DBD к почве, загрязнённой ципрофлоксацином, позволило достичь приблизительно 99 % деградации примерно за 3 мин при энергетической эффективности 4,6 мг/кДж [23]. Для трифлуралина при формировании микроразрядов непосредственно в порах почвы степень деградации достигала 97,3% за 10 мин при энергетической эффективности 4,1 мг/кДж [15]. Эти результаты показывают, что генерация плазмы непосредственно в поровом пространстве может существенно интенсифицировать контакт активных форм с загрязнителем и сократить продолжительность обработки.

Отдельного внимания требует интерпретация показателей, характеризующих нефтяные загрязнения. При обработке пористой бокситовой матрицы, загрязнённой нефтешламом, снижение TOC составляло около 70 % за 30 мин при удельных энергозатратах 0,53 кВт·ч/кг [9]. В данном случае снижение TOC характеризует более глубокое удаление органического углерода, чем простое уменьшение концентрации одного исходного соединения, однако даже этот показатель не следует автоматически отождествлять с полной минерализацией всех компонентов нефтешлама. Для бензина максимальная степень деградации достигала 90 % после 60 мин импульсной коронной обработки [21], что также подтверждает высокую эффективность плазменного окисления летучих углеводородных загрязнителей.

Следует также учитывать, что энергетические характеристики в опубликованных исследованиях представлены в разных формах: как удельная энергия на массу почвы (Дж/г), энергетический выход по массе удалённого загрязнителя (мг/кДж) или энергопотребление на единицу массы обработанного материала (кВт·ч/кг). Поэтому прямое ранжирование плазменных систем только по численным значениям этих показателей некорректно. Для дальнейшего развития технологии необходима унификация энергетических критериев с обязательным указанием массы обрабатываемой почвы, начального содержания загрязнителя, продолжительности процесса и фактически достигнутой степени деструкции или минерализации.

Таблица 3 – Количественное сравнение эффективности холодноплазменной обработки почв, загрязнённых органическими соединениями

Загрязнитель	Тип плазменного разряда	Основные параметры обработки	Начальная конц.	Время обработки	Достигнутый эффект	Энергетическая характеристика	Источник
Атразин	Диэлектрический барьерный разряд (DBD)	44,8 кВ; 300 Гц; расход воздуха 1,0 л/мин; масса почвы 5 г	100 мг/кг	60 мин	Деградация 86,9 %, минерализация 65,5 % по TOC	≈100 Дж/г почвы	[7]
Фенантрен	Импульсный DBD	110 В; 150 Гц; расход воздуха 0,6 л/мин; масса почвы 5 г	200 мг/кг	20 мин	Деградация 87,3 %	0,01 мг/кДж	[8]
Пентахлор-фенол	Импульсный коронный разряд	16 кВ; 67 Гц; расход воздуха 1,0 л/мин; масса почвы 5 г	200 мг/кг	60 мин	Деградация 87 %	Не указана	[20]
Ципрофлокса-цин	Наносекундный импульсный DBD	17,4 кВ; 200 Гц; влажность почвы 5 %; воздух 1,0 л/мин	Варьировалась	≈3 мин	Деградация ≈99 %	4,6 мг/кДж	[23]
Трифлуралин	Коаксиальный DBD; наносекундные высоковольтные импульсы; микроразряды непосредственно в порах почвы	26,8 кВ; 100 Гц; воздух 0,075 л/мин; масса почвы 10,1 г	200 мг/кг	10 мин	Деградация 97,3 %	4,1 мг/кДж	[15]
Нефтешлам в пористой бокситовой матрице	Коаксиальный DBD, микроразряды непосредственно в порах материала	Плазма генерировалась непосредственно в воздушной фазе взаимосвязанных пор боксита	Сильно загрязнённый нефтешламом боксит	30 мин	Снижение TOC ≈70 %	0,53 кВт·ч/кг	[9]
Бензин	Импульсный коронный разряд, реактор игла–пластина	до 40 кВ; pH 7,2; температура ≈25 °C	Варьировалась	60 мин	Максимальная деградация 90 %	Не указана	[21]

Критерии оценки ремедиационного эффекта: деструкция, минерализация и иммобилизация

При оценке эффективности холодноплазменной ремедиации необходимо разграничивать удаление, деструкцию, минерализацию и иммобилизацию загрязнителей. Снижение концентрации исходного соединения само по себе не всегда свидетельствует о полном обезвреживании загрязнителя.

Для органических соединений под деструкцией понимается разрушение исходной молекулярной структуры под действием плазменно-индуцированных активных форм кислорода и азота с образованием промежуточных продуктов, включая органические кислоты, альдегиды, кетоны и другие низкомолекулярные соединения. Поэтому высокий процент деградации исходного вещества не эквивалентен полной минерализации.

Под минерализацией понимается более глубокое окислительное превращение органического углерода преимущественно в конечные неорганические продукты, прежде всего CO_2 и H_2O. Для оценки глубины процесса наряду с остаточной концентрацией загрязнителя целесообразно определять общий органический углерод (TOC) и состав продуктов трансформации. Показатель TOC позволяет отличить разрушение исходной молекулы от фактического уменьшения общего содержания органического вещества.

Термин «удаление» следует применять только при подтверждённом уменьшении количества загрязнителя или органического углерода в рассматриваемой системе, поскольку снижение концентрации исходного соединения может быть связано не только с минерализацией, но и с образованием летучих продуктов или перераспределением вещества между фазами. Для наиболее полной оценки органических загрязнителей целесообразно сочетать определение остаточной концентрации с GC–MS или HPLC-анализом продуктов трансформации, измерением TOC и, при необходимости, оценкой токсичности.

Для тяжёлых металлов термины «деструкция» и «минерализация» неприменимы, поскольку химический элемент в ходе плазменной обработки не разрушается. Плазменное воздействие может изменять степень окисления металла, его химическое окружение и распределение между подвижными и малоподвижными фракциями без существенного изменения общего содержания элемента в почве.

В данном случае более корректным критерием ремедиационного эффекта является иммобилизация, то есть перевод металла в формы с меньшей подвижностью, выщелачиваемостью и биодоступностью. Поэтому оценка эффективности должна включать определение общего содержания элемента, подвижных и обменных фракций, выщелачиваемости и биодоступности. Дополнительно необходимо учитывать устойчивость сформированных малоподвижных форм при изменении pH, влажности и окислительно-восстановительных условий.

Таким образом, для органических загрязнителей основными критериями являются степень деструкции и глубина минерализации, тогда как для тяжёлых металлов – изменение подвижности, выщелачиваемости и биодоступности при контроле общего содержания элемента. Такой подход позволяет избежать некорректного использования единого показателя «степень удаления» для различных механизмов плазменного воздействия.

Ограничения технологии и перспективы масштабирования

Основным ограничением холодноплазменной ремедиации остаётся небольшая эффективная глубина воздействия активных частиц. Поэтому технология наиболее применима к поверхностным и приповерхностным загрязнениям, тогда как обработка более глубоких горизонтов требует перемешивания или других способов интенсификации массопереноса. Проблема усиливается в реальных грунтах, характеризующихся неоднородностью влажности, плотности, органического и минерального состава, вследствие чего распределение плазменной дозы и доступ активных форм к загрязнителю существенно отличаются от условий лабораторных экспериментов.

Отдельный аспект – проблема масштабирования плазменных установок. На лабораторном уровне вполне реально обеспечить стабильный зазор электродов, заданную массу пробы, влажность, расход газа, мощность и время обработки. При переходе на большие объемы почвы уже сложнее добиться равномерности разряда и однородности дозы для всей массы материала. Это говорит о том, что повышение производительности установки не обеспечит соответствующее улучшение её эффективности. Более того, в случае нерационального режима работы возможно использование энергии на ее нагревание,

образование побочных веществ или на очистку уже очищенной поверхности, при этом загрязненные зоны внутренних поверхностей аппарата будут подвержены лишь незначительному воздействию.

Другим ограничением является образование промежуточных продуктов окисления. Поэтому технологический эффект должен оцениваться не только по снижению концентрации исходного соединения, но также по степени минерализации и токсичности продуктов трансформации.

Для тяжёлых металлов ключевым ограничением является долговременная устойчивость иммобилизованных форм. Изменение pH, влажности или окислительно-восстановительных условий после обработки потенциально может привести к повторной мобилизации металла, поэтому необходим контроль устойчивости ремедиационного эффекта во времени.

Особый интерес представляет сочетание с холодной плазмой иных технологий. Так, плазма может применяться в качестве подготовительного этапа к процессу частичной окислении небиоразлагаемых органических веществ для облегчения их дальнейшего биодеградации. Интересен также способ получения плазмы в присутствии сорбентов, катализаторов, фотокаталитических материалов или окислителей, позволяющих увеличивать время жизни активных частиц и уменьшать энергоемкость процесса. Для смесей органических и неорганических веществ (тяжёлых металлов) оптимальным является сочетание методов: плазма для деградации органогенной части, сорбенты/минерализаторы – для удаления неорганической фазы.

На наш взгляд, дальнейшее развитие плазменной ремедиации должно быть связано не только с поиском более мощных разрядных систем, но и со стандартизацией оценки эффективности. В разных работах используются различные массы почвы, разные начальные концентрации загрязнителей, разные способы расчёта энергии и разные критерии очистки. Из-за этого результаты трудно сравнивать между собой. Для более корректной оценки необходимо указывать влажность и массу образца, тип почвы, начальную и остаточную концентрацию загрязнителя, мощность и продолжительность обработки, расход газа, температуру, изменение pH и электропроводности, а также энергетические затраты на единицу массы обработанного грунта или удалённого загрязнителя.

Заключение

Проведённый обзор показывает, что холодная нетепловая плазма является перспективным инструментом для поверхностной и приповерхностной ремедиации загрязнённых почв за счёт генерации активных форм кислорода и азота и их последующего взаимодействия с загрязнителями и компонентами почвенной матрицы. Эффективность процесса определяется не только типом и параметрами плазменного разряда, но также влажностью, пористостью и составом почвы, природой и исходной концентрацией загрязнителя, способом контакта плазмы с обрабатываемой средой и продолжительностью воздействия.

Для органических загрязнителей основным механизмом является окислительная деструкция с образованием промежуточных продуктов и последующей частичной или глубокой минерализацией. Количественное сопоставление опубликованных данных показывает, что в лабораторных условиях степень деградации отдельных органических соединений может достигать 85-99%, однако эти значения получены при существенно различающихся режимах обработки и энергетических затратах. При этом степень деградации исходного соединения не всегда соответствует степени минерализации, что подтверждает необходимость комплексной оценки по остаточной концентрации загрязнителя, содержанию общего органического углерода, составу продуктов трансформации и энергетическим характеристикам процесса.

Для тяжёлых металлов холоднoплазменное воздействие не приводит к деструкции химического элемента, а изменяет его химические формы, подвижность, выщелачиваемость и биодоступность. В зависимости от способа воздействия и свойств системы это может проявляться как в снижении миграционной способности и иммобилизации металла, так и в изменении его доступности для растений и эффективности фитоэкстракции. Поэтому оценка ремедиационного эффекта для тяжёлых металлов должна основываться на раздельном контроле общего содержания элемента, подвижных и обменных фракций, выщелачиваемости

и биодоступности, а также на оценке устойчивости сформированных малоподвижных форм во времени.

Одним из основных ограничений технологии остаётся малая эффективная глубина проникновения активных частиц и неоднородность реальных почвенных систем, что затрудняет равномерное воздействие при масштабировании. Дополнительными ограничивающими факторами являются образование промежуточных продуктов окисления, различия в методиках расчёта энергетической эффективности и отсутствие унифицированных критериев сопоставления результатов.

Таким образом, холодную плазму целесообразно рассматривать не как универсальную замену традиционным методам ремедиации, а как компонент интегрированных технологий, особенно для поверхностных и приповерхностных загрязнений. Дальнейшее развитие направления должно быть связано со стандартизацией экспериментальных и энергетических параметров, оценкой токсичности продуктов трансформации, контролем долговременной устойчивости иммобилизованных форм тяжёлых металлов и разработкой инженерных решений, обеспечивающих более равномерный массоперенос и снижение удельных энергозатрат.

Список литературы

1. Nuruzzaman M. Diffuse soil pollution from agriculture: Impacts and remediation / M. Nuruzzaman, M.M. Bahar, R. Naidu // Science of the Total Environment. – 2025. – Vol. 962. – Article № 178398. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178398.
2. Effect of heavy metal pollution on soil microorganisms: Influence of soil physicochemical properties. A systematic review / C. Campillo-Cora et al // European Journal of Soil Biology. – 2024. – Vol. 124. – Article No. 103706. – https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2024.103706.
3. Michael-Igolima U. A systematic review on the effectiveness of remediation methods for oil contaminated soils / U. Michael-Igolima, S.J. Abbey, A.O. Ifelebuegu // Environmental Advances. – 2022. – Vol. 9, Article № 100319. https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100319.
4. Aggelopoulos C.A. Recent advances of cold plasma technology for water and soil remediation: A critical review / C.A. Aggelopoulos // Chemical Engineering Journal. – 2021. – Vol. 428, Article № 131657. https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.131657.
5. Review on remediation of organic-contaminated soil by discharge plasma: Plasma types, impact factors, plasma-assisted catalysis, and indexes for remediation / H. Guo et al // Chemical Engineering Journal. – 2022. – Vol. 436, Article № 135239. https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.135239.
6. Highly energy-efficient degradation of antibiotics in soil: Extensive cold plasma discharges generation in soil pores driven by high voltage nanopulses / M. Hatzisymeon et al // Science of the Total Environment. – 2021. – Vol. 786, Article № 147420. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147420.
7. Aggelopoulos C. Degradation of atrazine in soil by dielectric barrier discharge plasma – Potential singlet oxygen mediation / C. Aggelopoulos, D. Tataraki, G. Rassias // Chemical Engineering Journal. – 2018. – Vol. 347. – P. 68-–694. https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.04.111.
8. Study on remediation of phenanthrene contaminated soil by pulsed dielectric barrier discharge plasma: The role of active species / R. Li et al // Chemical Engineering Journal. – 2016. – Vol. 296. – P. 132-140. https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.03.054.
9. Aggelopoulos C. A new perspective towards in-situ cold plasma remediation of polluted sites: Direct generation of micro-discharges within contaminated medium / C. Aggelopoulos, C. Tsakiroglou // Chemosphere. – 2020. – Vol. 266, Article № 128969. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128969.
10. Dielectric barrier discharge plasma used as a means for the remediation of soils contaminated by non-aqueous phase liquids / C. Aggelopoulos et al // Chemical Engineering Journal. – 2015. – Vol. 270. – P. 428-436. https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.02.056.
11. Effects of cold plasma on volatile organic compounds in foods: fundamentals, mechanisms, and applications / J. Cheng et al // Food Chemistry. – 2025. – Vol. 503, Article № 147740. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.147740.
12. Optimizing cold plasma technology for pesticide and microbial safety enhancement of fresh okra (Abelmoschus esculentus) / A. Chandel et al // Journal of Stored Products Research. – 2025. – Vol. 115, Article № 102862. https://doi.org/10.1016/j.jspr.2025.102862.

13. Harnessing cold plasma for sustainable extraction of bioactive compounds: a critical review of mechanisms and applications / S.A. Banihashemi et al // Future Foods. – 2026. – Article № 100907. https://doi.org/10.1016/j.fufo.2026.100907.
14. Non-thermal plasma technology for organic contaminated soil remediation: A review / H. Zhang et al // Chemical Engineering Journal. – 2016. – Vol. 313. – P. 157-170. https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.12.067.
15. Novel combination of high voltage nanopulses and in-soil generated plasma micro-discharges applied for the highly efficient degradation of trifluralin / M. Hatzisymeon et al // Journal of Hazardous Materials. – 2021. – Vol. 415, Article № 125646. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125646.
16. The effects of Plasma-Activated water on heavy metals accumulation in water spinach / C. Hou et al // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11, № 11, Article № 5304. https://doi.org/10.3390/app11115304.
17. Enhanced biomass and cadmium accumulation by three cadmium-tolerant plant species following cold plasma seed treatment / L. Zhao et al // Journal of Environmental Management. – 2021. – Vol. 296, Article № 113212. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113212.
18. Study of plasma activated water effect on heavy metal bioaccumulation by Cannabis sativa Using Laser-Induced Breakdown Spectroscopy / L. Čechová et al // Ecotoxicology and Environmental Safety. – 2024. – Vol. 283, Article № 116807. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116807.
19. Transport characteristics of gas phase ozone in soil during soil remediation by pulsed discharge plasma / T.C. Wang et al // Vacuum. – 2013. – Vol. 101. – P. 86-91. https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2013.07.020.
20. Evaluation of the Potential of Pentachlorophenol Degradation in Soil by Pulsed Corona Discharge Plasma from Soil Characteristics / T.C. Wang et al // Environmental Science & Technology. – 2010. – Vol. 44, № 8. – P. 3105-3110. https://doi.org/10.1021/es903527w.
21. Gasoline degradation and nitrogen fixation in soil by pulsed corona discharge plasma / J. Zhan et al // Science of the Total Environment. – 2019. – Vol. 661. – P. 266-275. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.183.
22. Harnessing the power of nonthermal Plasma: A breakthrough in stabilizing Thallium contaminants in soil and unveiling the mechanism / T. Huang et al // Chemical Engineering Journal. – 2024. – Vol. 486, Article № 150250. https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.150250.
23. Remediation of ciprofloxacin-contaminated soil by nanosecond pulsed dielectric barrier discharge plasma: Influencing factors and degradation mechanisms / C.A. Aggelopoulos et al // Chemical Engineering Journal. – 2020. – Vol. 393, Article № 124768. https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124768.

Финансирование. *Данное исследование было профинансировано Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (№ BR28712925, «Исследование и создание холодноплазменных технологий для комплексной реабилитации экосистем»).*

Ұ.Е. Жантикеев*, Л.Н. Сеймуханова, Д.Р. Мулдаш, Ш.Т. Султахан, М. Тоқтар
Satbayev University, 050043, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Сәтбаев к-сі, 22
*e-mail: nurlybekov.ulan@gmail.com

СУЫҚ ПЛАЗМАНЫҢ ТОПЫРАҚ ҚАСИЕТТЕРІНЕ ЖӘНЕ ЛАСТАНҒАН ТОПЫРАҚТАРДЫ РЕМЕДИАЦИЯЛАУҒА ӘСЕРІ: ШОЛУ

Аңдатпа: *Шолуда органикалық қосылыстармен және ауыр металдармен ластанған топырақтарды ремедиациялау үшін суық (термиялық емес) плазманы қолдану жөніндегі заманауи зерттеулер жүйеленді. Плазмалық разрядтарда оттегі мен азоттың белсенді түрлерінің түзілу механизмдері, олардың кеуекті топырақ ортасында тасымалдануы және органикалық ластағыштардың тотығу деструкциясына, pH пен тотығу-тотықсыздану потенциалының өзгеруіне, сондай-ақ бейорганикалық компоненттердің химиялық формаларының трансформациясына қатысуы қарастырылды. Диэлектрлік тосқауылдық және тәждік разрядтар, тікелей және қашықтан әсер ету тәсілдері разряд параметрлерін, топырақтың ылғалдылығы мен қасиеттерін, ластағыштың табиғаты мен концентрациясын, өңдеу ұзақтығын және*

энергетикалық сипаттамаларды ескере отырып салыстырылды. Зертханалық зерттеулерде жекелеген органикалық ластағыштардың деструкция дәрежесі 85-99 %-ға жететіні көрсетілді, алайда бастапқы қосылыс концентрациясының төмендеуі әрқашан оның минералдану дәрежесіне сәйкес келе бермейді. Сондықтан ремедиация тиімділігін қалдық концентрация, жалпы органикалық көміртек, трансформация өнімдері және энергетикалық шығындар бойынша бағалау қажет. Ауыр металдар үшін плазмалық әсер элементтің деструкциясы немесе жойылуымен емес, негізінен оның химиялық формаларының, қозғалғыштығының, шайылғыштығының және биожетімділігінің өзгеруімен байланысты. Әсер ету тәсіліне қарай металдардың иммобилизациясы да, олардың өсімдіктерге қолжетімділігінің өзгеруі де мүмкін. Суық плазмамен өңдеудің тиімділігі белсенді бөлшектердің ену тереңдігімен және топырақ ортасының біртекті еместігімен шектелетіні анықталды. Суық плазманың беткі және жер бетіне жақын ремедиацияның интеграцияланған технологияларының құрамдас бөлігі ретінде перспективалы екені және тиімділік пен энергия тұтыну критерийлерін стандарттау қажеттілігі туралы қорытынды жасалды.

Түйін сөздер: *суық плазма, топырақ, ремедиация, органикалық ластағыштар, ауыр металдар.*

U.Ye. Zhantikeyev*, L.N. Seimukhanova, D.R. Muldash, Sh.T. Sultakhan, M. Toktar
Satbayev University, 050043, Republic of Kazakhstan, Almaty, Satpayev str., 22
*e-mail: nurlybekov.ulan@gmail.com

IMPACT OF COLD PLASMA ON SOIL PROPERTIES AND REMEDIATION OF CONTAMINATED SOILS: A REVIEW

Abstract: *This review systematizes recent studies on the application of cold non-thermal plasma for the remediation of soils contaminated with organic compounds and heavy metals. The mechanisms of reactive oxygen and nitrogen species formation in plasma discharges, their transport through porous soil media, and their involvement in oxidative degradation of organic pollutants, changes in pH and redox potential, and transformation of the chemical forms of inorganic components are considered. Dielectric barrier and corona discharges, as well as direct and remote treatment modes, are compared with regard to discharge parameters, soil moisture and properties, pollutant type and concentration, treatment duration, and energy characteristics. Laboratory studies show that the degradation efficiency of individual organic pollutants can reach 85–99%; however, a decrease in the concentration of the parent compound does not necessarily correspond to the degree of mineralization. Therefore, remediation efficiency should be assessed using residual pollutant concentration, total organic carbon, transformation products, and energy consumption. For heavy metals, plasma treatment is associated primarily with changes in chemical forms, mobility, leachability, and bioavailability rather than with destruction or removal of the element. Depending on the treatment mode, both metal immobilization and changes in plant availability may occur. The effectiveness of cold-plasma treatment is limited by the penetration depth of reactive species and the heterogeneity of the soil matrix. It is concluded that cold plasma is promising as a component of integrated technologies for surface and near-surface soil remediation and that standardization of efficiency and energy-consumption criteria is required.*

Key words: *cold plasma, soil, remediation, organic pollutants, heavy metals.*

Сведения об авторах

Улан Ержанулы Жантикеев* – магистр технических наук, старший научный сотрудник Лаборатории инженерного профиля, Satbayev University, Алматы, Казахстан; e-mail: nurlybekov.ulan@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1200-2340.

Лаура Нурлановна Сеймуханова – магистр технических наук, научный сотрудник Лаборатории инженерного профиля, Satbayev University, Алматы, Казахстан; e-mail: lauraseimuhanova@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0009-0002-1438-6568.

Диас Рустемулы Мулдаш – магистр технических наук, научный сотрудник Лаборатории инженерного профиля, Satbayev University, Алматы, Казахстан; e-mail: muldashevdias@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-2883-261X.

Шынгысхан Темирханулы Султахан – магистр технических наук, старший научный сотрудник Лаборатории инжинерного профиля, Satbayev University, Алматы, Казахстан, e-mail: shynggyskhan.1@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2195-755X.

Мурат Токтар – PhD, ассоциированный профессор, преподаватель, Satbayev University, Алматы, Казахстан; e-mail: m.toktar@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0953-7491.

Авторлар туралы мәліметтер

Ұлан Ержанұлы Жантикеев* – техника ғылымдарының магистрі, инженерлік бейіндегі зертханасының аға ғылыми қызметкері, Satbayev University, Алматы, Қазақстан; e-mail: nurlybekov.ulan@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1200-2340.

Лаура Нұрланқызы Сеймуханова – техника ғылымдарының магистрі, инженерлік бейіндегі зертханасының ғылыми қызметкері, Satbayev University, Алматы, Қазақстан; e-mail: lauraseimuhanova@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-1438-6568.

Диас Рустемұлы Мулдаш – техника ғылымдарының магистрі, инженерлік бейіндегі зертханасының ғылыми қызметкері, Satbayev University, Алматы, Қазақстан; e-mail: muldashevdias@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-2883-261X.

Шыңғысхан Темірханұлы Султахан – техника ғылымдарының магистрі, инженерлік бейіндегі зертханасының ғылыми қызметкері, Satbayev University, Алматы, Қазақстан; e-mail: Shynggyskhan.1@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2195-755X.

Мұрат Тоқтар – PhD, қауымдастырылған профессор, оқытушы, Satbayev University, Алматы, Қазақстан; e-mail: m.toktar@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0953-7491.

Information about the authors

Ulan Yerzhanuly Zhantikeyev* – Master of Technical Sciences, Senior Researcher at the Engineering Profile Laboratory, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: nurlybekov.ulan@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1200-2340.

Laura Nurlanovna Seimukhanova – Master of Technical Sciences, Researcher at the Engineering Profile Laboratory, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: lauraseimuhanova@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-1438-6568.

Dias Rustemuly Muldash – Master of Technical Sciences, Researcher at the Engineering Profile Laboratory, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: muldashevdias@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-2883-261X.

Shynggyskhan Temirkhanuly Sultakhan – Master of Technical Sciences, Senior Researcher at the Engineering Profile Laboratory, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: Shynggyskhan.1@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2195-755X.

Murat Toktar – PhD, Associate Professor, Lecturer, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: m.toktar@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0953-7491.

Поступила в редакцию 02.06.2026
Поступила после доработки 04.09.2026
Принята к публикации 11.09.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-94

МРНТИ: 58.91.41; 29.36.21

CC BY 4.0
Check for updates

Ю.Ю. Бакланова*, В.В. Яковлев, О.С. Букина, В.В. Бакланов
Институт атомной энергии РГП НЯЦ РК
180010, Республика Казахстан, г. Курчатов, ул. Бейбіт Атом, 10
*e-mail: basalai@nnc.kz

ИММОБИЛИЗАЦИЯ ЖИДКИХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ В БИТУМНОЙ МАТРИЦЕ

Аннотация: *В статье представлен комплексный аналитический обзор современных научно-технических подходов к кондиционированию и иммобилизации жидких радиоактивных отходов (ЖРО) низкого и среднего уровней активности методом битумирования. Авторами подробно описаны служебные преимущества и макрокинетические ограничения использования гетерогенных углеводородных матриц, а также сформулированы строгие нормативные требования к физико-химическим свойствам компаундов и солевому составу фиксируемых технологических флюидов. Проведен детальный сопоставительный анализ фракционного состава различных марок промышленных битумов, включая продукцию ТОО «Павлодарский нефтехимический завод». В работе систематизированы параметры периодического и непрерывного экструзионного процессов. Проанализированы ключевые внутренние факторы, определяющие предел соленаполнения, динамическую вязкость смесей, их радиационную стойкость, термостабильность и долговременную гидрофобность в условиях контакта с подземными водами. Показана необходимость предварительного исследования фазового состава ЖРО и оценки их совместимости с битумом для предотвращения экзотермических реакций. Рассмотрены требования к условиям безопасного промежуточного хранения и последующего*

©Ю.Ю. Бакланова, В.В. Яковлев, О.С. Букина, В.В. Бакланов, 2026

обращения с битумированными отходами. Отмечено, что при выборе оптимальной технологии отверждения необходимо учитывать пожароопасность матрицы, радиационно-индуцированные изменения ее свойств (эффекты радиолиза) и риски долгосрочной биодеградации. Научная ценность работы заключается в формировании обоснованных рекомендаций по ограниченному применению метода битумирования в рамках реализации программы развития атомной энергетики в Республике Казахстан.

Ключевые слова: *жидкие радиоактивные отходы, битумирование, иммобилизация, битумная матрица, соленаполнение, радиационная стойкость, радиолиз, кондиционирование РАО.*

Введение

Битумирование относится к методам кондиционирования преимущественно жидких и влажных высокосолевых радиоактивных отходов. Метод основан на включении сухого остатка отходов в битум — высокомолекулярную смесь углеводородов, получаемую главным образом после удаления легких фракций из нефти. Отверждение ЖРО низкого и среднего уровней активности осуществляют путем смешения отходов с расплавленным битумом и термического обезвоживания полученной смеси.

Промышленное применение метода началось в 1960-х годах: первая полномасштабная установка была введена в эксплуатацию в Бельгии в 1964 году. В дальнейшем битумирование применялось в ряде европейских стран и в Советском Союзе.

К преимуществам метода относят сравнительно простое аппаратурное оформление, доступность матричного материала, относительно невысокую температуру процесса, совместимость битума с отходами различного состава и возможность значительного включения растворимых солей. Битумированные продукты характеризуются водостойкостью, а объем конечного продукта в определенных режимах может не превышать объем исходных ЖРО. Вместе с тем горючесть битума, вероятность экзотермического взаимодействия с отдельными компонентами отходов и изменение свойств матрицы со временем ограничивают область применения технологии.

Цель работы – систематизация условий и технологических факторов, определяющих возможность иммобилизации ЖРО в битумной матрице, а также рассмотрение ограничений метода с точки зрения безопасного хранения и дальнейшего обращения с битумированными отходами.

Материалы и методы анализа

Рассмотрение технологии основано на анализе физико-химических характеристик битумов, требований к составу ЖРО и описанных в литературе особенностей битумирования. В исходном материале приведены сравнительные характеристики марок БНК-2, БН-1, БНД 60/90, БНД 40/60, БН-3 и БН-4, включая фракционный состав, температуру размягчения и вспышки, пенетрацию и потерю массы при нагревании. Отмечено, что указанным характеристикам соответствует битум марки БНД 60/90 производства ТОО «Павлодарский нефтехимический завод».

При выборе марки битума и технологического режима учитывают совместимость отходов с матричным материалом, допустимую степень включения сухого остатка, вязкость смеси, условия обезвоживания, удержание радионуклидов и свойства продукта, необходимые для транспортирования, хранения и возможного захоронения.

В качестве основных факторов рассматриваются радиационная стойкость битума; температура процесса и вязкость; содержание и природа солевого наполнителя; кислотность и химический состав отходов; возможное газообразование, пенообразование и протекание экзотермических реакций; влияние добавок на свойства компаунда. В исходном тексте не приведены составы конкретных экспериментальных партий, количество испытаний, примененные измерительные методики и индивидуальные протоколы измерений, поэтому эти параметры в статье не конкретизируются.

Основная часть

Основные характеристики и ограничения метода битумирования

Битумирование представляет собой процесс включения преимущественно жидких или «влажных» высокосолевых радиоактивных отходов (РАО) в битумные материалы, представляющие собой высокомолекулярные смеси углеводородов, получаемые главным образом после отгонки легких фракций из природной нефти. Отверждение ЖРО низкого и среднего уровней активности проводят путем их смешения с расплавленным битумом и термического обезвоживания полученной смеси [1].

Первая полномасштабная установка битумирования была введена в эксплуатацию в Бельгии в 1964 году. В дальнейшем технология получила широкое применение во Франции, Германии, Финляндии, Советском Союзе, Чехословакии и других странах.

К достоинствам битумирования относятся простота аппаратурного оформления, относительная доступность матричного материала, невысокая температура процесса, совместимость битума с отходами различного состава и возможность сокращения объема конечного продукта переработки. Существенными преимуществами являются высокая водостойкость и значительная степень включения растворимых солей (до 50 % масс.). Кроме того, при определенных режимах битумирования объем отвержденных отходов может не увеличиваться по сравнению с объемом исходных ЖРО. Основные ограничения метода связаны с горючестью матричного материала, возможностью его экзотермического взаимодействия с отдельными компонентами отходов при повышенной температуре, а также изменением свойств битума с течением времени.

При битумировании РАО важными характеристиками битума являются фракционный состав, пенетрация, температура размягчения и вспышки, вязкость, плотность, потеря массы при нагревании, адгезия и радиационная стойкость [2].

При включении РАО в битум матрица должна сохранять требуемые свойства в составе конечного продукта, что ограничивает допустимое количество отходов на единицу объема получаемого компаунда. Ограничения относятся прежде всего к общему содержанию твердых веществ, содержанию нитратов, удельной активности, тепловыделению и выщелачиванию радионуклидов. Существенное значение имеют радиационные эффекты, обусловленные присутствующими радионуклидами, поскольку битум представляет собой высокомолекулярную смесь углеводородов, способную подвергаться радиолизу. При облучении протекают радиолиз углеводородов с образованием продуктов разложения, химические реакции компонентов битума и содержащихся в нем веществ с радикалами, образующимися при облучении, а также процессы окисления битума. Различные виды битума характеризуются неодинаковой радиационной стойкостью.

Установлено, что с увеличением степени окисления битума скорость образования радиолитических продуктов снижается. Одновременно с образованием газообразных радиолитических продуктов происходят окисление и частичная полимеризация. Интенсивность этих процессов возрастает с увеличением содержания ненасыщенных углеводородов в битуме. Битум можно безопасно использовать до тех пор, пока общая доза за время захоронения не превысит 10^7 Гр. При дозе 10^8 Гр и выше существенно изменяются структура материала и соотношение С/Н, а также образуются газовые пузырьки, что может привести к увеличению объема матрицы на 14-30%. При использовании герметичных упаковок и накоплении газов (водорода и метана) возможно повышение давления внутри упаковок с битумированными РАО. Это, в свою очередь, потенциально может привести к деформации или разрушению упаковок, утечке радионуклидов в окружающую среду и пожару, создавая риск нарушения долговременной целостности хранилища [3].

Для иммобилизации РАО, в том числе жидких, используются марки битумов, приведенные в таблице 1.

Как видно из таблицы 1, указанным требованиям соответствует битум марки БНД 60/90, производимый ТОО «Павлодарский нефтехимический завод».

Для получения качественной битумной матрицы выбирают подходящую марку битума. Перед отверждением жидких радиоактивных отходов проводят лабораторные исследования физико-химического состава РАО и их взаимодействия с битумом для определения:

- совместимости отходов с битумным материалом;
- оптимальных границ включения отходов;
- технологических параметров процесса битумирования;
- конечных свойств получаемого компаунда с учетом условий его хранения, транспортирования и возможности окончательного захоронения.

При сложном составе битума и РАО между их компонентами могут протекать различные взаимодействия, влияющие на состав смеси в процессе перемешивания и свойства конечного продукта. Например, нитрат натрия связывается с битумом слабыми сорбционными взаимодействиями, тогда как нитраты тяжелых металлов могут вступать с битумом в химическое взаимодействие окислительного характера. В отдельных случаях

такое взаимодействие может сопровождаться экзотермическим эффектом, пенообразованием, газовыделением и воспламенением смеси. Связь битума с соединениями многовалентных металлов может также иметь адсорбционный характер, причем такая связь прочнее, чем у соединений щелочных элементов.

Таблица 1 – Физико-химические и структурные характеристики промышленных марок битумов

Наименование контролируемого показателя	БНК-2	БН-1	БНД 60/90	БНД 40/60	БН-3	БН-4
1. Фракционный состав, масс. %:						
– масляная фракция (суммарно)	67,6	55,2	59,8	56,4	55,0	49,0
в т.ч. парафино-нафтеновые углеводороды	22,5	22,6	23,8	28,6	–	15,8
в т.ч. моноциклические ароматические	7,0	5,0	13,6	8,6	–	8,3
в т.ч. полициклические ароматические	38,1	24,6	21,6	19,2	–	24,9
– смолы нефтяные	21,5	21,3	22,2	23,4	26,0	20,1
– асфальтены	10,6	20,7	19,0	19,2	16,0	27,9
2. Температура размягчения (КиШ), °С	38,0	44,0	47,0	53,0	49,0	67,5
3. Температура вспышки в открытом тигле, °С	240,0	180,0	200,0	200,0	200,0	230,0
4. Глубина проникания иглы (пенетрация) при 25 °С, 0,1 мм	183,0	130,0	66,0	42,0	54,0	23,0
5. Потеря массы при нагреве до 160 °С за 5 ч, масс. %	1,0	1,0	–	–	1,0	1,0
2. Температура размягчения (КиШ), °С	38,0	44,0	47,0	53,0	49,0	67,5

К процессу битумирования РАО предъявляются следующие требования, которые необходимо учитывать при выборе технологического режима:

– включение ЖРО целесообразно проводить при температуре, обеспечивающей практически полное обезвоживание при минимальном улетучивании радионуклидов и масляных компонентов битума;

– вязкость битума должна обеспечивать эффективное смешение с компонентами отходов и полное удаление конечной смеси из аппарата;

– конечный продукт должен содержать максимально возможное количество сухого остатка отходов (соленаполнение) и одновременно обладать свойствами, обеспечивающими эффективное удержание отходов и стойкость к выщелачиванию.

Для обеспечения безопасного долговременного хранения и возможности захоронения битумированных РАО необходимо учитывать следующие граничные условия.

Радиационная стойкость. Для снижения радиационных повреждений битумной матрицы общая доза ее облучения не должна превышать 10^7 Гр. Поэтому для битумирования пригодны РАО низкого и среднего уровней активности после таких предварительных процессов, как фильтрование, осаждение, ионный обмен, сжигание и упаривание, а именно шламы, зола, отработавшие ионообменные смолы, пульпы и концентраты.

Температура процесса и вязкость. Для обеспечения обезвоживания смеси температура технологического процесса не должна быть ниже температуры кипения раствора. Например, при включении в битум нитрата натрия температура должна быть не ниже 120 °С. Для эффективного смешения с наполнителем (РАО) и возможности слива битумной массы из аппарата необходимо поддерживать оптимальное значение вязкости. Для битумов обычно оптимальная температура процесса битумирования составляет 130-140 °С, когда битум находится в жидком состоянии.

Вязкость и соленаполнение. Вязкость в значительной степени изменяется при увеличении доли наполнителя (РАО) и ограничивает количество включаемого сухого остатка отходов. Конечный продукт с достаточно высокой степенью закрепления радионуклидов (скорость выщелачивания радионуклидов при хранении в контакте с водой 10^{-4}-10^{-5} г/(см²·сут)) может быть получен при включении в битум не более 40-50 % обезвоженных солей. Предельные величины включения зависят от состава отходов.

Степень включения в битум гигроскопических соединений ограничивается: для ионообменных смол – не более 20-30%, для кристаллогидратов (например, тетрабората натрия) – не более 20%. Фильтрующие материалы типа перлита и датолита при включении в битум в количестве более 10 % приводят к его структурированию (затвердеванию). Однако

общую степень включения в битум можно увеличить до 70% введением в смесь солевого наполнителя, например нитрата или сульфата натрия. При этом введение нитрата натрия в количестве более 20% приводит к заметному увеличению вязкости и температуры размягчения.

Не рекомендуется подвергать битумированию кислые растворы с высоким содержанием нитратов железа и алюминия, которые могут окислять битум и изменять его термопластические свойства. При битумировании сильнощелочных растворов со значением pH > 12 может происходить омыление органических соединений, входящих в состав битума, что снижает его водоустойчивость. Наиболее благоприятным является битумирование нейтральных и щелочных отходов с pH < 12. При битумировании отходов со значением pH около 11 увеличиваются биоцидные свойства битумированных отходов, что важно для предупреждения микробиологических повреждений при некоторых вариантах захоронения отходов.

Применение добавок широко используется при битумировании отходов для увеличения степени их включения в битумный компаунд, оптимизации технологического процесса, повышения качества отвержденного продукта и, соответственно, надежности долговременного захоронения. Например, прочное удержание трибутилфосфата (ТБФ) достигается с использованием добавок глины или ПВА; добавление таких компонентов снижает выщелачивание цезия на 2-3 порядка [4].

Технология реализации

Технологический процесс битумирования ЖРО может быть периодическим или непрерывным. В периодическом процессе в аппарат с внутренними или внешними электронагревателями подают порцию битума, затем в горячий битум (температура не выше 220°С) при постоянном перемешивании подают порцию ЖРО в виде кубовых остатков, пульп или шламов.

В аппарате-битуматоре происходит испарение воды из ЖРО, а твердый остаток распределяется в битумной массе. После достижения заданной степени наполнения РАО битумно-солевой компаунд подают в узел расфасовки и затем сливают в упаковки. В качестве упаковок, пригодных для транспортирования и хранения, используют стальные бочки и контейнеры; при необходимости для захоронения упаковки помещают в невозвратные железобетонные контейнеры. В схему технологического процесса может быть включена стадия предварительной подготовки ЖРО, позволяющая увеличить производительность аппарата битумирования. Установка битумирования оснащается системой очистки конденсата, выделяющихся газов и аэрозолей (рис. 1).

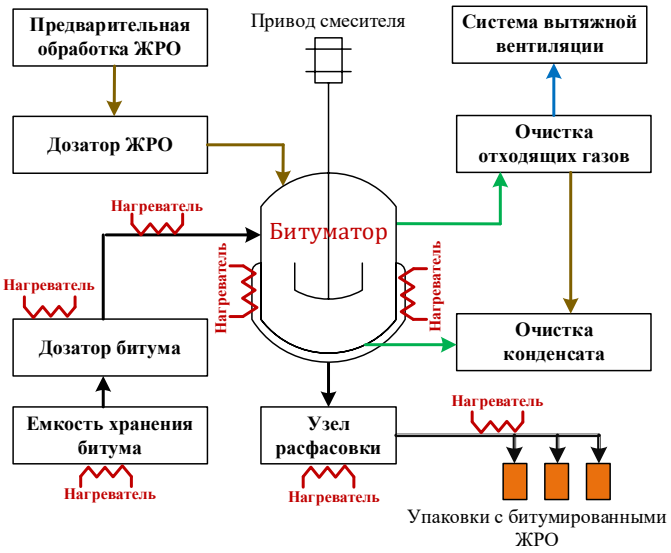


Рисунок 1 – Схема периодического процесса битумирования

При непрерывном процессе подача битума и ЖРО осуществляется в экструдер, где происходят перемешивание, обезвоживание и дегазация с последующей подачей битумированных ЖРО в узел расфасовки.

Обсуждение результатов

Приведенные сведения показывают, что битумирование нельзя рассматривать как универсальный способ обращения со всеми видами ЖРО. Возможность его применения определяется не только уровнем активности отходов, но и их солевым, химическим и радионуклидным составом, а также характеристиками выбранной марки битума [5].

Особое внимание следует уделять радиационным и пожарным рискам. Радиолиз может приводить к образованию газов и изменению структуры матрицы, а реакции отдельных компонентов отходов с битумом – к тепловыделению и газообразованию. Эти процессы имеют значение для целостности упаковок и долговременной безопасности хранения. В статье также отмечена возможность микробиологического воздействия на битум после снижения уровня излучения; радиационно измененные органические фрагменты могут становиться более доступными для микроорганизмов.

С технологической точки зрения компромисс между высоким соленаполнением и приемлемой вязкостью является одним из ключевых условий процесса. Повышение содержания отходов может уменьшать количество матричного материала, но одновременно ухудшать смешение, выгрузку и свойства конечного продукта [8-10]. Поэтому предельные значения наполнения следует рассматривать с учетом конкретного состава ЖРО, а не как универсальные нормативы.

Опыт применения битумирования, изложенный в исходной статье, свидетельствует о постепенном сокращении его использования на ряде новых объектов в пользу других методов, в частности цементирования с предварительной селективной сорбцией и глубоким упариванием. При этом битумирование может сохранять практическую значимость на объектах с действующими установками или при необходимости перевода накопленных жидких отходов в твердое состояние для промежуточного хранения, если альтернативные технологии еще не внедрены либо недоступны.

Заключение

Метод битумирования жидких радиоактивных отходов имеет ограниченную область применения и может использоваться для кондиционирования низко- и среднеактивных РАО (НАО и САО), содержащих продукты деления с относительно короткими и средними периодами полураспада. К основным изотопам-маркерам относятся ^{137}Cs и ^{90}Sr.

Применение технологии направлено на удержание радионуклидов в течение расчетного периода стабильности углеводородной матрицы (до 30-50 лет), за который интегральная активность отходов снижается до безопасных пределов. По истечении данного периода битумированные компаунды, согласно изложенному в исходном материале подходу, подлежат извлечению и повторному кондиционированию (переконсервации).

В ходе долгосрочного хранения возможно радиационно-индуцированное микробиологическое воздействие на битумную матрицу. В начальный период высокая мощность поглощенной дозы бета- и гамма-излучения обеспечивает выраженный стерилизующий эффект, ингибируя жизнедеятельность микрофлоры на поверхности компаунда. Со временем радиолиз может приводить к деструкции высокомолекулярных цепей битума с образованием газов и низкомолекулярных органических кислот. При снижении удельной активности РАО ниже критического порога выживания микроорганизмов естественная микрофлора хранилищ может колонизировать матрицу, а радиационно измененные фрагменты могут служить более доступными субстратами, что потенциально ускоряет деструкцию защитного барьера.

Несмотря на масштабное внедрение технологии в 1970-1980-х годах, современные международные тенденции характеризуются сокращением применения битумирования в пользу методов низкотемпературного цементирования, сопряженного с предварительной селективной сорбцией цезия/стронция и глубоким упариванием кубовых остатков. Одной из причин такого подхода являются требования к пожаровзрывобезопасности объектов хранения и захоронения.

Опыт зарубежных стран позволяет сделать вывод, что в условиях модернизации радиохимического производства в Республике Казахстан битумирование может быть ограниченно использовано при обязательном проведении предварительных лабораторных исследований совместимости отходов с битумами. Такой подход может быть рассмотрен в случаях, когда на конкретном ядерном объекте уже функционирует промышленная установка битумирования, текущие объемы накопления ЖРО требуют их иммобилизации для

обеспечения промежуточной безопасности либо современные технологии (включение в геополимеры, полиэфирные смолы или витрификация) еще не внедрены в промышленную эксплуатацию или экономически недоступны на текущем этапе.

Список литературы

1. Милютин В.В. Современные методы переработки жидких радиоактивных отходов / В.В. Милютин, П.В. Козлов, Н.А. Некрасова. – 2-е изд. – Озерск; Москва: Озерский технологический институт – филиал НИЯУ «МИФИ», 2021. – 172 с.
2. Захарова К.П. Битумирование жидких радиоактивных отходов: оценка безопасности и опыт эксплуатации / К.П. Захарова, О.Л. Масанов // Атомная энергия. – 2000. – Т. 89, вып. 2. – С. 112-119.
3. Radiolysis of bituminized radioactive waste: a comprehensive review / L. Millot et al // EPJ Nuclear Sci. Technol. – 2024. – Vol. 10, Art. 4. https://doi.org/10.1051/epjn/2024004.
4. Технологические и организационные аспекты обращения с радиоактивными отходами. – Вена: Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ), 2005. – 114 с. – (IAEA-TCS-27).
5. Извлечение твердых радиоактивных отходов из хранилищ при их консервации способом битумирования: монография / Н.В. Чегонов и др. – Москва: Радиохимия-издат, 2023. – 156 с.
6. Анализ радиационной и биологической стойкости матричных материалов, применяемых при кондиционировании низко- и среднеактивных отходов / Е.Т. Коянбаев и др. // Вестник НЯЦ РК. – 2023. – № 2. – С. 45-52. https://doi.org/10.52676/1729-7885-2023-2-45-52.
7. Оценка гидрофобных и структурных изменений битумированных компаундов при длительном промежуточном хранении / В.В. Бакланов и др. // Комплексное использование минерального сырья. – 2024. – № 4(331). – С. 18-25. https://doi.org/10.31643/2024/6445.42.
8. IAEA. Option Assessment for Decommissioning and Legacy Waste Management of Bitumen-Containing Disposal Facilities / International Atomic Energy Agency. – Vienna: IAEA, 2025. – 88 p. – (IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-1.30).
9. Stefanovsky S.V. Long-term performance and radiation stability of polymeric and bituminous matrices for intermediate-level waste immobilization / S.V. Stefanovsky, O.I. Stefanovsky // Journal of Nuclear Materials. – 2024. – Vol. 588, Art. 154802. https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2023.154802.
10. Ju F. Comparative study on the leaching kinetics of cesium and strontium from cementitious and asphaltic waste forms / F. Ju, M.T. Ngulimi, J. Wang // Progress in Nuclear Energy. – 2025. – Vol. 179, Art. 105411. https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2024.105411.

References

1. Milyutin V.V. Sovremennye metody pererabotki zhidkikh radioaktivnykh otkhodov / V.V. Milyutin, P.V. Kozlov, N.A. Nekrasova. – 2-e izd. – Ozersk; Moskva: Ozerskii tekhnologicheskii institut – filial NIYAU «MIFI», 2021. – 172 s. (in Russian).
2. Zakharova K.P. Bitumirovanie zhidkikh radioaktivnykh otkhodov: otsenka bezopasnosti i opyt ehkspluatatsii / K.P. Zakharova, O.L. Masanov // Atomnaya ehnergiya. – 2000. – T. 89, vyp. 2. – S. 112-119. (in Russian).
3. Radiolysis of bituminized radioactive waste: a comprehensive review / L. Millot et al // EPJ Nuclear Sci. Technol. – 2024. – Vol. 10, Art. 4. https://doi.org/10.1051/epjn/2024004. (in English).
4. Tekhnologicheskie i organizatsionnye aspekty obrashcheniya s radioaktivnymi otkhodami. – Vena: Mezhdunarodnoe agentstvo po atomnoi ehnergii (MAGATEh), 2005. – 114 s. – (IAEA-TCS-27). (in Russian).
5. Izvlechenie tverdykh radioaktivnykh otkhodov iz khranilishch pri ikh konservatsii sposobom bitumirovaniya: monografiya / N.V. Chegonov i dr. – Moskva: Radiokhimiya-izdat, 2023. – 156 s. (in Russian).
6. Analiz radiatsionnoi i biologicheskoi stoikosti matrichnykh materialov, primenyaemykh pri konditsionirovanii nizko- i sredneaktivnykh otkhodov / E.T. Koyanbaev i dr. // Vestnik NYATs RK. – 2023. – № 2. – S. 45-52. https://doi.org/10.52676/1729-7885-2023-2-45-52. (in Russian).
7. Otsenka gidrofobnykh i strukturnykh izmenenii bitumirovannykh kompaundov pri dlitel'nom promezhutochnom khranenii / V.V. Baklanov i dr. // Kompleksnoe ispol'zovanie mineral'nogo syr'ya. – 2024. – № 4(331). – S. 18-25. https://doi.org/10.31643/2024/6445.42. (in Russian).

8. IAEA. Option Assessment for Decommissioning and Legacy Waste Management of Bitumen-Containing Disposal Facilities / International Atomic Energy Agency. – Vienna: IAEA, 2025. – 88 p. – (IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-1.30). (in English).
9. Stefanovsky S.V. Long-term performance and radiation stability of polymeric and bituminous matrices for intermediate-level waste immobilization / S.V. Stefanovsky, O.I. Stefanovsky // Journal of Nuclear Materials. – 2024. – Vol. 588, Art. 154802. https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2023.154802. (in English).
10. Ju F. Comparative study on the leaching kinetics of cesium and strontium from cementitious and asphaltic waste forms / F. Ju, M.T. Ngulimi, J. Wang // Progress in Nuclear Energy. – 2025. – Vol. 179, Art. 105411. https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2024.105411. (in English).

Финансирование

Работа проводилась при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках ИРН BR24993140 «НИР по обоснованию выбора и реализации технологии переработки жидких радиоактивных отходов».

Ю.Ю. Бакланова*, В.В. Яковлев, О.С. Букина, В.В. Бакланов
ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы,
180010, Қазақстан Республикасы, Курчатов қ., Бейбіт Атом көш., 10
*e-mail: basalai@nnc.kz

СҰЙЫҚ РАДИОАКТИВТІ ҚАЛДЫҚТАРДЫ БИТУМ МАТРИЦАСЫНДА ИММОБИЛИЗАЦИЯЛАУ

Мақалада битумдау әдісімен төмен және орташа деңгейдегі сұйық радиоактивті қалдықтарды (СРҚ) кондициялау мен иммобилизациялаудың заманауи ғылыми-техникалық тәсілдеріне кешенді талдау шолуы берілген. Авторлар гетерогенді көмірсутекті байланыстырғыш матрицаларды пайдаланудың пайдалану артықшылықтары мен макрокинетикалық шектеулерін егжей-тегжейлі сипаттаған, сондай-ақ қосылыстардың физика-химиялық қасиеттеріне және бекітілетін технологиялық флюидтердің тұз құрамына қойылатын қатаң нормативтік талаптарды тұжырымдаған. Өнеркәсіптік битумдардың әртүрлі маркаларының, соның ішінде «Павлодар мұнай-химия зауыты» ЖШС өнімдерінің фракциялық құрамына егжей-тегжейлі салыстырмалы талдау жүргізілді. Жұмыста мерзімді және үздіксіз экструзиялық процестердің параметрлері жүйеленген. Тұзбен толтырылу шегін, қоспалардың динамикалық тұтқырлығын, олардың радиациялық төзімділігін, термотұрақтылығын және жер асты суларымен жанасу жағдайында ұзақ мерзімді гидрофобтылығын анықтайтын негізгі ішкі факторлар талданды. Экзотермиялық реакциялардың алдын алу үшін СРҚ фазалық құрамын алдын ала зерттеу және олардың битуммен үйлесімділігін бағалау қажеттілігі көрсетілген. Битумдалған қалдықтарды қауіпсіз аралық сақтау және кейіннен өңдеу жағдайларына қойылатын талаптар қарастырылған. Оңтайлы қатыру технологиясын таңдау кезінде матрицаның өрт қауіптілігін, оның қасиеттерінің радиация әсерінен өзгеруін (радиолиз әсерлері) және ұзақ мерзімді биодеградация тәуекелдерін ескеру қажеттігі атап өтілген. Жұмыстың ғылыми құндылығы Қазақстан Республикасында атом энергетикасын дамыту бағдарламасын іске асыру шеңберінде битумдау әдісін шектеулі қолдану бойынша негізделген ұсынымдарды қалыптастыруда болып табылады.

Түйін сөздер: *сұйық радиоактивті қалдықтар, битумдау, иммобилизациялау, битум матрицасы, тұзбен толтырылу, радиациялық төзімділік, радиолиз, радиоактивті қалдықтарды кондиционерлеу.*

Yu.Yu. Baklanova*, V.V. Yakovlev, O.S. Bukina, V.V. Baklanov
Branch «Institute of Atomic Energy» of the RSE «National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan»,
10, Beibit Atom Str., 180010, Kurchatov, Republic of Kazakhstan
*e-mail: basalai@nnc.kz

IMMOBILIZATION OF LIQUID RADIOACTIVE WASTE IN A BITUMEN MATRIX

He article presents a comprehensive analytical review of contemporary scientific and technical approaches to the conditioning and immobilization of low- and intermediate-level liquid radioactive waste (LRW) using the bituminization method. The authors describe the performance advantages and macrokinetic limitations of utilizing heterogeneous hydrocarbon matrices in detail, and formulate strict regulatory requirements for the physicochemical properties of compounds and the salt composition of fixed process fluids.

A detailed comparative analysis of the fractional composition of various industrial bitumen grades, including products from «Pavlodar Oil Chemistry Refinery» LLP, was carried out. The parameters of batch and continuous extrusion processes are systematized. The key internal factors determining the limit of salt loading, dynamic viscosity of mixtures, their radiation resistance, thermal stability, and long-term hydrophobicity under contact with groundwater are analyzed. The necessity of preliminary characterization of LRW phase composition and assessment of its compatibility with bitumen to prevent exothermic reactions is demonstrated. The conditions required for safe intermediate storage and subsequent management of bituminized waste are considered. It is noted that when selecting the optimal solidification technology, it is essential to take into account the fire hazard of the matrix, radiation-induced changes in its properties (radiolysis effects), and the risks of long-term biodegradation. The scientific value of this work lies in forming well-founded recommendations for the limited application of the bituminization method within the framework of the nuclear energy development program in the Republic of Kazakhstan.

Key words: *liquid radioactive waste, bituminization, immobilization, bitumen matrix, salt loading, radiation resistance, radiolysis, radioactive waste conditioning.*

Сведения об авторах

Юлия Юрьевна Бакланова* – начальник отдела материаловедческих испытаний, «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Республика Казахстан; e-mail: basalai@nnc.kz. ORCID:https://orcid.org/ 0000-0003-3310-4159.

Виталий Викторович Яковлев – главный специалист по инженерно- техническому сопровождению; «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Республика Казахстан; e-mail: Yakovlev@nnc.kz.

Ольга Сергеевна Букина – сотрудник «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Республика Казахстан; e-mail: bukina@nnc.kz . ORCID: .https://orcid.org/0000-0001-8759-9199.

Виктор Владимирович Бакланов – PhD, ассоциированный профессор, Директор филиала «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Республика Казахстан; e-mail: baklanov@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/ 0000-0001-7627-8752.

Авторлар туралы мәліметтер

Юлия Юрьевна Бакланова* – ҚР ҰЯО РМК "Атом энергиясы институты" материалтану сынақтары бөлімінің бастығы, Қазақстан Республикасы; e-mail: basalai@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/ 0000-0003-3310-4159

Виталий Викторович Яковлев – ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» инженерлік-техникалық сүйемелдеу жөніндегі бас маман, Қазақстан Республикасы; e-mail: Yakovlev@nnc.kz.

Ольга Сергеевна Букина – ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» қызметкері, Қазақстан Республикасы; e-mail: bukina@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8759-9199.

Виктор Владимирович Бакланов – PhD, қауымдастырылған профессор, ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалының директоры, Қазақстан Республикасы; e-mail: baklanov@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/ 0000-0001-7627-8752.

Information about the authors

Yuliya Baklanova* – Head of the Department of Materials Science Testing, «Institute of Atomic Energy» RSE NNC RK, Republic of Kazakhstan; e-mail: basalai@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/ 0000-0003-3310-4159.

Vitaliy Yakovlev – Chief Specialist in Engineering and Technical Support, «Institute of Atomic Energy» RSE NNC RK, Republic of Kazakhstan; e-mail: Yakovlev@nnc.kz.

Olga Bukina – employee of the «Institute of Atomic Energy» RSE NNC RK, Republic of Kazakhstan; e-mail:bukina@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8759-9199.

Viktor Baklanov – PhD, associate professor, Director of the branch «Institute of Atomic Energy» of the RSE NNC RK, Republic of Kazakhstan; baklanov@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/ 0000-0001-7627-8752.

Поступила в редакцию 20.06.2026
Поступила после доработки 30.08.2026
Принята к публикации 10.09.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-95

МРНТИ: 61.13.01; 61.13.21; 29.27.51

У.Е. Жантикеев*, Д.Т. Ыбырайымкул, Н.Б. Абильшаиков, М. Алипулы, К.С. Бексейтова
Satbayev University,
050043, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22
*e-mail: nurlybekov.ulan@gmail.com

РЕАКТОРЫ ХОЛОДНОЙ ПЛАЗМЫ В ПРОЦЕССАХ ОЧИСТКИ ВОДЫ: КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ, МЕХАНИЗМЫ ДЕЙСТВИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОГРАНИЧЕНИЯ

Аннотация: *В статье представлен нарративный обзор основных типов реакторов холодной нетепловой плазмы, применяемых в процессах очистки воды. Рассмотрены физико-химические основы плазменной обработки воды, включая механизмы образования реактивных форм кислорода и азота (РФКА) и роль межфазного переноса. Проанализированы диэлектрические барьерные разрядные реакторы, коронные и импульсные разрядные системы, реакторы со скользящей дугой, атмосферные плазменные струи, жидкофазные и пузырьковые реакторы, а также гибридные плазменно-каталитические аппараты. Показано, что результат плазменной очистки определяется зоной формирования разряда, площадью межфазного контакта газ–жидкость, гидродинамикой потока, временем пребывания воды в плазмоактивной зоне и удельными энергозатратами. Обсуждается влияние матрицы воды на эффективность обработки. На основе сравнительного анализа трёх таблиц показано, что универсального реактора для всех задач водоочистки не существует: каждый тип аппарата имеет собственную область рационального применения. Гибридные плазменно-каталитические системы представляют наибольший практический интерес для повышения степени минерализации загрязнителей и снижения энергозатрат. Сделан вывод, что приоритетом дальнейших исследований должно стать создание масштабируемых реакторов с контролируемым газожидкостным массообменом и минимальным образованием побочных продуктов.*

Ключевые слова: *холодная плазма, плазменный реактор, химическая технология, процессы и аппараты, очистка воды, диэлектрический барьерный разряд, коронный разряд, газожидкостная обработка.*

1. Введение

Очистка воды от устойчивых органических загрязнителей остаётся одной из наиболее сложных задач современной химической технологии и экологической инженерии. В водных средах всё чаще обнаруживаются соединения, которые плохо удаляются традиционными методами: синтетические красители, фенольные соединения, нефтепродукты, фармацевтические вещества, антибиотики, пестициды, поверхностно-активные вещества и продукты их трансформации. Дополнительную проблему создают микробиологические загрязнители, поскольку для их инактивации требуется снижение общей органической нагрузки и эффективное разрушение клеточных структур или вирусных частиц. В таких условиях классические методы очистки – коагуляция, сорбция, мембранное разделение, биологическая очистка и химическое окисление – не всегда обеспечивают достаточную глубину удаления загрязнителей или требуют дополнительных стадий обработки.

Ограничения традиционных технологий особенно заметны при работе с микрополлютантами, присутствующими в низких концентрациях. Биологические методы малоэффективны для трудноразлагаемых соединений, сорбционные процессы переводят загрязнитель в твёрдую фазу, но не разрушают его, а мембранные технологии порождают вопросы концентрата и загрязнения мембран. Именно поэтому в последние годы усилилось внимание к процессам продвинутого окисления, основанным на генерации высокореакционноспособных частиц в зоне обработки. Холодная нетепловая плазма занимает среди них особое место, поскольку позволяет получать активные формы кислорода и азота без нагрева всего объёма жидкости до высоких температур [1, 2].

Число публикаций по плазменной водоочистке в базах Scopus и Web of Science стабильно растёт начиная с середины 2000-х годов – это фиксируется в нескольких крупных обзорах последнего десятилетия [3, 4]. Тем не менее прямое сравнение результатов остаётся

©У.Е. Жантикеев, Д.Т. Ыбырайымкул, Н.Б. Абильшаиков, М. Алипулы, К.С. Бексейтова, 2026

затруднённым из-за различий в конструкции реакторов, условиях обработки и методах расчёта энергоэффективности. Именно поэтому обзор конструктивных особенностей реакторов и механизмов их действия представляет самостоятельную аналитическую ценность [5, 6].

С позиции химической технологии холодная плазма интересна не только как источник активных окислителей, но и как основа для реакторных систем нового класса. Один и тот же загрязнитель разлагается с разной скоростью в зависимости от типа аппарата: диэлектрический барьерный разряд, коронный разряд, импульсная плазма, плазменная струя, скользящая дуга или пузырьковый реактор дают принципиально разные условия массопереноса и плазмохимии.

Для прикладной водоочистки принципиально важны не только показатели удаления загрязнителя, но и стабильность разряда, равномерность обработки потока, устойчивость электродов, удельные энергозатраты, образование промежуточных продуктов и возможность масштабирования. Эти вопросы остаются недостаточно освещёнными в большинстве экспериментальных работ.

Целью настоящей статьи является обзор и сравнительный анализ основных типов реакторов холодной плазмы, применяемых в процессах очистки воды, с акцентом на их конструктивные особенности, механизмы действия, технологические преимущества и ограничения. Настоящий обзор охватывает публикации за период 2006-2025 гг.

2. Методология обзора

Настоящая работа выполнена в формате нарративного обзорного исследования. Поиск литературы проводился в базах данных Scopus, Web of Science и Google Scholar с использованием следующих ключевых слов и их сочетаний: «cold plasma water treatment», «non-thermal plasma reactor», «dielectric barrier discharge», «corona discharge wastewater», «gliding arc plasma», «plasma jet water», «bubble plasma reactor», «plasma-catalytic hybrid», «reactive oxygen and nitrogen species», «plasma water treatment scale-up». Временной диапазон поиска: 2006–2025 годы.

Критерии включения публикаций: экспериментальные и обзорные работы, посвящённые плазменным реакторам для очистки воды; работы, содержащие описание конструкции реактора, типа разряда и условий газожидкостного контакта; статьи в рецензируемых журналах на английском и русском языках. Критерии исключения: работы, рассматривающие исключительно газофазную плазменную обработку без контакта с жидкостью; статьи, не содержащие описания реакторной системы.

При рассмотрении каждого типа реактора учитывались: целевые загрязнители, объём обрабатываемой воды, время воздействия, мощность или энергия разряда, состав газовой фазы, характер газожидкостного контакта и применяемые критерии эффективности. Использован сравнительно-аналитический подход по трём направлениям: конструктивные особенности реакторов; механизмы образования и переноса реактивных форм кислорода и азота (РФКА); технологические ограничения и перспективы масштабирования.

3. Физико-химические основы плазменной обработки воды

Работа реакторов холодной нетепловой плазмы основана на создании электрического разряда в газовой, жидкой или газожидкостной зоне. В отличие от термической плазмы, высокая энергия передаётся прежде всего электронам, тогда как температура основного объёма газа или жидкости остаётся сравнительно низкой. Благодаря этому активные частицы могут образовываться непосредственно в зоне контакта с водой без сильного нагрева всего объёма раствора [1].

На начальном этапе под действием высокого напряжения в межэлектродном промежутке формируются высокоэнергетические электроны. Они сталкиваются с молекулами воды, кислорода, азота и водяного пара, вызывая их возбуждение, ионизацию и диссоциацию. В результате образуются реактивные формы кислорода и азота, среди которых наиболее важными для водоочистки являются гидроксильные радикалы (•OH), атомарный кислород (O•), озон (O_3), перекись водорода (H_2O_2), супероксидные радикалы ($O_2^{\bullet -}$), оксиды азота, нитриты и нитраты. Эти частицы различаются временем жизни и реакционной способностью: короткоживущие радикалы действуют преимущественно вблизи зоны разряда, тогда как более устойчивые молекулярные окислители (O_3, H_2O_2) могут переноситься в жидкую фазу [7, 8].

Основные реакции образования активных форм:

$$e^- + H_2O \rightarrow {\bullet}OH + H{\bullet} + e^- \quad (1)$$
$$e^- + O_2 \rightarrow 2O{\bullet} + e^- \quad (2)$$
$$O{\bullet} + O_2 + M \rightarrow O_3 + M \quad (3)$$
$${\bullet}OH + {\bullet}OH \rightarrow H_2O_2 \quad (4)$$
$$e^- + N_2 \rightarrow 2N{\bullet} + e^- \quad (5)$$
$$N{\bullet} + O_2 \rightarrow NO + O{\bullet} \quad (6)$$
$$NO + O{\bullet} \rightarrow NO_2 \quad (7)$$

Ключевую роль в плазменно-жидкостных системах играет межфазная поверхность газ–жидкость. Во многих реакторах плазма формируется над поверхностью воды, в тонком газовом промежутке или внутри пузырьков, поэтому именно граница раздела фаз является основной зоной переноса активных частиц (рис. 1). Радикалы •OH воздействуют на загрязнители вблизи поверхности жидкости или в тонкой водной плёнке; долгоживущие формы (O_3, H_2O_2, NO_2^-, NO_3^-) проникают глубже в объём раствора [7].

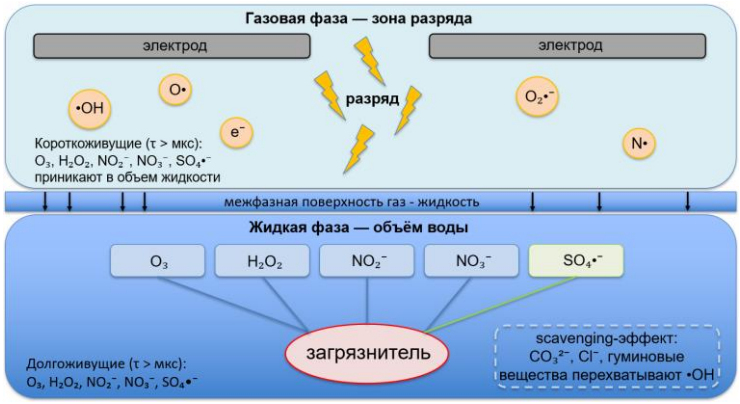


Рисунок 1 – Схема межфазного переноса реактивных форм кислорода и азота (РФКА) на границе газ–жидкость в плазменных реакторах

Существенное значение имеет состав водной матрицы. Карбонаты, гидрокарбонаты, хлориды и гуминовые вещества вызывают так называемый scavenging-эффект: карбонат-ионы реагируют с •OH, снижая его концентрацию, тогда как хлориды при плазменной обработке могут давать хлорированные промежуточные продукты. Это означает, что данные, полученные на дистиллированной воде с модельным красителем, могут существенно расходиться с результатами на реальных сточных водах [9, 10].

С аппаратурной точки зрения геометрия реактора определяет эффективность не меньше, чем тип разряда. Именно поэтому в современных системах используют тонкие слои жидкости, падающие плёнки, распыление, барботаж и пузырьковые режимы – всё это направлено на увеличение межфазной поверхности и улучшение массообмена. Плазменная очистка воды – это комплексный газожидкостный реакторный процесс, в котором плазмохимия, гидродинамика и массоперенос действуют совместно [1].

4. Типы реакторов холодной плазмы и их конструктивные особенности

На рисунке 2 представлены принципиальные схемы шести основных типов реакторов холодной плазмы, применяемых для очистки воды. Сравнение схем показывает принципиальное различие в положении зоны генерации разряда относительно водной фазы. В реакторах типа а, б и е плазма формируется в газовой фазе над водой, в реакторе типа д – непосредственно в объёме жидкости, тогда как конструкции в и г занимают промежуточное положение, обеспечивая интенсивный газожидкостный контакт через плёнку или поверхность воды. Именно это конструктивное различие определяет состав и концентрацию РФКА, достигающих молекул загрязнителя, и является ключевым критерием при выборе типа реактора для конкретной задачи водоочистки. Детальное рассмотрение каждого типа представлено в подразделах 4.1-4.6.

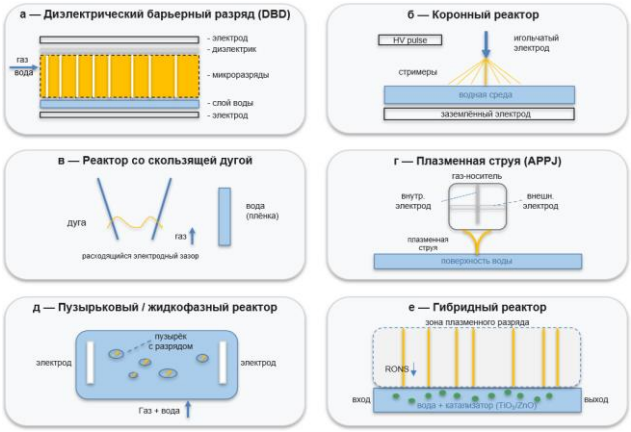


Рисунок 2 – Принципиальные схемы основных типов реакторов холодной плазмы для очистки воды: а – диэлектрический барьерный разряд (DBD); б – коронный реактор; в – реактор со скользящей дугой; г – плазменная струя (APPJ); д – пузырьковый/жидкофазный реактор; е – гибридный плазменно-каталитический реактор

4.1 Диэлектрические барьерные разрядные реакторы (DBD)

Диэлектрический барьерный разряд (рис. 2а) – один из наиболее изученных вариантов генерации холодной нетепловой плазмы для обработки воды. DBD-реакторы работают при атмосферном давлении, не требуют вакуумной системы и обеспечивают достаточно стабильный разряд в газовой или газожидкостной зоне [1, 2]. Принципиальная особенность конструкции – диэлектрический барьер между электродами, который ограничивает ток, предотвращает переход в дуговой режим и способствует формированию множества кратковременных микроплазменных каналов [7, 11].

Типовая схема включает высоковольтный электрод, заземлённый электрод, диэлектрический слой, газовый промежуток и зону контакта с водой. Наиболее распространены четыре конфигурации: DBD над поверхностью воды, реакторы с падающей плёнкой, коаксиальные DBD-системы и аппараты с тонким слоем жидкости [2, 5]. В реакторах с падающей плёнкой жидкость распределяется тонким слоем по поверхности диэлектрика – это увеличивает отношение площади контакта к объёму воды и улучшает перенос O_3, •OH и H_2O_2 в жидкую фазу.

К достоинствам DBD-реакторов относятся: стабильность разряда, совместимость с различными газовыми средами и возможность сочетания с катализаторами и сорбентами [7, 11]. Типичные удельные энергозатраты составляют 1-50 Вт·ч/л [4, 12]. Главное ограничение – плазма формируется в газовой фазе, поэтому при увеличении объёма воды равномерность обработки становится самостоятельной инженерной задачей. Её решение достигается оптимизацией геометрии аппарата, толщины жидкого слоя и режима подачи газа [2, 5].

4.2 Коронные и импульсные разрядные реакторы

Коронные и импульсные реакторы (рис. 2б) создают высокоэнергетические локальные зоны разряда вблизи электродов с малым радиусом кривизны. Наиболее распространены конфигурации «игла-плоскость» и «проволока–цилиндр», где сильное электрическое поле концентрируется у острия электрода. При подаче высоковольтных импульсов в межэлектродном промежутке возникают стримерные каналы, генерирующие радикалы, озон и другие реакционноспособные частицы [3, 7].

Амплитуда напряжения, длительность импульса, частота повторения, полярность и расстояние между электродами – все эти параметры критически влияют на состав RONS и эффективность обработки. Образование долгоживущих частиц (H_2O_2, N O_2^-, NO_3^-) в газофазных импульсно-коронных системах над поверхностью воды в значительной мере определяется условиями переноса через границу газ-жидкость [13].

Ключевое достоинство импульсных коронных реакторов – высокая плотность энергии в зоне разряда при коротком времени воздействия, что обеспечивает интенсивное образование радикалов и высокую скорость окисления. Вместе с тем их практическое применение осложняется чувствительностью к электрическим параметрам, риском эрозии электродов и локальностью активной зоны при обработке больших объёмов воды – для последнего требуется многоточечная электродная система или интенсивная циркуляция [3, 6].

4.3 Реакторы со скользящей дугой (gliding arc)

Реакторы со скользящей дугой (рис. 2в) занимают промежуточное положение между холодной нетепловой плазмой и термически активными плазменными системами. Разряд формируется между двумя расходящимися электродами, вытягивается потоком газа, затем гаснет и снова инициируется в области минимального межэлектродного расстояния. Вода может подаваться в виде тонкой плёнки, аэрозоля или циркулирующей жидкости, контактирующей с плазмоактивированным газом [3, 14].

Высокая реакционная способность плазменного потока и интенсивный газожидкостный контакт делают gliding arc-реакторы целесообразными для обработки газожидкостных потоков, инактивации микроорганизмов и получения плазмоактивированной воды. В данной работе показали, что в скользящей дуге на воздухе образуются значительные концентрации NO в жидкой фазе, что определяет антибактериальный эффект обработки. Ограничения: более высокий локальный нагрев по сравнению с DBD-системами, зависимость стабильности разряда от расхода газа и геометрии электродов, сложность масштабирования на большие объёмы воды [14, 15].

4.4 Плазменные струи и атмосферные jet-реакторы

Плазменные струи формируют разряд внутри газового канала (рис. 2г) и выносят активные частицы потоком рабочего газа (аргон, гелий, воздух, азот или их смеси) к поверхности обрабатываемой жидкости. В отличие от DBD, струя действует локально – активные частицы и фотоны направлены в ограниченную область контакта с водой [16]. Это делает jet-реакторы удобным инструментом для механистических исследований: можно точно варьировать расстояние до жидкости, расход газа, мощность разряда и время экспозиции.

Для атмосферных плазменных струй установлена эффективность как в отношении деградации метиленового синего в водных растворах при атмосферном давлении [17], так и при инактивации бактериальных клеток в водной среде [18]. Принципиальное ограничение при масштабировании – малая площадь воздействия одной струи. Увеличение производительности требует либо многосопловых систем, что существенно усложняет конструкцию реактора и управление разрядом, либо интенсивной циркуляции жидкости. По этой причине jet-реакторы наиболее целесообразны для лабораторных исследований и локальной обработки малых объёмов воды [16, 19].

4.5 Плазма в жидкости и пузырьковые реакторы

Реакторы, в которых плазма формируется в воде, внутри газовых пузырьков или на газожидкостной границе, позволяют приблизить зону генерации РФКА к объёму обрабатываемой жидкости (рис. 2д). Это конструктивно выгодно при работе с растворёнными органическими загрязнителями, для деградации которых радикалы должны не только образоваться, но и достичь молекулы-мишени [1, 2].

В пузырьковых реакторах газ подаётся в жидкость в виде пузырьков, внутри которых инициируется разряд. Чем меньше размер пузырьков и выше их объёмная доля, тем больше площадь межфазного контакта. Для пузырьковых плазменных реакторов установлено, что разряд, формирующийся внутри газового пузырька, развивается по механизму, отличающемуся от поверхностных разрядов, что влияет на состав и перенос РФКА в жидкую фазу [20, 21]. Отдельные исследования также показывают, что микропузырьковые плазменные системы могут обеспечивать более низкие удельные энергозатраты при деградации загрязнителей по сравнению с сопоставимыми DBD-реакторами [22]. Однако диапазон снижения существенно зависит от типа загрязнителя, электропроводности воды и режима газораспределения.

Ограничения жидкофазных и пузырьковых систем: риск электродной эрозии при погружённых электродах, зависимость устойчивости разряда от электропроводности раствора, возможное накопление нитритов и нитратов при работе на воздухе. При переходе к большим объёмам жидкости обеспечение равномерного газораспределения становится отдельной инженерной задачей [21, 23].

4.6 Гибридные плазменно-каталитические реакторы

В гибридных плазменно-каталитических реакторах (рис. 2е) холодная плазма используется совместно с катализаторами, сорбентами или дополнительными окислителями. Плазменный разряд генерирует РФКА, а твёрдая или растворённая добавка усиливает их образование, продлевает действие окислителей либо способствует глубокой минерализации

загрязнителей. Наиболее часто применяются TiO_2, ZnO, активированный уголь, цеолиты, оксиды металлов и персульфат [24, 25].

Положение катализатора в аппарате принципиально влияет на механизм синергии. При размещении в зоне разряда он взаимодействует с короткоживущими радикалами и возбуждёнными частицами; в объёме жидкости основную роль начинают играть долгоживущие окислители (O_3, H_2O_2). Сравнительный анализ TiO_2 и ZnO-содержащих плазменно-каталитических систем показывает, что эффективность катализатора зависит не только от его природы, но и от типа загрязнителя и условий формирования разряда. Это подтверждает отсутствие универсального катализатора, одинаково эффективного для всех задач плазменной водоочистки [26]. Отдельного внимания заслуживает активация персульфата плазмой с образованием $SO_4^{\bullet-}$ с высоким окислительным потенциалом, что открывает путь к деградации стойких соединений, устойчивых к •OH [25].

Практический интерес к гибридным системам обусловлен возможностью повысить степень минерализации загрязнителей и снизить удельные энергозатраты. Ограничения: усложнение конструкции, необходимость регенерации катализатора, деактивация поверхности продуктами реакции при длительной эксплуатации [24].

5. Сравнительный анализ реакторов холодной плазмы

Рассмотренные типы реакторов холодной плазмы отличаются не только способом формирования разряда, но и характером контакта активных частиц с водной фазой. Для химико-технологического анализа важно учитывать, где именно образуется плазма, как РФКА переходят в воду, насколько равномерно обрабатывается объём жидкости и какие энергетические затраты требуются [1, 2]. В таблицах 1-3 представлено обобщение конструктивных особенностей, технологических характеристик и ориентировочных показателей энергоэффективности.

Таблица 1 – Конструктивные особенности основных типов реакторов холодной плазмы для очистки воды

Тип реактора	Зона формирования плазмы	Основные активные частицы	Режим работы
DBD	Газовый промежуток над водой, тонкая жидкая плёнка, коаксиальный зазор	•OH, O_3, H_2O_2, O•, NO_x, NO_2^-, NO_3^-	Непрерывный / периодический
Коронные и импульсные реакторы	Область высокого электрического поля у игольчатых, проволочных или коаксиальных электродов	•OH, O_3, H_2O_2, $O_2^{\bullet-}$, NO_x	Импульсный / периодический
Скользящая дуга	Между расходящимися электродами; разряд вытягивается потоком газа	O_3, •OH, O•, NO_x, H_2O_2	Непрерывный
Плазменные струи (jet)	В газовом канале с выносом плазмы к поверхности воды	•OH, O_3, H_2O_2, $O_2^{\bullet-}$, NO_2^-, NO_3^-	Непрерывный / периодический
Жидкофазные и пузырьковые	В воде, внутри пузырьков газа или на границе газ–жидкость	•OH, H_2O_2, O_3, O•, NO_2^-, NO_3^-	Непрерывный / периодический
Гибридные плазменно-каталитические	Плазменная зона в сочетании с катализатором, сорбентом или окислителем	•OH, $SO_4^{\bullet-}$, O_3, H_2O_2, $O_2^{\bullet-}$	Непрерывный / периодический

Следует отметить, что приведённые в таблице 3 диапазоны степени удаления являются ориентировочными обобщёнными значениями, полученными в различных исследованиях при существенно отличающихся экспериментальных условиях. Они не предназначены для прямого количественного сравнения или ранжирования типов реакторов без учёта природы и исходной концентрации загрязнителя, объёма и состава воды, мощности и режима разряда, времени обработки, рабочего газа и гидродинамических условий. Поэтому таблица отражает характерные диапазоны эффективности, а не результаты, полученные при идентичных условиях.

Таблица 2 – Технологическая оценка реакторов холодной плазмы для очистки воды

Тип реактора	Преимущества	Ограничения	Перспективы масштабирования
DBD	Стабильный разряд, работа при атм. давлении, обработка тонких слоёв воды	Ограниченная глубина воздействия, зависимость от площади контакта газ-жидкость	Коаксиальные и плёночные схемы; проточный режим [5, 11]
Коронные и импульсные	Интенсивное образование активных частиц, высокая скорость окисления	Требуют точного контроля напряжения, возможна эрозия электродов	Многоэлектродные системы с принудительной циркуляцией [3, 7]
Скользящая дуга	Высокая реакционная способность, интенсивный газожидкостный контакт	Более высокие энергозатраты, локальный нагрев, сложность стабилизации дуги	Газожидкостные потоки и распылённые водные системы [14, 15]
Плазменные струи	Мягкий режим обработки, высокая управляемость, локальное воздействие	Небольшая площадь контакта, низкая производительность одной струи	Многосопловые системы или интенсивная циркуляция жидкости [16, 18]
Жидкофазные и пузырьковые	Развитая межфазная поверхность, возможность обработки объёма жидкости	Электродная эрозия, нестабильность разряда, зависимость от электропроводности	Оптимизация размера пузырьков и газораспределения [21, 22]
Гибридные плазменно-каталитические	Повышение минерализации, снижение промежуточных продуктов, уменьшение энергозатрат	Усложнение конструкции, необходимость регенерации катализатора	Наибольший практический интерес для трудноокисляемых микрополлютантов [24, 25]

Таблица 3 – Ориентировочные показатели эффективности реакторов холодной плазмы

Тип реактора	Степень удаления загрязнителя, %	Типичные целевые загрязнители	Ссылки
DBD	70-99	Красители, фармацевтика, фенолы	[5, 12]
Коронные и импульсные	80-99	Красители, антибиотики, фенолы	[3, 13]
Скользящая дуга	60-95	Красители, микроорганизмы, органика	[14, 15]
Плазменные струи	70-99 (малые объёмы)	Красители, бактерии	[17, 18]
Жидкофазные и пузырьковые	75-99	Красители, нефтепродукты, антибиотики	[20, 22, 23]
Гибридные	85-99+	Микрополлютанты, стойкие органические соединения	[24, 25]

Из таблиц 1-3 видно, что универсального реактора холодной плазмы для всех задач водоочистки не существует. DBD-реакторы удобны для стабильной лабораторной и проточной обработки, при этом их удельные энергозатраты существенно зависят от геометрии аппарата и режима обработки. Коронные и импульсные системы обеспечивают интенсивное образование активных частиц, но требуют высокой точности управления. Реакторы со скользящей дугой дают высокую реакционную способность, однако могут сопровождаться более высокими энергозатратами. Пузырьковые и жидкофазные системы обеспечивают развитую межфазную поверхность и подходят для обработки объёма жидкости. Гибридные плазменно-каталитические реакторы рассматриваются как перспективные системы для снижения удельных энергозатрат и повышения глубины окисления, однако величина эффекта зависит от природы загрязнителя, типа катализатора и режима разряда.

6. Технологические ограничения и перспективы масштабирования

Несмотря на высокую эффективность холодной плазмы в лабораторных исследованиях, её переход к прикладным системам очистки воды остаётся сложной инженерной задачей. Главная причина заключается в том, что плазменная обработка является не только химическим, но и аппаратурно-гидродинамическим процессом. При увеличении объёма воды обеспечить одинаковую дозу плазменного воздействия для всего потока значительно труднее. Поэтому результаты, полученные на модельных растворах в малых объёмах, не всегда прямо переносятся на реальные сточные воды или проточные системы [1, 2].

6.1 Неравномерность обработки и межфазный перенос

Во многих реакторах плазма локализована в газовой фазе, над поверхностью воды, внутри пузырьков или вблизи электродов. Если гидродинамика недостаточно продумана, часть потока проходит через аппарат без контакта с плазмоактивной зоной — аналог байпасирования в классических реакторах. При масштабировании это требует детального анализа полей скоростей и времени пребывания жидкости [4].

Гидроксильные радикалы обладают высоким окислительным потенциалом, однако из-за малого времени жизни воздействуют только вблизи межфазной поверхности. Долгоживущие формы (O_3, H_2O_2, нитриты, нитраты) способны распространяться в объёме воды, но их окислительная способность ниже. Увеличение площади контакта газ-жидкость остаётся центральным направлением совершенствования плазменных реакторов [7, 11].

6.2 Электродная эрозия и побочные продукты

Электродная эрозия наиболее серьёзна в жидкофазных и импульсных системах с погружёнными электродами. Продукты износа металлов изменяют состав воды, снижают воспроизводимость результатов и создают требования к материалам. Этот вопрос редко обсуждается в публикациях, сосредоточенных на показателях удаления загрязнителя, хотя имеет принципиальное значение для длительной эксплуатации [2, 7].

При использовании воздуха в качестве рабочего газа в воде накапливаются нитриты и нитраты; при неполной деградации органики образуются промежуточные продукты окисления. Снижение концентрации исходного загрязнителя не всегда отражает глубину его минерализации. Важным аспектом плазменно-жидкостной химии является образование пероксинитрита при взаимодействии H_2O_2 и HNO_2; данное соединение нередко остаётся вне внимания, хотя может играть существенную роль в реакционных процессах, протекающих в обработанной воде [10]. Поэтому объективная оценка процесса требует контроля общего органического углерода, токсичности, pH, электропроводности и концентраций NO_2^-/NO_3^- [6, 11].

6.3 Энергоэффективность и пути развития

Прямое сопоставление энергоэффективности различных плазменных реакторов осложняется тем, что в литературе используются разные показатели и способы нормирования энергозатрат. Наиболее распространены удельные энергозатраты, выраженные в Вт·ч/л или кВт·ч/м³, энергетический выход (например, г/кВт·ч), а также показатели, нормированные на степень снижения концентрации загрязнителя. Эти метрики характеризуют разные стороны процесса и не всегда могут быть корректно пересчитаны друг в друга без исходных данных о мощности, объёме воды, времени обработки и кинетике удаления. Поэтому приведённые в обзоре энергетические значения следует рассматривать как ориентировочные и сопоставлять преимущественно в случаях, когда использованы одинаковые единицы, сходные условия эксперимента и единый способ расчёта.

При переходе к крупным потокам удельные энергозатраты, как правило, возрастают: часть энергии расходуется на нагрев, газофазные реакции и образование побочных продуктов, а не на деградацию целевого загрязнителя. Наращивание мощности разряда без оптимизации конструкции реактора – малоэффективная стратегия. Более действенный путь – увеличение межфазной поверхности, улучшение перемешивания, подбор режима подачи газа и контроль времени пребывания воды в плазмоактивной зоне [2, 4].

На основании проведённого анализа можно выделить пять приоритетных направлений будущих исследований: (1) разработка масштабируемых реакторов с управляемым газожидкостным контактом; (2) изучение scavenging-эффектов в реальных водных матрицах – это одно из наиболее недостаточно исследованных направлений; (3) разработка

долгосрочно устойчивых электродных материалов для жидкофазных систем; (4) комплексная оценка токсичности промежуточных продуктов, включая пероксинитрит и хлорированные соединения; (5) интеграция плазменных процессов с биологической очисткой или мембранными технологиями для создания комбинированных систем. Указанные направления вытекают непосредственно из ограничений, рассмотренных в разделах 4 и 6.

Заключение

На основании проведённого обзора сформулированы следующие выводы.

1. Эффективность плазменной очистки воды определяется совокупностью факторов: химической активностью РФКА, конструкцией реактора, площадью межфазной поверхности, гидродинамикой и временем пребывания жидкости. Аппаратурное оформление – это не техническая деталь, а ключевая переменная, которая разделяет лабораторный эксперимент и работоспособную водоочистную систему.

2. Каждый тип реактора имеет свою область рационального применения: DBD для стабильной проточной обработки тонких слоёв; коронные и импульсные для интенсивного локального окисления; скользящая дуга для газожидкостных потоков; струи для лабораторных механистических исследований; пузырьковые и жидкофазные для обработки значительных объёмов с развитой межфазной поверхностью. Выбор реактора должен начинаться с анализа конкретной технологической задачи, а не с наличия доступного оборудования.

3. Гибридные плазменно-каталитические реакторы представляют наибольший практический интерес для повышения глубины окисления и снижения удельных энергозатрат, особенно при работе с трудноразлагаемыми микрополлютантами. Однако вопросы регенерации катализатора и долгосрочной стабильности систем требуют самостоятельного исследования.

4. Дальнейшее развитие технологии должно быть направлено на масштабируемые реакторы с контролируемым газожидкостным контактом, минимальным образованием побочных продуктов и длительной устойчивой работой. Объективная оценка процесса невозможна без контроля полноты минерализации, токсичности промежуточных продуктов и состава обработанной воды, а не только степени удаления исходного загрязнителя.

Список литературы

1. Plasma-liquid interactions: a review and roadmap / P.J. Bruggeman et al // Plasma Sources Science and Technology. – 2016. – Vol. 25, № 5. – Article No. 053002. – https://doi.org/10.1088/0963-0252/25/5/053002

2. Review on discharge plasma for water treatment: mechanism, reactor geometries, active species and combined processes / H. Zeghioud et al // Journal of Water Process Engineering. – 2020. – Vol. 38, Article № 101664. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101664.

3. Review on electrical discharge plasma technology for wastewater remediation / B. Jiang et al // Chemical Engineering Journal. – 2014. – Vol. 236. – P. 348-368. https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.09.090.

4. Nippatlapalli N. Recent progress on application of nonthermal plasma for the degradation of aqueous emerging contaminants: A review on mechanism, reactor strategies, integrated systems and future perspective / N. Nippatlapalli, A. Ganta // Process Safety and Environmental Protection. – 2024. – Vol. 187. – P. 1454-1470. https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.05.009.

5. Iervolino G. Enhanced removal of water pollutants by dielectric barrier discharge non-thermal plasma reactor / G. Iervolino, V. Vaiano, V. Palma // Separation and Purification Technology. – 2019. – Vol. 215. – P. 155-162. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.01.007.

6. A review on non-thermal plasma treatment of water contaminated with antibiotics / M. Magureanu et al // Journal of Hazardous Materials. – 2021. – Vol. 417, Article № 125481. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125481.

7. Electrohydraulic discharge and nonthermal plasma for water treatment / B.R. Locke et al // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2006. – Vol. 45, № 3. – P. 882-905. https://doi.org/10.1021/ie050981u.

8. Vanraes P. Plasma physics of liquids – a focused review / P. Vanraes, A. Bogaerts // Applied Physics Reviews. – 2018. – Vol. 5, № 3, Article № 031103. https://doi.org/10.1063/1.5020511.

9. Panorel I.C. Degradation of humic substances in water by pulsed corona discharge / I.C. Panorel, I. Lamberg, M. Sillanpaa // Chemosphere. – 2013. – Vol. 93. – P. 1539-1545. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.07.085
10. Aqueous-phase chemistry and bactericidal effects from an air discharge plasma in contact with water: evidence for the formation of peroxynitrite through a pseudo-second-order post-discharge reaction of H_2O_2 and HNO_2 / P. Lukes et al // Plasma Sources Science and Technology. – 2014. – Vol. 23, Article № 015019. https://doi.org/10.1088/0963-0252/23/1/015019.
11. A critical review on ozone and co-species, generation and reaction mechanisms in plasma induced by dielectric barrier discharge technologies for wastewater remediation / E.S.M. Mouele et al // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2021. – Vol. 9, № 5, Article № 105758. https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105758.
12. Degradation and mineralization of methylene blue by dielectric barrier discharge non-thermal plasma reactor / P.M.K. Reddy et al // Chemical Engineering Journal. – 2013. – Vol. 217. – P. 41-47. https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.11.116.
13. Air pulsed-corona discharges for degradation of emerging pharmaceutical pollutants in water and toxicity by-products control / D. Iya-Sou et al // Journal of Water Process Engineering. – 2024. – Vol. 67, Article № 106127. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106127.
14. Gharagozalian M. Water treatment by the AC gliding arc air plasma / M. Gharagozalian, D. Dorranian, M. Ghoranneviss // Journal of Theoretical and Applied Physics. – 2017. – Vol. 11. – P. 171-180. https://doi.org/10.1007/s40094-017-0254-z.
15. Gliding arc discharge used for water activation: the production mechanism of aqueous NO and its role in sterilization / M. Zhu et al // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2022. – Vol. 56, № 3, Article № 035202. https://doi.org/10.1088/1361-6463/aca340.
16. Applications of plasma-liquid systems: A review / F. Rezaei et al // Materials. – 2019. – Vol. 12, № 17, Article № 2751. https://doi.org/10.3390/ma12172751.
17. Chandana L. Atmospheric pressure non-thermal plasma jet for the degradation of methylene blue in aqueous medium / L. Chandana, P. Manoj Kumar Reddy, C. Subrahmanyam // Chemical Engineering Journal. – 2015. – Vol. 282. – P. 116-122. https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.02.027.
18. Non-thermal atmospheric pressure plasma jet for the bacterial inactivation in an aqueous medium / L. Chandana et al // Science of the Total Environment. – 2018. – Vol. 640-641. – P. 493-500. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.342.
19. Plasma jet's shielding gas impact on bacterial inactivation / H. Jablonowski et al // Biointerphases. – 2015. – Vol. 10, № 2, № 029506. https://doi.org/10.1116/1.4916533.
20. Analysis of a pulsed discharge within single bubbles in water under synchronized conditions / K. Tachibana et al // Plasma Sources Science and Technology. – 2011. – Vol. 20, Article № 034005. https://doi.org/10.1088/0963-0252/20/3/034005.
21. Plasma bubbles: a route to sustainable chemistry / J. Hong et al // AAPPS Bulletin. – 2021. – Vol. 31, Article № 26. https://doi.org/10.1007/s43673-021-00027-y.
22. Meropoulis S. Plasma microbubbles vs gas-liquid DBD energized by low-frequency high voltage nanopulses for pollutants degradation in water: destruction mechanisms, composition of plasma-activated water and energy assessment / S. Meropoulis, C.A. Aggelopoulos // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2023. – Vol. 11, № 3, Article № 109855. https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109855.
23. A critical review on the application of non-thermal plasma bubbles for oxidation in water treatment / P.J. Angelina Cullen et al // Chemical Engineering Journal. – 2025. – Vol. 505, Article № 159667. https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.159667.
24. Non-thermal plasma coupled with catalyst for the degradation of water pollutants: A review / M. Russo et al // Catalysts. – 2020. – Vol. 10, № 12, Article № 1438. https://doi.org/10.3390/catal10121438.
25. Persulfate activated by non-thermal plasma for organic pollutants degradation: A review / H. Guo et al // Chemical Engineering Journal. – 2023. – Vol. 470, Article № 144094. https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.144094.

26. Aggelopoulos C.A. A comprehensive insight on plasma-catalytic degradation of organic pollutants in water: comparison between ZnO and TiO_2 / C.A. Aggelopoulos, O. Dolinski // Chemosphere. – 2024. – Vol. 347, Article № 140667. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140667.

Финансирование. Данное исследование было профинансировано Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (№ BR28712925, «Исследование и создание холоднoплазменных технологий для комплексной реабилитации экосистем»).

Ұ.Е. Жантикеев*, Д.Т. Ыбырайымқұл, Н.Б. Абильшаиков, М. Әліпұлы, Қ.С. Бексейтова
Satbayev University,
050043, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Сәтбаев к-сі, 22
*e-mail: nurlybekov.ulan@gmail.com

СУДЫ ТАЗАРТУ ПРОЦЕСТЕРІНДЕГІ СУЫҚ ПЛАЗМА РЕАКТОРЛАРЫ: ҚҰРЫЛЫМДЫҚ ЕРЕКШЕЛІКТЕРІ, ӘСЕР ЕТУ МЕХАНИЗМДЕРІ ЖӘНЕ ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ ШЕКТЕУЛЕРІ

Мақалада суды тазарту процестерінде қолданылатын суық термиялық емес плазма реакторларының негізгі түрлеріне нарративтік шолу берілген. Суды плазмалық өңдеудің физика-химиялық негіздері, соның ішінде оттегі мен азоттың реактивті түрлерінің (ОАРТ) түзілу механизмдері және фазааралық тасымалдың рөлі қарастырылған. Диэлектрлік тосқауылды разряд реакторлары, тәждік және импульстік разряд жүйелері, сырғымалы доғалы реакторлар, атмосфералық плазмалық ағындар, сұйықфазалы және көпіршікті реакторлар, сондай-ақ гибридті плазмалық-каталитикалық аппараттар талданған. Плазмалық тазарту нәтижесі разрядтың түзілу аймағына, газ–сұйықтық фазааралық контактісінің ауданына, ағын гидродинамикасына, судың плазма-белсенді аймақта болу уақытына және меншікті энергия шығындарына тәуелді екені көрсетілген. Су матрицасының өңдеу тиімділігіне әсері талқыланған. Үш кестеге негізделген салыстырмалы талдау су тазартудың барлық міндеттері үшін әмбебап реактор жоқ екенін көрсетті: әрбір аппарат түрінің өзіндік ұтымды қолдану саласы бар. Гибридті плазмалық-каталитикалық жүйелер ластағыштардың минералдану дәрежесін арттыру және энергия шығындарын төмендету тұрғысынан ең жоғары практикалық қызығушылық тудырады. Болашақ зерттеулердің басымдығы бақыланатын газ-сұйықтық массаалмасуы бар және жанама өнімдердің түзілуі барынша төмен масштабталатын реакторларды жасау болуы тиіс деген қорытынды жасалды.

Түйін сөздер: *суық плазма, плазмалық реактор, химиялық технология, процестер мен аппараттар, суды тазарту, диэлектрлік тосқауылды разряд, тәждік разряд, газ-сұйықтық өңдеу.*

U.Ye. Zhantikeyev*, D.T. Ybyraymkul, N.B. Abilshaikov, M. Alipuly, K.S. Bexeitova
Satbayev University,
050043, Republic of Kazakhstan, Almaty, Satpayev str., 22
*e-mail: nurlybekov.ulan@gmail.com

COLD PLASMA REACTORS IN WATER TREATMENT PROCESSES: DESIGN FEATURES, MECHANISMS OF ACTION, AND TECHNOLOGICAL LIMITATIONS

This article presents a narrative review of the main types of cold non-thermal plasma reactors used in water treatment processes. The physicochemical fundamentals of plasma-based water treatment are considered, including the mechanisms of formation of reactive oxygen and nitrogen species (RONS) and the role of interfacial transfer. Dielectric barrier discharge reactors, corona and pulsed discharge systems, gliding arc reactors, atmospheric plasma jets, liquid-phase and bubble reactors, as well as hybrid plasma-catalytic devices are analyzed. It is shown that the performance of plasma water treatment is determined by the discharge formation zone, the gas-liquid interfacial contact area, flow hydrodynamics, water residence time in the plasma-active zone, and specific energy consumption. The influence of the water matrix on treatment efficiency is also discussed. Based on a comparative analysis presented in three tables, it is shown that there is no universal reactor suitable for all water treatment tasks: each type of device has its own rational field of application. Hybrid plasma-catalytic systems are of the greatest practical interest for increasing the degree of pollutant mineralization and reducing energy consumption. It is concluded that future research should prioritize the development of scalable reactors with controlled gas-liquid mass transfer and minimal formation of by-products.

Key words: *cold plasma, plasma reactor, chemical technology, processes and equipment, water treatment, dielectric barrier discharge, corona discharge, gas-liquid treatment.*

Сведения об авторах

Улан Ержанулы Жантикеев* – магистр технических наук, старший научный сотрудник лаборатории инженерного профиля, Satbayev University, Алматы, Казахстан; e-mail: nurlybekov.ulan@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1200-2340.

Дархан Тореханулы Ыбырайымкул – магистр технических наук, старший преподаватель, Satbayev University, Алматы, Казахстан; e-mail: d.ybyraiymkul@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1506-6531.

Нариман Бактыбаевич Абильшаиков – научный сотрудник, Satbayev University, Алматы, Казахстан; e-mail: n.abilshaikov@gmail.com.

Мухтар Алипулы – магистр технических наук, старший научный сотрудник лаборатории инженерного профиля, Satbayev University, Алматы, Казахстан; e-mail: mukhtaralipuly@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6265-6238.

Калампыр Сунакбаевна Бексейтова – PhD, старший научный сотрудник лаборатории инженерного профиля, Satbayev University, Алматы, Казахстан; e-mail: kalampyr.bexeitovas@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5510-7660.

Авторлар туралы мәліметтер

Ұлан Ержанұлы Жантикеев* – техника ғылымдарының магистрі, инженерлік бейіндегі зертханасының аға ғылыми қызметкері, Satbayev University, Алматы, Қазақстан; e-mail: nurlybekov.ulan@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1200-2340.

Дархан Төреханұлы Ыбырайымқұл – техника ғылымдарының магистрі, аға оқытушы, Satbayev University, Алматы, Қазақстан; e-mail: d.ybyraiymkul@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1506-6531.

Нариман Бактыбаевич Абильшаиков – ғылыми қызметкер, Satbayev University, Алматы, Қазақстан; e-mail: n.abilshaikov@gmail.com.

Мұхтар Әліпұлы – техника ғылымдарының магистрі, инженерлік бейіндегі зертханасының аға ғылыми қызметкері, Satbayev University, Алматы, Қазақстан; e-mail: mukhtaralipuly@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6265-6238.

Қалампыр Сунақбайқызы Бексейтова – PhD, инженерлік бейіндегі зертханасының аға ғылыми қызметкері, Satbayev University, Алматы, Қазақстан; e-mail: kalampyr.bexeitovas@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5510-7660.

Information about the authors

Ulan Yerzhanuly Zhantikeyev* – Master of Technical Sciences, Senior Researcher at the Engineering Profile Laboratory, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: nurlybekov.ulan@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1200-2340.

Darkhan Torekhanuly Ybyraymkul – Master of Technical Sciences, Senior lecturer, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: d.ybyraiymkul@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1506-6531.

Nariman Baktybayevich Abilshaikov – Researcher, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: n.abilshaikov@gmail.com.

Mukhtar Alipuly – Master of Technical Sciences, Senior Researcher at the Engineering Profile Laboratory, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: mukhtaralipuly@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6265-6238.

Kalampyr Sunakbayevna Bexeitova – PhD, Senior Researcher at the Engineering Profile Laboratory, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: kalampyr.bexeitovas@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5510-7660.

Поступила в редакцию 04.06.2026
Поступила после доработки 14.09.2026
Принята к публикации 16.09.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-96

МРНТИ:52.47.27

А. Кливенко[1]*, Г. Елемесова[1], В. Бакланов[2], О. Букина[2], Ю. Бакланова[2]
[1]Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20А
[2]Институт атомной энергии Национального ядерного центра Республики Казахстан
180010 Республика Казахстан, г. Курчатов, улица Бейбіт атом 10
*e-mail: alexeyklivenko@mail.ru

СИНТЕЗ И СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ ГИДРОГЕЛЕЙ В КАЧЕСТВЕ КАНДИДАТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СОРБЦИИ ЖИДКИХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Аннотация: *Синтезирована серия полиэлектролитных гидрогелей на основе акриламида (AAm) и акрилата натрия (SA), сшитых N,N'-метилен-бис-акриламидом, с различными соотношениями мономеров. Образцы получены методом свободнорадикальной сополимеризации, после чего изучены их равновесная степень набухания в воде, чувствительность к ионной силе среды, температуре и pH, а также механические характеристики и термическая устойчивость. Установлено, что увеличение доли акрилата натрия приводит к росту водопоглощения вследствие повышения концентрации ионизированных карбоксилатных групп и усиления электростатического отталкивания между фрагментами полимерной сетки. Одновременно наблюдается снижение модуля Юнга, свидетельствующее об уменьшении жесткости материала. Повышение концентрации соли вызывает примерно трехкратное уменьшение степени набухания из-за экранирования зарядов противоионами. Напротив, повышение температуры до 80 °C и увеличение pH среды способствуют набуханию гидрогелей. Термогравиметрический анализ показал многостадийный характер термической деструкции и сохранение высокой стабильности образцов до 200 °C. Полученные результаты подтверждают возможность направленного регулирования физико-химических и механических свойств гидрогелей путем изменения соотношения AAm/SA и демонстрируют перспективность разработанных материалов в качестве эффективных сорбентов для очистки и переработки жидких радиоактивных отходов различного состава в практических условиях их эксплуатации.*

Ключевые слова: *питьевая вода, зона чрезвычайного радиационного риска, жесткость воды, кальций, магний, натрий, калий.*

Введение

Полимерные гидрогели представляют собой сшитые полимерные молекулы значительно набухающие в воде [1-3]. Наличие сшивок предотвращает растворение полимерной матрицы, что придает гидрогелям некоторые свойства, которые отличают их от других типов материалов. Во-первых, гидрогели способны удерживать значительное количество воды – до нескольких килограмм на грамм сухого вещества, во-вторых, набухший гидрогель предотвращает текучесть жидкости, это свойство широко используется при создании гигиенических средств, в-третьих, набухший гидрогель способен медленно отдавать накопленную воду, что определяет его использование в качестве кондиционера почв [4-7]. Варьируя химический состав гидрогелей можно получать функциональные материалы, способные не только аккумулировать значительное количество воды, но и сорбировать из растворов различные вещества.

Водные растворы от работы ядерных реакторов являются жидкими радиоактивными отходами (ЖРО), которые требуют предотвращения текучести, а также надежного связывания радионуклидов, содержащихся в них. Известен способ применения гидрогелей на основе крахмала и частиц магнетита для дезактивации модельных растворов, содержащих растворимые соли урана [8]. Известен способ получения гидрогелей на основе целлюлозы и гексацианоферрата калия для удаления ионов цезия-137 из водных растворов [9] и их использования для сорбции ионов цезия из различных модельных растворов, в том числе и содержащих другие ионы. Данный сорбент показал высокую сорбционную емкость в отношении ионов цезия.

©А. Кливенко, Г. Елемесова, В. Бакланов, О. Букина, Ю. Бакланова, 2026

Исследование синтеза и характеристик новых двухфазных гибридных композиционных гидрогелей, состоящих из интеркалированных комплексов природного минерала бентонита с гексаферроцианидом меди, которые вводятся в объем полимерной матрицы. Установлено, что последовательная модификация бентонита гексаферроцианидом меди и введение в его объем сшитых сополимеров акриламида и акриловой кислоты путем полимеризации in situ способствуют формированию гетерогенной пористой структуры в полученном гибридном материале. Показана высокая сорбционная способность полученного гибридного композита по отношению к радионуклидам (ЖРО и описан механизм связывания ионов металлов-радионуклидов с компонентами гибридной композиции [10]. Целью настоящего исследования была разработка полимерного гидрогеля, способного набухать в водных средах, иметь достаточную механическую прочность, степень набухания и термическую стабильность для эффективной сорбции жидких радиоактивных отходов.

Материалы и методы

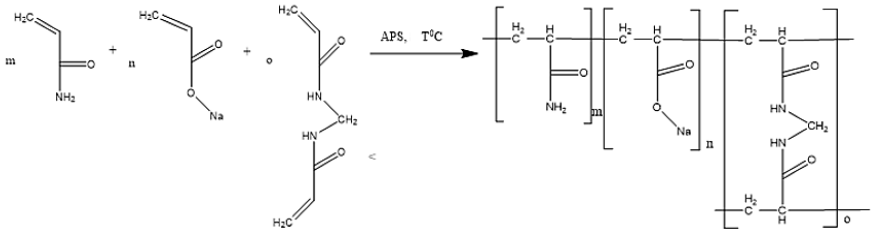
Синтез гидрогелей

Полиэлектролитные гидрогели различного на основе акриламида (AAm) и акрилата натрия (SA) были получены методом свободнорадикальной сополимеризации. Для синтеза гидрогелей, заданные количества мономеров, сшивающего агента и бентонита растворяли в дистиллированной воде при постоянном перемешивании. Акрилат натрия (SA) предварительно получали нейтрализацией акриловой кислоты раствором гидроксида натрия. В полученный раствор добавляли рассчитанные количества инициаторов – 10%-ных растворов персульфата аммония (ПСА) и тетраметилэтилендиамина (TMED) по 0,1 мл каждого, после чего смесь тщательно перемешивали до полного растворения компонентов. Реакционную смесь помещали в синтетическую емкость и продували аргоном в течение 15-20 минут для удаления растворённого кислорода. Процесс свободнорадикальной сополимеризации проводили при температуре 60°C в течение 3 часов при постоянном перемешивании. Образовавшийся гидрогель нарезали на фрагменты толщиной около 0,5 см, высушивали при комнатной температуре и использовали для последующих исследований. В результате синтеза была получена серия образцов с переменным исходным составом. Вариации исходных смесей представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Соотношения масс реагентов для синтеза полиэлектролитных гидрогелей с изменением соотношения мономеров AAм/SA

Соотношение AAм/SA, %	95/5	90/10	85/15	80/20	75/25
Состав исходных мономерных смесей	Масса, г				
Бентонит	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Вода	9	9	9	9	9
MBAA	0.0107	0.0107	0.0107	0.0107	0.0107
AAm	0.4645	0.4151	0.4068	0.3903	0.2430
SA	0.0248	0.0742	0.0825	0.0990	0.2464

На рисунке 1 приведена схема получения гидрогелей.



APS – персульфат аммония

Рисунок 1 – Схема получения гидрогелей на основе AAm-SA

Исследование кинетики набухания гидрогелей

Кинетика набухания гидрогелей изучалась в деионизированной воде методом гравиметрического анализа. Для этого предварительно высушенные и взвешенные образцы гидрогеля помещали в ёмкость с дистиллированной водой при температуре 24 °C и оставляли

для набухания. Через заданные промежутки времени (5, 10, 15, 30, 60, 180, 1440, 2880 и 4320 минут) образцы извлекали из раствора, аккуратно удаляли излишки влаги с поверхности при помощи фильтровальной бумаги и вновь взвешивали. После измерения образцы возвращали в ту же среду для продолжения процесса набухания.

Степень набухания гидрогелей определяли по формуле:

$$SD = \frac{m_t - m_0}{m_0}$$

где

SD – степень набухания гидрогеля, г/г

m_t – масса образца в момент времени, г

m_0 – масса сухого образца, г

Исследования влияния различных факторов на степень набухания гидрогелей

Степень набухания гидрогелей определяли гравиметрическим методом. Для этого предварительно высушенный образец помещали в стакан с дистиллированной водой или раствором и выдерживали в течение 24 часов до достижения равновесного состояния. После этого образец извлекали, удаляли влагу с поверхности фильтровальной бумагой и взвешивали. При исследовании влияния температуры измерения выполнялись при температурах 20°C, 40°C, 60°C и 80°C. При исследовании влияния ионной силы исследование проводили в водных растворах с различной концентрацией хлорида натрия (от 1 до 150 г/л). При исследовании влияния pH эксперименты проводились в растворах с различным значением pH от 2 до 12.

Исследование механических свойств гидрогелей

Механические характеристики гидрогелей были изучены с использованием текстурного анализатора TA.XTplus (Stable Micro Systems, Mason Technology, Великобритания). Измерения проводились в режиме сжатия при комнатной температуре. Каждый образец тестировался трижды, после чего рассчитывались средние значения полученных данных. Для приложения нагрузки к образцу использовался цилиндрический стальной зонд P/75 диаметром 75 мм, регистрирующий изменения сжимающей силы в зависимости от расстояния и времени. По полученным данным строились диаграммы зависимости «напряжение-деформация».

Параметры испытаний были следующими:

- начальная скорость перемещения зонда – 1 мм/с;
- скорость тестирования – 0,5 мм/с;
- сила отпускания – 0,2 г;
- режим «удалённая цель» с расстоянием 1,5 мм.

Значение напряжения (σ), выражающее силу, приходящуюся на единицу площади, рассчитывали по формуле:

$$\sigma = F/S$$

где F – максимальная сила сжатия, а S – площадь основания зонда.

Термогравиметрическое исследование гидрогелей

Термическую стабильность гидрогелей исследовали с использованием термоанализатора STA 449 F3 Jupiter (Shimadzu, Япония). Образцы массой 8 мг подвергали нагреву в диапазоне температур 25-800°C со скоростью 10 °C/мин в атмосфере азота.

Результаты и их обсуждение

Исследование степени набухания гидрогелей показало, что образцы состава AAm_{85}/SA_{15} имеют наибольшую степень набухания (рис. 2). Таким образом с ростом содержания акриалата натрия в составе наблюдается увеличение степени набухания. Такой эффект объясняется тем, что заряженные звенья акрилата натрия при диссоциации растягивают полимерную цепь за счет электростатического отталкивания одноименно заряженных звеньев.

На рисунке 3 представлены образцы гидрогелей как в сухом, так и в набухшем состоянии.

Изображение позволяет визуально оценить различие в размерах набухшего и высушенного образцов гидрогелей.

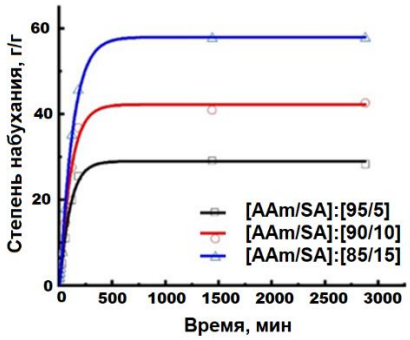


Рисунок 2 – Зависимость степени набухания гидрогелей от времени

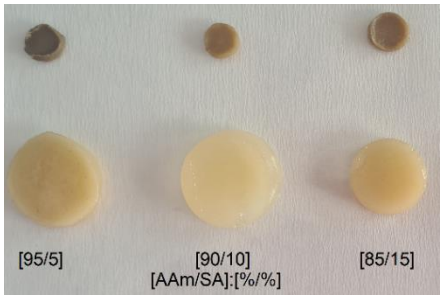


Рисунок 3 – Высушенные (верхний ряд) и набухшие (нижний ряд) образцы гидрогелей

Влияние ионной силы на степень набухания гидрогелей

На рисунке 4 показана зависимость степени набухания полиэлектролитных гидрогелей от концентрации соли в растворе.

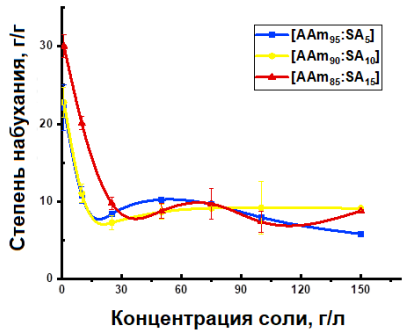


Рисунок 4 – Зависимость степени набухания гидрогелей от концентрации соли

Как видно из рисунка 4, степень набухания гидрогелей заметно снижается с ростом концентрации соли. Резкое уменьшение степени набухания в 3 раза при повышении концентрации соли от 0 до 20 г/л объясняется уменьшением осмотического давления между полимерной матрицей и внешним раствором. В растворах с высокой ионной силой происходит экранирование зарядов на полимерных цепях и снижение разности осмотического давления, которая является основной движущей силой процесса набухания. В результате уменьшается проникновение воды внутрь геля, и равновесная степень набухания достигает более низких значений.

Влияние температуры на степень набухания гидрогелей

Хотя химическая структура синтезированных гелей не предполагает значительного изменения объема гелей от температуры, тем не менее влияние температуры на степень набухания гелей изучалось. На рисунке 5 показана зависимость степени набухания гидрогелей температуры раствора.

Как видно из рисунка 5, с повышением температуры до 80°C наблюдается заметное увеличение способности гидрогелей к набуханию. В целом для гидрогелей повышение температуры способствует росту степени набухания.

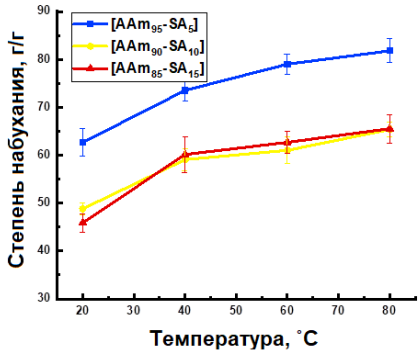


Рисунок 5 – Зависимость степени набухания гидрогелей от температуры

Такое поведение связано с увеличением кинетической энергии молекул воды при более высокой температуре, что облегчает их проникновение в полимерную сетку и ускоряет процесс диффузии. Кроме того, частичное ослабление межмолекулярных водородных связей внутри полимера при нагревании способствует увеличению подвижности макромолекулярных цепей, что также приводит к расширению структуры и росту степени набухания.

Влияние кислотно-щелочной среды на степень набухания гидрогелей

На рисунке 6 представлена зависимость степени набухания гидрогелей от pH среды.

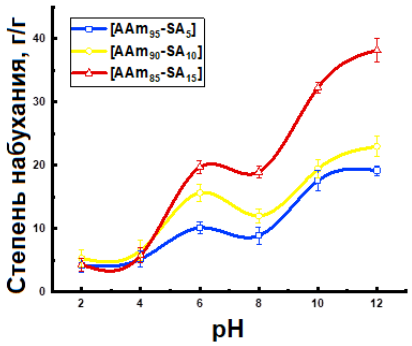


Рисунок 6 – Влияние значения pH на степень набухания гидрогелей

Как показано на рисунке 6, в кислой среде степень набухания гидрогелей возрастает по мере увеличения pH. Этот эффект связан с уменьшением концентрации протонов, которые в кислой среде экранируют отрицательно заряженные группы полимера, ослабляя электростатическое отталкивание между ними. При повышении pH зарядовая плотность на полимерных цепях возрастает, что способствует усилению электростатического отталкивания и, следовательно, расширению структуры геля. В диапазоне pH 6-8 степень набухания остается практически постоянной, что указывает на достижение равновесия между ионизированными ($–COO^-$) и недиссоциированными (–COOH) группами, обеспечивающего стабильную структуру геля. При pH выше 8 происходит полная ионизация карбоксильных групп с образованием карбоксилатных форм ($–COO^-$), что может вызывать частичный гидролиз полимерной матрицы. Это приводит к снижению прочности структуры и повышению водопроницаемости, в результате чего наблюдается дополнительное увеличение степени набухания гидрогеля.

Исследование механической прочности гидрогелей

Механическая прочность гидрогелей количественно оценивается модулем Юнга, который рассчитывается как тангенс угла наклона кривой зависимости приложенного напряжения от степени деформации образца. На рисунке 7 представлены зависимости модулей Юнга гидрогелей от их состава.

Как видно из рисунка 7 с уменьшением содержания акриламида и увеличением доли акрилата натрия модуль Юнга снижается, так как акриламид формирует плотную и жесткую сетку, а акрилат натрия повышает гидрофильность и приводит к образованию более рыхлой и менее упругой структуры, что уменьшает механическую прочность гидрогелей.

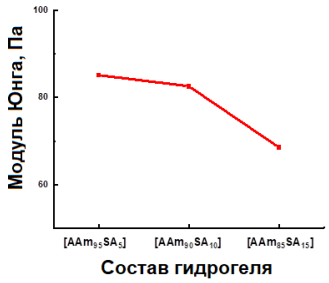


Рисунок 7 – Модуль Юнга гидрогелей в зависимости от состава AAm-SA

Механическая прочность гидрогелей определяется плотностью сшивок в их трёхмерной сетчатой структуре, которая напрямую зависит от концентрации мономеров в исходной смеси. При более высоком содержании мономеров в процессе полимеризации образуется больше реакционноспособных центров, участвующих в реакциях сшивания. Это способствует формированию большего количества ковалентных связей между полимерными цепями и, соответственно, более плотной сетчатой структуры. При этом с ростом содержания мономера и сшивающего агента уменьшается размер пор между полимерными цепями, что приводит к образованию более компактной структуры. Такая плотная сеть ограничивает подвижность молекул воды внутри матрицы гидрогеля, способствуя повышению его механической стабильности.

Термогравиметрическое исследование гидрогелей

Термогравиметрический анализ гидрогеля, показывает многостадийный характер термической деструкции (рис. 8).

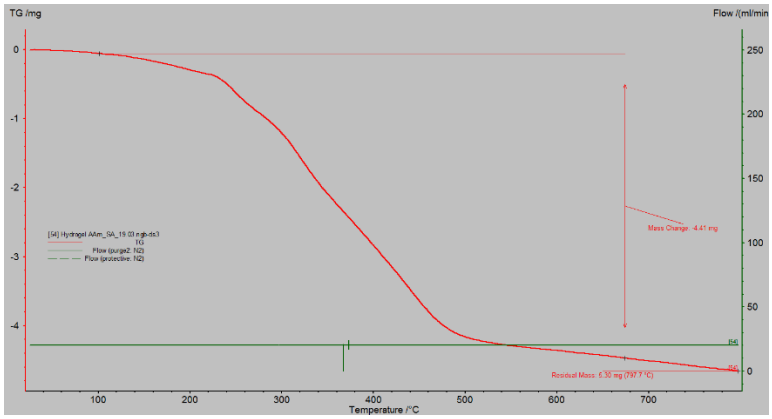


Рисунок 8 – Термогравиметрическая кривая гидрогеля AAm_{95}-SA_5

На начальном участке до приблизительно 180-200°C наблюдается незначительное снижение массы, которое может быть связано преимущественно с удалением физически сорбированной и связанной воды из полимерной сетки. Относительно небольшая величина этой потери свидетельствует о том, что перед анализом образец был достаточно хорошо высушен.

В интервале приблизительно 200-250°C появляется более выраженное изменение массы, что может быть связано с началом термической деструкции полимерной сетки и изменением структуры функциональных групп полиакриламидного фрагмента. Основная потеря массы наблюдается в диапазоне примерно 250-500°C. Этот участок соответствует интенсивной термодеструкции полимерной матрицы и, вероятно, включает несколько перекрывающихся процессов, связанных с разрушением амидных групп полиакриламида, деградацией углеродной цепи, а также термическими превращениями карбоксилатных групп полиакрилата натрия.

После 500°C скорость потери массы существенно уменьшается. Тем не менее, постепенное снижение массы продолжается вплоть до температуры около 800 °C, что указывает на дальнейшее разложение термически устойчивых фрагментов полимерной сетки и формирование углеродсодержащего остатка. При конечной температуре анализа

остаточная масса составила около 5.30 мг, что соответствует приблизительно 54.6% первоначальной массы образца, тогда как общая потеря массы составила 4.41 мг (45.4%).

Таким образом, гидрогель демонстрирует относительно высокую термическую стабильность до порядка 200°C, после чего начинается последовательная термодеструкция полимерной сетки. Наиболее интенсивное разложение происходит в диапазоне 250-500°C. Наличие значительного остатка после нагревания до порядка 800°C может быть связано с образованием термостабильного углеродистого остатка, а также с наличием неорганических компонентов/натриевых продуктов превращения акрилатных групп.

Заключение

В результате проведённого исследования установлены основные закономерности изменения физико-химических и эксплуатационных характеристик гидрогелей на основе акриламида (AAm) и акрилата натрия (SA), сшитых N,N′-метиленбисакриламидом.

Установлено, что увеличение содержания акрилата натрия приводит к повышению степени набухания гидрогелей. Наибольшая степень набухания наблюдалась для состава AAm_{85}/SA_{15}, что связано с увеличением количества ионизированных карбоксилатных групп и усилением электростатического отталкивания между заряженными звеньями полимерной сетки.

Показано существенное влияние ионной силы раствора на набухание гидрогелей. При увеличении концентрации соли от 0 до 20 г/л степень набухания снижается примерно в 3 раза вследствие экранирования зарядов полимерной сетки и уменьшения осмотической разности между гидрогелем и внешним раствором.

Повышение температуры среды до 80°C, напротив, сопровождается увеличением степени набухания. Это связано с повышением подвижности молекул воды и макромолекулярных цепей, а также облегчением диффузии воды в трёхмерную полимерную сетку.

Исследование влияния pH показало увеличение степени набухания в кислой области при повышении pH, практически постоянную степень набухания в диапазоне pH 6-8 и дополнительное увеличение набухания при pH > 8. Наблюдаемая зависимость обусловлена изменением степени ионизации карбоксильных групп полимерной сетки и, при высоких значениях pH, возможным частичным гидролизом полимерной матрицы.

Установлено, что увеличение доли акрилата натрия сопровождается снижением модуля Юнга. Повышение содержания акриламида и сшивающего агента, напротив, способствует формированию более плотной трёхмерной сетки, уменьшению размеров пор и повышению механической стабильности гидрогелей. Таким образом, изменение соотношения AAm/SA позволяет регулировать соотношение между способностью к набуханию и механической прочностью материала.

Термогравиметрический анализ образца AAm_{95}/SA_5 показал многостадийный характер термической деструкции. До 180-200°C наблюдается преимущественно удаление сорбированной и связанной воды, тогда как наиболее интенсивная потеря массы происходит в диапазоне 250-500°C и связана с деструкцией органической полимерной матрицы. При температуре около 800°C остаточная масса составляет 54,6%, при общей потере массы 45,4%. Полученные результаты свидетельствуют о достаточно высокой термической стабильности гидрогеля до ~200°C и наличии значительной термически устойчивой остаточной фазы после высокотемпературной обработки.

В целом результаты показывают, что состав AAm/SA может быть использован в качестве гидрогелевого сорбента жидких радиоактивных отходов. Выявленные закономерности позволяют целенаправленно подбирать состав полимерной сетки в зависимости от требований к её водопоглощающей способности, механической стабильности и устойчивости в различных эксплуатационных условиях.

Список литературы

1. Filippova O.E. «Umnye» polimernye gidrogeli / O.E. Filippova // Priroda. – 2005. – № 8. – S. 11-17. https://vivovoco.astronet.ru/VV/JOURNAL/NATURE/08_05/GELS.HTM.Preparation and characterization of a preformed polyampholyte particle gel composite for conformance control in oil recovery / I. Gussenov et al // Polymers. – 2023. – Vol. 15, № 20, Art. 4095. https://doi.org/10.3390/polym15204095. (in Russian).

2. Preparation and characterization of preformed polyelectrolyte and polyampholyte gel particles for plugging of high-permeability porous media / G. Yelemessova et al // Gels. – 2024. – Vol. 10, № 9, Art. 562. https://doi.org/10.3390/gels10090562.
3. Synthesis and characterization of preformed particle gels (PPG) to increase oil recovery / G.T. Yelemessova et al // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Chemistry and Technology. – 2023. – № 4. – P. 79-91. https://doi.org/https://doi.org/10.32014/2023.2518-1491.194.
4. Restoring the natural vegetation on strongly eroded volcanic soils of Cape Verde (West Africa) / W. Van Cotthem et al // Soil Technology. – 1991. – Vol. 4, № 2. – P. 183-189. https://doi.org/10.1016/0933-3630(91)90030-Q.
5. Hydrophobic aggregation in aqueous solutions of hydrophobically modified polyacrylamide in the vicinity of overlap concentration / Y. Shashkina et al // Polymer. – 2003. – Vol. 44, № 8. – P. 2289-2293. https://www.x-mol.com/paper/5166314.
6. Gussenov I. Bulk gels for permeability reduction in fractured and matrix reservoirs / I. Gussenov, N. Nuraje, S. Kudaibergenov // Energy Reports. – 2019. – Vol. 5. – P. 733-746. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.06.012.
7. Surface decontamination of uranium using a starch-based magnetic strippable hydrogel / J. Li et al // Nuclear Engineering and Design. – 2025. – Vol. 442, Art. 114199. https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2025.114199.
8. Nanostructured potassium copper hexacyanoferrate-cellulose hydrogel for selective and rapid cesium adsorption / Y. Kim et al // Chemical Engineering Journal. – 2017. – Vol. 313. – P. 1042-1050. https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.10.136.
9. Mamytbekov G.K. Synthesis and investigation of the properties of biphasic hybrid composites based on bentonite, copper hexacyanoferrate, acrylamide and acrylic acid hydrogel / G.K. Mamytbekov, D.A. Zheltov, Y.R. Nurtazin // Polymers. – 2023. – Vol. 15, № 12, Art. 2586. https://doi.org/10.3390/polym15122586.

Благодарности: *Исследования выполнены при финансовой поддержке КН МНВО РК в рамках программно-целевого финансирования BR24993140 «НИР по обоснованию выбора и реализации технологии переработки жидких радиоактивных отходов».*

А. Кливенко[1]*, Г. Елемесова[1], В. Бакланов[2] , О. Букина[2] , Ю. Бақланова[2]
[1]Шәкәрім университеті ,
071412 Қазақстан Республикасы, Семей қ., көш. Глинки, 20А
[2]Қазақстан Республикасы Ұлттық ядролық орталығының Атом энергиясы институты
180010 Қазақстан Республикасы, Курчатов қаласы, Бейбіт атом көшесі, 10
*e-mail: alexeyklivenko @ mail.ru

СҰЙЫҚ РАДИОАКТИВТІ ҚАЛДЫҚТАРДЫ СОРБЦИЯЛАУҒА АРНАЛҒАН КАНДИДАТ МАТЕРИАЛДАР РЕТІНДЕ ПОЛИМЕРЛІК ГИДРОГЕЛЬДЕРДІҢ СИНТЕЗІ ЖӘНЕ ҚАСИЕТТЕРІ

Акриламид (AAm) және натрий акрилаты (SA) негізіндегі полиэлектролит гидрогельдерінің сериясы синтезделіп, n,n'-метилен-бис-акриламидпен өзара байланысқан, мономерлердің әртүрлі қатынасы бар. Үлгілер еркін радикалды сополимерлеу әдісімен алынады, содан кейін олардың судағы ісіну дәрежесі, ортаның иондық күшіне, температураға және pH сезімталдығы, механикалық сипаттамалары мен термиялық тұрақтылығы зерттеледі. Натрий акрилатының үлесінің жоғарылауы иондалған карбоксилат топтарының концентрациясының жоғарылауына және полимерлі тор фрагменттері арасындағы электростатикалық итерудің жоғарылауына байланысты судың сіңуінің жоғарылауына әкелетіні анықталды. Сонымен қатар, Юнг Модулінің төмендеуі байқалады, бұл материалдың қаттылығының төмендеуін көрсетеді. Тұз концентрациясының жоғарылауы зарядтардың антиондармен қорғалуына байланысты ісіну дәрежесінің шамамен үш есе төмендеуіне әкеледі. Керісінше, температураның 80 °C дейін көтерілуі және ортаның pH жоғарылауы гидрогельдердің ісінуіне ықпал етеді. Термогравиметриялық талдау термиялық деструкцияның көп сатылы сипатын және үлгілердің жоғары тұрақтылығын 200°C дейін сақтауды көрсетті. алынған нәтижелер гидрогельдердің физика-химиялық және механикалық қасиеттерін AAm/SA қатынасын өзгерту арқылы бағытталған реттеу мүмкіндігін растайды және оларды пайдаланудың практикалық жағдайларында әртүрлі құрамдағы сұйық радиоактивті қалдықтарды тазарту және өңдеу үшін тиімді сорбенттер ретінде әзірленген материалдардың перспективасын көрсетеді.

Түйін сөздер: *полимер гидрогельдері, акриламид, сұйық радиоактивті қалдықтар, механикалық беріктік, термиялық тұрақтылық, ісіну дәрежесі.*

A. Klivenko[1]*, G. Elemesova[1] , V. Baklanov[2] , O. Bukina[2] , Yu. Baklanova[2]
[1]Shakarim University,
071412 Republic of Kazakhstan, Semey, st. Glinki, 20 A
[2]Institute of Atomic Energy of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan
180010 Republic of Kazakhstan, Kurchatov city, Beybit atom street 10
*e-mail: alexeyklivenko @ mail. ru

SYNTHESIS AND PROPERTIES OF POLYMER HYDROGELS AS CANDIDATE MATERIALS FOR THE SORPTION OF LIQUID RADIOACTIVE WASTE

A series of polyelectrolyte hydrogels based on acrylamide (AAm) and sodium acrylate (SA) crosslinked with N,N'-methylene bis-acrylamide with different monomer ratios has been synthesized. The samples were obtained by free radical copolymerization, after which their equilibrium degree of swelling in water, sensitivity to the ionic strength of the medium, temperature and pH, as well as mechanical characteristics and thermal stability were studied. It was found that an increase in the proportion of sodium acrylate leads to an increase in water absorption due to an increase in the concentration of ionized carboxylate groups and increased electrostatic repulsion between polymer mesh fragments. At the same time, there is a decrease in the Young's modulus, indicating a decrease in the stiffness of the material. An increase in the salt concentration causes an approximately threefold decrease in the degree of swelling due to the shielding of charges by counterions. On the contrary, an increase in temperature to 80°C and an increase in the pH of the medium contribute to the swelling of hydrogels. Thermogravimetric analysis showed the multi-stage nature of thermal degradation and the preservation of high stability of samples up to 200 °C. The results obtained confirm the possibility of directional regulation of the physico-chemical and mechanical properties of hydrogels by changing the AAm/SA ratio and demonstrate the prospects of the developed materials as effective sorbents for the purification and processing of liquid radioactive waste of various compositions in practical conditions of their operation.

Key words: *polymer hydrogels, acrylamide, liquid radioactive waste, mechanical strength, thermal stability, swelling degree.*

Сведения об авторах

Алексей Николаевич Кливенко* – PhD, ассоциированный профессор, директор Shakarim Lab, Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: alexeyklivenko@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8971-686X.

Гульнур Тайбековна Елемесова – PhD, руководитель лаборатории анализа кормов и почв Shakarim Lab, Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: kussainova_g91@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1074-7111.

Виктор Владимирович Бакланов – PhD, ассоциированный профессор, Директор филиала «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Республика Казахстан; e-mail: baklanov@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/ 0000-0001-7627-8752.

Юлия Юрьевна Бакланова – начальник отдела материаловедческих испытаний, филиала «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Республика Казахстан; e-mail: basalai@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/ 0000-0003-3310-4159.

Ольга Сергеевна Букина – начальник лаборатории испытаний конструкционных и топливных материалов; филиал Институт атомной энергии РГП «Национальный ядерный центр Республики Казахстан», Казахстан; e-mail: o.bukina@inbox.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2564-0421.

Авторлар туралы мәліметтер

Алексей Николаевич Кливенко – PhD, қауымдастырылған профессор, Shakarim Lab директоры, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: alexeyklivenko@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8971-686X.

Гульнур Тайбековна Елемесова – PhD, Shakarim Lab жем-шөп талдау зертханасының жетекшісі, Шәкәрім университет, Қазақстан Республикасы; e-mail: kussainova_g91@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1074-7111.

Виктор Владимирович Бакланов – PhD, қауымдастырылған профессор, ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалының директоры, Қазақстан Республикасы; e-mail: baklanov@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/ 0000-0001-7627-8752.

Юлия Юрьевна Бакланова – ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалының материалтану сынақтары бөлімінің жетекшісі, Қазақстан Республикасы; e-mail: basalai@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/ 0000-0003-3310-4159.

Ольга Сергеевна Букина – конструкциялық және отын материалдарын сынау зертханасының жетекшісі, «Қазақстан Республикасының Ұлттық ядролық орталығы» РМК Атом энергиясы институты филиалы, Қазақстан Республикасы; e-mail: o.bukina@inbox.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2564-0421.

Information about the authors

Alexey Klivenko – PhD, Associate Professor, Director of Shakarim Lab, Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: alexeyklivenko@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8971-686X.

Gulnur Yelemessova – PhD, head of the feed Analysis Laboratory Shakarim Lab, Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: kussainova_g91@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1074-7111.

Viktor Baklanov – PhD, associate professor, Director of the branch «Institute of Atomic Energy» of the RSE NNC RK, Republic of Kazakhstan; baklanov@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/ 0000-0001-7627-8752.

Yulia Baklanova – Head of the Department of Materials Science Testing, «Institute of Atomic Energy» RSE NNC RK, Republic of Kazakhstan; e-mail: basalai@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/ 0000-0003-3310-4159.

Olga Bukina – Head of the Laboratory for Testing Structural and Fuel materials, Branch of the Institute of Atomic Energy of the RSE «National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan», Kazakhstan; e-mail: o.bukina@inbox.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2564-0421.

Поступила в редакцию 03.06.2026
Поступила после доработки 25.07.2026
Принята к публикации 03.09.2026

АВТОРЛАРҒА АРНАЛҒАН ЕРЕЖЕ

Ғылыми мақала бұрын жарияланбаған және жаңалығы бар авторлық әзірлемелерді, қорытындыларды, ұсыныстарды қамтитын ғылыми зерттеудің, эксперименттік немесе аналитикалық қызметтің бастапқы, аралық немесе түпкілікті нәтижелерінің мәтіндік материалы болуы тиіс. Ғылыми мақалаға жалпы тақырыппен байланысты бұрын жарияланған ғылыми нәтижелерді зерттеуге және талдауға арналған жұмыс кіреді (шолу мақаласы), онда жалпылама тұжырымдар мен ұсыныстар келтірілген.

«Шәкәрім университетінің хабаршысы. Техникалық ғылымдар бөлімі» ғылыми журналы қазақ, орыс, ағылшын тілдеріндегі қолжазбаларды қабылдайды.

Журналдың жиілігі-тоқсанына 1 рет (жылына 4 Нөмір).

Мақала электрондық форматта (.doc, .docx, .rtf) tech.vestnik.shakarim.kz журнал веб-сайтының жүктеу функционалдығы арқылы беріледі.

Порталмен жұмыс істеу үшін tech.vestnik.shakarim.kz сайтына тіркелу қажет.

Журналға жариялау үшін келесі бағыттар бойынша мақалалар қабылданады:

- Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар
- Машина жасау және механика
- Тамақ инженериясы және биотехнология
- Техникалық физика және жылу энергетикасы
- Химиялық технология

Материалдарды ресімдеуге қойылатын талаптар

Мақала жиектердің келесі өлшемдерімен ресімделеді: парақтың шетінен шегініс – 2,0 см. Қаріп өлшемі – 11, жоларалық интервал – 1,0, қаріп гарнитурасы – Arial.

Ғылыми мақаланың құрылымы

Структура научной статьи должна включать следующие элементы:

Ғылыми мақаланың құрылымы келесі элементтерді қамтуы керек:

- ҒТАХА индексі (ғылыми-техникалық ақпараттың халықаралық айдары) – беттің сол жақ шетінен көрсетіледі. ҒТАХА индексінің мақаласын тағайындау үшін www.grnti.ru сайтын пайдалану қажет).
- Авторлар туралы мәлімет – ортадағы жол арқылы жазылады:
  - мақала авторының аты-жөні және тегі (алдымен аты-жөні, содан кейін тегі – А.К. Қалиев), қаріп-қалың;
  - автордың (лардың) жұмыс орны-ЖОО (ұйымның), қаланың, елдің атауы;
  - корреспондент-автордың байланыс ақпараты (e-mail).
- Мақаланың атауы (тақырыбы) – жол арқылы, қалың қаріппен, ортасына туралanады. Ол мазмұнды дәл көрсетуі керек, қысқа және нақты болуы керек. Тақырыптағы сөздерді қысқартуға жол берілмейді.
- Аннотация – зерттеудің негізгі мәнінің, зерттеу әдістері мен объектілерінің қысқаша мазмұнын, ең маңызды нәтижелерін, олардың маңыздылығын, ғылыми және тәжірибелік құндылығын қысқаша баяндайды. Аннотация мақала атауынан кейінгі жол арқылы курсивпен орналастырылады. Аннотация көлемі –150-300 сөз.
- Түйін сөздер – мақаланы іздеуге және оның тақырыптық аймағын анықтауға арналған.Түйін сөздердің саны-5-8, курсивпен жазылады.
- Мақаланың негізгі мәтіні – жол арқылы:
  - Кіріспе – өзектіліктің көрінісі;
  - Зерттеу шарттары мен әдістері;
  - Зерттеу нәтижелері;
  - Ғылыми нәтижелерді талқылау;
  - Қорытынды;
  - Пайдаланылған әдебиеттер тізімі – мақала жазылған тілде және ағылшын тілінде рәсімделеді.

- Қаржыландыру туралы ақпарат (бар болса).
- Мақаланың соңында автордың (авторлардың) аты-жөні, ғылыми дәрежесі, атағы, жұмыс орны; ЖОО-ның (ұйымның), қаланың, елдің атауы; әрбір автор үшін байланыс ақпараты (e-mail); мақаланың тақырыбы (атауы); аннотация; мақала тілінен ерекшеленетін екі тілдегі түйінді сөздер келтіріледі (қазақ/орыс, ағылшын).

Материалдардың көлемі, әдетте, мәтінді, суреттерді, кестелерді қоса алғанда, 3 беттен кем болмауы және 8 беттен аспауы тиіс.

Авторлар саны **5 адамнан** аспауы керек.

Суреттерді, карталарды, фотосуреттерді, кестелерді, формулаларды компьютерлік техниканың қолдана отырып орындау және олар туралы айтылғандай мақалада орналастыру ұсынылады. Суреттердің реттік нөмірлері араб цифрларымен белгіленеді, суреттің атауы суреттің астында ортасына келтіріледі (1 – сурет-суреттің атауы).

Кестелер мақаланың мәтінінде бірінші сілтемеден кейін немесе келесі бетте көрсетіледі. Кестенің нөмірі мен атауы беттің сол жағында келтірілген (1 – кесте-кестенің атауы). Кестені келесі бетке ауыстырған жағдайда бағандар нөмірленеді және келесі бетте оң жағында кестенің жалғасы (1 – кестенің жалғасы) көрсетіледі.

Әдебиеттерді ресімдеу тәртібі:

- литература располагается по мере упоминания в тексте;
- Әдебиет мәтінде айтылғандай орналастырылады;
- мәтін бойынша квадрат жақшада сілтеме берілген жұмыстың реттік нөмірі көрсетіледі;
- әдебиеттерді рәсімдеу МЕМСТ 7.1-2003 «Библиографиялық жазба. Библиографиялық сипаттама. Құрастырудың жалпы талаптары мен ережелері»;
- анықтамалық әдебиеттерді дайындау кезінде басылым авторларының толық тізімін (басқаларынсыз) көрсетіңіз.

Әдебиеттер тізімін құрастыру мысалдары

1. Аксартов Р.М. Леукомизинді сандық анықтау әдісі / Р.М. Аксартов, М.И. Айзиков, С.А. Расулова // ҚазҰУ Хабаршысы. Сер. хим. – 2003. – Т. 5, № 8. – Б. 40-41.
2. Курмуков А.А. Леуомизиннің ангиопротекторлық және гиполипидемиялық белсенділігі / А.А. Курмуков. – Алматы: Бастау, 2007. – 148 б.
3. Абимульдина С.Т. Қант өндірісі инфрақұрылымының жұмыс істеуі және дамуы / С.Т. Абимульдина, Г.Е. Сыдыкова, Л.А. Оразбаева // Қазақстанның аграрлық секторындағы Инновация: Матер. Халықарал. конф. / ҚазҰУ. Әл-Фараби атындағы қазұу. – Алматы, 2010. – Б.10-13.
4. Соколовский Д.В. Өзін-өзі реттейтін камера жетектерінің механизмдерін синтездеу теориясы [Электрондық. ресурс] / Д.В. Соколовский. – 2006. – URL: http://bookchamber.kz/stst_2006.htm (қарау күні 12.03.2009).

Автор мақаланы жібергеннен кейін журнал редакциясы ұсынылған жұмысты екі апта ішінде оның талаптарға сәйкестігін тексеру мақсатында (антиплагиат, дизайн, рецензия және т.б.) қарайды.

Журнал редакциясы мақаланы қабылдау туралы оң шешім қабылдаған жағдайда, авторларға жарияланымға ақы төлеу үшін тиісті хабарлама жіберіледі.

Мақала журнал талаптарына сәйкес келмеген жағдайда авторлар электрондық поштаға хабарлама арқылы хабарланатын болады.

Журналдың редакциясы келіп түскен жұмысты рецензиялауға дербес жібереді. Журнал мақаланы авторын жасырып (*Double-blind review*), екі рецензиялаудан өткізеді.

Журналдың редакциясы мақаланың ұқсастығының бар-жоғына тексеруді жүзеге асырады (лицензиялық бағдарламалық қамтамасыз ету пайдаланылады). Мәтіннің өзіндік ерекшелігі **кемінде 75%** болуы керек. Мақалалардағы өзін-өзі сілтеме жасау үлесі 15%-дан аспауы керек. Түпнұсқалықтың қажетті пайызын алмаған мақала авторға пысықтауға жіберіледі. Бірінші және екінші тексерулер тегін, үшінші тексеру – 2000 теңге. Үшінші тексеруден кейін теріс нәтиже алынған жағдайда, мақала журналға жариялауға жіберілмейді.

Мақаланы рәсімдеу үлгісі

ҒТАХА: 32.61.11

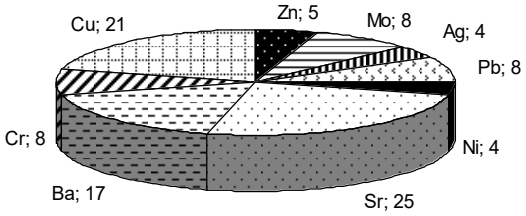
М.А. Смагулов[1*], С.А. Зайцев[2], М.М. Искакова[1], А.К. Каримов[3]
[1]Шәкәрім университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинка к-сі, 20 А
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А
[2]Мәскеу мемлекеттік университеті,
119991, Ресей Федерациясы, Мәскеу, Ленин таулары, 1-үй
[3]әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,
050040, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Әл-Фараби даңғылы, 71
*e-mail: smagulov@mail.ru

АУЫР МЕТАЛДАРДЫҢ БИОГЕОХИМИЯЛЫҚ МИГРАЦИЯСЫ ЖӘНЕ ЖИНАҚТАЛУЫ

Аңдатпа*: Мақалада зерттеу нәтижелері келтірілген.....…*
Түйін сөздер: *қоршаған орта, биолог, табиғат,.....*

Кіріспе

Ландшафт компоненттерінің Биогеохимиялық қасиеттерін қалыптастыруда атмосфералық, су және биогендік көші-қон маңызды рөл атқарады. Барлық табиғи сулардың ішінде жауын-шашында айтарлықтай өзгерістер байқалады. Қардағы элементтердің шоғырлануы ауа температурасына, ластану көзіне қатысты жел бағытының бағытына, одан қашықтығына, жер бедеріне байланысты [1]. Жауын-шашынның химиялық құрамындағы айырмашылықтар ауа массаларының күрделі қозғалыстарына байланысты. 1-суретте су қоймаларының мұзындағы ауыр металдардың құрамы көрсетілген.



1 сурет – Москворецкий жүйесінің су қоймаларының мұзында ауыр металдар құрамының таралуы

Зерттеу әдістері

Мәтін……

Зерттеу нәтижелері

Жаңбыр сулары құрамы бойынша сульфатты-бикарбонатты- және сульфатты-хлоридті-кальцийлі. Атмосферада шаңның шоғырлануына байланысты олардың минералдануы жоғары. Ландшафттың аудан бірлігіне жауын-шашынға есептелген ауыр металдардың басымдылығы қармен салыстырғанда жаңбырда (Sr, Pb, Cr, Zn, Ni) анықталды (1-кесте).

1 кесте – Қар мен жаңбырдағы ауыр металдардың құрамы, кг/га

№	Ауыр металдар	Қар	Жауын
1	Pb	$0,5x10^{-6}$	$0,2x10^{-4}$
2	Cr	$0,4x10^{-6}$	$1,6x10^{-3}$
3	V	$8,5x10^{-5}$	–
*Ескертпе **			

Ғылыми нәтижелерді талқылау
Мәтін……

Қорытынды
Мәтін……

Әдебиеттер тізімі

1. Курмуков А.А. Леуомизиннің ангиопротекторлық және гиполипидемиялық белсенділігі / А.А. Курмуков. – Алматы: Бастау, 2007. – 148 б.
2. Хрусталева М.А. Табиғи және антропогендік ландшафт компоненттеріндегі ауыр металдардың биогеохимиялық көші-қоны және жинақталуы / М.А. Хрусталева // 3-ші Халықаралық ғылыми конференцияның ғылыми еңбектер жинағы. – Семей қ.: СМУ баспасы Шәкәрім, 2012. – 1 Том. – Б. 368-373.
3. .....

References

1. Kurmukov A.A. Leuomizinnің angioprotektorlyқ zhəne gipolipidemiyalyқ belsendiligi / A.A. Kurmukov. – Almaty: Bastau, 2007. – 148 b.
2. Khrustaleva M.A. Tabiғi zhəne antropogendik landshaft komponentterindegi auyr metaldardyң biogeokhimiyalyқ kөshi-қony zhəne zhinaқtaluy / M.A. Khrustaleva // 3-shi Khalyқaralyқ ғylymi konferentsiyanyң ғylymi eңbekter zhinaғy. – Semei қ.: SMU baspasy Shəkərim, 2012. – 1 Tom. – B. 368-373.
3. .....

М.А. Смагулов[1*], С.А. Зайцев[2], М.М. Искакова[1], А.К. Каримов[3]
[1]Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А
[2]Московский государственный университет,
119991, Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, д. 1
[3]Казахский национальный университет имени аль-Фараби,
050040, Республика Казахстан, г. Алматы, пр. аль-Фараби, 71
[*]e-mail: smagulov@mail.ru

БИОГЕОХИМИЧЕСКАЯ МИГРАЦИЯ И АККУМУЛЯЦИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

Аннотация: *В статье приведены результаты исследования…….*
Ключевые слова: *среда, биолог, природа,…....*

M. Smagulov[1*], S. Zaitsev[2], M. Iskakov[1], A. Karimov[3]
[1]Shakarim University,
071412, Republic of Kazakhstan, Semey, 20 A Glinka Street
[2]Moscow State University, Moscow, Russia
119991, Russian Federation, Moscow, 1 Leninskie gory Street
[3]Al-Farabi Kazakh National University, Republic of Kazakhstan, Almaty
050040, Republic of Kazakhstan, Almaty, 71 Al-Farabi Avenue
*e-mail: smagulov@mail.ru

BIOGEOCHEMICAL MIGRATION AND ACCUMULATION HEAVY METALS

This article discusses the characteristics of the development of eco-geochemical changes in the biosphere. Analyzed discretely, and in particular the relationship of environmental, geochemical and ecological changes. We present the laws of development of ecological-geochemical changes in the biosphere…...
Key words:*…..*

Авторлар туралы мәліметтер

Максат Ануарбекович Смагулов* – техника ғылымдарының докторы, «Технологиялық жабдықтар және машина жасау» кафедрасының профессоры; Шәкәрім университеті, Қазақстан; e-mail: smagulov@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6369-3690.

Сергей Александрович Зайцев – «Физика және математика» кафедрасының физика-математика ғылымдарының кандидаты; Мәскеу мемлекеттік университеті, Ресей Федерациясы; e-mail: zaisev@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7057-0461.

Маржан Муратовна Искакова – «Технологиялық жабдықтар және машина жасау» кафедрасының докторанты; Шәкәрім университеті, Қазақстан; e-mail: iskakova@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4787-4966.

Айтбек Калиевич Каримов – «Автоматтандыру» кафедрасының аға оқытушысы; әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан; e-mail: karimov@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5378-2266.

Сведения об авторах

Максат Ануарбекович Смагулов* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологическое оборудование и машиностроение»; Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: smagulov@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6369-3690.

Сергей Александрович Зайцев – кандидат физико-математически наук кафедры «Физика и математика»; Московский государственный университет, Российская Федерация; e-mail: zaisev@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7057-0461.

Маржан Муратовна – докторант кафедры «Технологическое оборудование и машиностроение»; Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: iskakova@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4787-4966.

Айтбек Калиевич Каримов – старший преподаватель кафедры «Автоматизация»; Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Республика Казахстан; e-mail: karimov@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5378-2266.

Information about the authors

Maksat Smagulov* – doctor of technical sciences, professor of the department «Technological equipment and mechanical engineering»; Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: smagulov@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6369-3690.

Sergei Zaitsev – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Department of Physics and Mathematics; Moscow State University, Russian Federation; e-mail: zaisev@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7057-0461.

Marjan Iskakova – doctoral student of the department «Technological equipment and mechanical engineering»; Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: iskakova@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4787-4966

Aitbek Karimov – senior teacher at the Department of Automation; Al-Farabi Kazakh National University, Republic of Kazakhstan; e-mail: karimov@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5378-2266

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Научная статья должна представлять собой текстовый материал начальных, промежуточных или окончательных результатов научного исследования, экспериментальной или аналитической деятельности, содержащий авторские разработки, выводы, рекомендации, ранее не опубликованные и обладающие новизной. К научной статье относится также работа, посвященная изучению и анализу ранее опубликованных научных результатов, связанных общей темой (обзорная статья), в которой приводятся обобщающие выводы и рекомендации.

В научный журнал «Вестник Университета Шакарима. Серия технические науки» принимаются рукописи на казахском, русском, английском языках.

Периодичность журнала – 1 раз в квартал (4 номера в год).

Статья подается в электронном формате (.doc, .docx, .rtf) посредством загрузки через функционал веб-сайта журнала tech.vestnik.shakarim.kz

Для работы с порталом необходимо зарегистрироваться на сайте tech.vestnik.shakarim.kz

Для публикации в журнал принимаются статьи по следующим направлениям:

- Автоматизация и информационные технологии
- Машиностроение и механика
- Пищевая инженерия и биотехнология
- Техническая физика и теплоэнергетика
- Химическая технология

Требования к оформлению материалов

Статья оформляется со следующими размерами полей: отступ от края листа – 2,0 см. Кегль шрифта – 11, межстрочный интервал – 1,0, гарнитура шрифта – Arial.

Структура научной статьи

Структура научной статьи должна включать следующие элементы:

- Индекс МРНТИ (международный рубрикатор научно-технической информации) – указывается с левого края страницы. Для присвоения статье индекса МРНТИ необходимо использовать сайт www.grnti.ru).
- Сведения об авторах – пишутся через строку по центру:
  - инициалы и фамилия автора(-ов) статьи (сначала инициалы, затем фамилия – А.К. Калиев), шрифт – полужирный;
  - место работы автора(-ов) – название вуза (организации), города, страны;
  - контактная информация (e-mail) автора-корреспондента.
- Название статьи (заголовок) – через строку, выделяется полужирным шрифтом, выравнивание по центру. Должно точно отражать содержание, быть кратким и лаконичным. Сокращение слов в заглавии не допускается.
- Аннотация – краткое изложение основной сути исследований, методов и объектов исследований, наиболее важных результатов, их значимость, научная и практическая ценность. Аннотация размещается через строку после названия статьи курсивом. Объем аннотации – 150-300 слов.
- Ключевые слова – предназначены для поиска статьи и определения ее предметной области. Количество ключевых слов – 5-8, оформляются курсивом.
- Основной текст статьи – через строку:
  - Введение – отражение актуальности;
  - Условия и методы исследования;
  - Результаты исследований;
  - Обсуждение научных результатов;
  - Заключение;
  - Список литературы – оформляется на языке написания статьи и на английском языке.

- Информация о финансировании (при наличии).
- В конце статьи приводятся инициалы и фамилия, ученая степень, звание, место работы автора(-ов); название вуза (организации), города, страны; контактная информация (e-mail) для каждого автора; заглавие (название) статьи; аннотация; ключевые слова на двух языках, отличимых от языка статьи (казахский/русский, английский).

Объем материалов, как правило, не должен быть менее 3 страниц и не более 8 страниц, включая текст, рисунки, таблицы.

Количество авторов не должно превышать **5 человек**.

Рисунки, карты, фотографии, таблицы, формулы рекомендуется выполнять с помощью компьютерной техники и размещать в статье по мере их упоминания. Порядковые номера рисунков обозначаются арабскими цифрами, название рисунка приводятся по центру под рисунком (Рисунок 1 – Название рисунка).

Таблицы отражаются в тексте статьи после первой ссылки или на следующей странице. Номер и название таблицы приводятся с левой стороны страницы (Таблица 1 – Название таблицы). В случае переноса таблицы на следующую страницу, столбцы нумеруются и на следующей странице с правой стороны указывается продолжение таблицы (Продолжение таблицы 1).

Порядок оформления литературы:

- литература располагается по мере упоминания в тексте;
- по тексту в квадратных скобках указывается порядковый номер работы, на которую дается ссылка;
- оформление литературы должно производиться в соответствии с требованиями ГОСТ 7.1-2003 «Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления»;
- при оформлении пристатейной литературы приводить полный перечень авторов издания (без др.).

Примеры оформления списка литературы

1. Аксартов Р.М. Метод количественного определения леукомизина / Аксартов Р.М., М.И. Айзиков, С.А. Расулова // Вестник КазНУ. Сер. хим. – 2003. – Т.1., № 8. – С. 40-41.
2. Курмуков А.А. Ангиопротекторная и гиполипидемическая активность леуомизина / А.А. Курмуков. – Алматы: Бастау, 2007. – 148 с.
3. Абимульдина С.Т. Функционирование и развитие инфраструктуры сахарного производства / С.Т. Абимульдина, Г.Е. Сыдыкова, Л.А. Оразбаева // Инновация в аграрном секторе Казахстана: Матер. Междунар. конф. / КазНУ им. аль-Фараби. – Алматы, 2010. – С. 10-13.
4. Соколовский Д.В. Теория синтеза самоустанавливающихся кулачковых механизмов приводов [Электрон. ресурс] / Д.В. Соколовский. – 2006. – URL: http://bookchamber.kz/stst_2006.htm (дата обращения: 12.03.2009).

После представления автором статьи редакция журнала рассматривает поступившую работу в течение двух недель с целью проверки ее соответствия предъявляемым требованиям (антиплагиат, оформление, рецензирование и т.д.).

В случае положительного решения редакции журнала о принятии статьи, авторам направляется соответствующее сообщение для произведения оплаты публикации.

В случае несоответствия статьи требованиям журнала авторы будут извещены сообщением на электронную почту.

Редакция журнала самостоятельно направляет поступившую работу на рецензирование. В журнале применяется двойное слепое рецензирование (*Double-blind review*), то есть конфиденциально.

Редакция журнала осуществляет проверку статьи на наличие заимствований (используется лицензионное программное обеспечение). Оригинальность текста должна составлять **не менее 75%**. Доля самоцитирования в статьях не должна превышать 15%. Статья, не набравшая необходимый процент оригинальности, направляется автору на доработку. Первая и вторая проверки осуществляются бесплатно, третья проверка – 2000 тенге. В случае получения отрицательного результата после третьей проверки, статья не допускается к публикации в журнале.

Образец оформления статьи

МРНТИ: 32.61.11

М.А. Смагулов[1*], С.А. Зайцев[2], М.М. Искакова[1], А.К. Каримов[3]
[1]Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А
[2]Московский государственный университет,
119991, Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, д. 1
[3]Казахский национальный университет имени аль-Фараби,
050040, Республика Казахстан, г. Алматы, пр. аль-Фараби, 71
[*]e-mail: smagulov@mail.ru

БИОГЕОХИМИЧЕСКАЯ МИГРАЦИЯ И АККУМУЛЯЦИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

Аннотация: *В статье приведены результаты исследования…….*
Ключевые слова: *среда, биолог, природа,…....*

Введение

В формировании биогеохимических свойств компонентов ландшафта важную роль играет атмосферная, водная и биогенная миграция. Из всех природных вод наиболее заметные изменения наблюдаются в атмосферных осадках. Концентрация элементов в снеге зависит от температуры воздуха, направления розы ветров по отношению к источнику загрязнения, удаленности от него, рельефа местности [1]. Различия химического состава атмосферных осадков обусловлены сложными перемещениями воздушных масс. На рисунке 1 отображено содержание тяжелых металлов во льду водохранилищ.

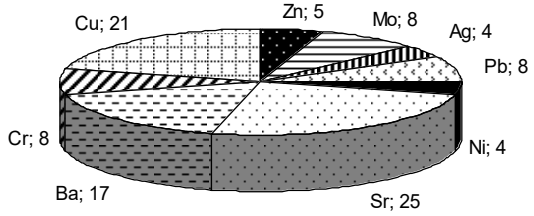


Рисунок 1 – Распределение содержания тяжелых металлов во льду водохранилищ Москворецкой системы

Методы исследования

Текст……

Результаты исследований

Дождевые воды по составу сульфатно-гидрокарбонатно- и сульфатно-хлоридно-кальциевые. Минерализация их выше за счет концентрации в атмосфере пыли. Выявлено преобладание тяжелых металлов, рассчитанных при выпадении на единицу площади ландшафта, в дожде (Sr, Pb, Cr, Zn, Ni) по сравнению со снегом (табл. 1).

Таблица 1 – Содержание тяжелых металлов в снеге и дожде, кг/га

№	Тяжелые металлы	Снег	Дождь
1	Pb	$0,5x10^{-6}$	$0,2x10^{-4}$
2	Cr	$0,4x10^{-6}$	$1,6x10^{-3}$
3	V	$8,5x10^{-5}$	–
*Примечание: **			

Обсуждение научных результатов

Текст……

Заключение

Текст……

Список литературы

1. Курмуков А.А. Ангиопротекторная и гиполипидемическая активность леуомизина / А.А. Курмуков. – Алматы: Бастау, 2007. – 148 с.
2. Хрусталева М.А. Биогеохимическая миграция и аккумуляция тяжелых металлов в компонентах природных и антропогенных ландшафтов / М.А. Хрусталева // Сборник трудов 3-й Международной научной конференции. – г. Семей: Изд-во СГУ им. Шакарима, 2012. – Том 1. – С. 368-373.

References

1. Kurmukov A.A. Angioprotektornaya i gipolipidemicheskaya aktivnost' leuomizina / A.A. Kurmukov. – Almaty: Bastau, 2007. – 148 s.
2. Khrustaleva M.A. Biogeokhimicheskaya migratsiya i akkumulyatsiya tyazhelykh metallov v komponentakh prirodnykh i antropogennykh landshaftov / M.A. Khrustaleva // Sbornik trudov 3-i Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii. – g. Semei: Izd-vo SGU im. Shakarima, 2012. – Tom 1. – S. 368-373.

М.А. Смагулов[1*], С.А. Зайцев[2], М.М. Искакова[1], А.К. Каримов[3]
[1]Шәкәрім университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинки к-сі, 20 А
[2]Мәскеу мемлекеттік университеті,
119991, Ресей Федерациясы, Мәскеу, Ленин таулары, 1-үй
[3]Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,
050040, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., әл-Фараби даңғылы, 71
*e-mail: smagulov@mail.ru

АУЫР МЕТАЛДАРДЫҢ БИОГЕОХИМИЯЛЫҚ МИГРАЦИЯСЫ ЖӘНЕ ЖИНАҚТАЛУЫ

Бұл мақалада биосферадағы экологиялық-геохимиялық өзгерістердің даму сипаттамасы қаралады. Қоршаған геохимиялық және экологиялық-геохимиялық өзгерістердің әсерлері бөлек және жекеше талданды. Біз биосферадағы экологиялық-геохимиялық өзгерістердің дамуының заңдылығын ұсынамыз. .....

Түйін сөздер:*.....*

M. Smagulov[1*], S. Zaitsev[2], M. Iskakov[1], A. Karimov[3]
[1]Shakarim University,
071412, Republic of Kazakhstan, Semey, 20 A Glinka Street
[2]Moscow State University, Moscow, Russia
119991, Russian Federation, Moscow, 1 Leninskie gory Street
[3]Al-Farabi Kazakh National University, Republic of Kazakhstan, Almaty
050040, Republic of Kazakhstan, Almaty, 71 Al-Farabi Avenue
*e-mail: smagulov@mail.ru

BIOGEOCHEMICAL MIGRATION AND ACCUMULATION HEAVY METALS

This article discusses the characteristics of the development of eco-geochemical changes in the biosphere. Analyzed discretely, and in particular the relationship of environmental, geochemical and ecological changes. We present the laws of development of ecological-geochemical changes in the biosphere…...

Key words:*…..*

Сведения об авторах

Максат Ануарбекович Смагулов* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологическое оборудование и машиностроение»; Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: smagulov@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6369-3690.

Сергей Александрович Зайцев – кандидат физико-математически наук кафедры «Физика и математика»; Московский государственный университет, Российская Федерация; e-mail: zaisev@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7057-0461.

Маржан Муратовна Искакова – докторант кафедры «Технологическое оборудование и машиностроение»; Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: iskakova@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4787-4966.

Айтбек Калиевич Каримов – старший преподаватель кафедры «Автоматизация»; Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Республика Казахстан; e-mail: karimov@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5378-2266.

Авторлар туралы мәліметтер

Максат Ануарбекович Смагулов* – техника ғылымдарының докторы, «Технологиялық жабдықтар және машина жасау» кафедрасының профессоры; Шәкәрім университеті, Қазақстан; e-mail: smagulov@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6369-3690.

Сергей Александрович Зайцев – «Физика және математика» кафедрасының физика-математика ғылымдарының кандидаты; Мәскеу мемлекеттік университеті, Ресей Федерациясы; e-mail: zaisev@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7057-0461.

Маржан Муратовна Искакова – «Технологиялық жабдықтар және машина жасау» кафедрасының докторанты; Шәкәрім университеті, Қазақстан; e-mail: iskakova@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4787-4966.

Айтбек Калиевич Каримов – «Автоматтандыру» кафедрасының аға оқытушысы; әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан; e-mail: karimov@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5378-2266.

Information about the authors

Maksat Smagulov* – doctor of technical sciences, professor of the department «Technological equipment and mechanical engineering»; Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: smagulov@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6369-3690.

Sergei Zaitsev – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Department of Physics and Mathematics; Moscow State University, Russian Federation; e-mail: zaisev@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7057-0461.

Marjan Iskakova – doctoral student of the department «Technological equipment and mechanical engineering»; Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: iskakova@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4787-4966

Aitbek Karimov – senior teacher at the Department of Automation; Al-Farabi Kazakh National University, Republic of Kazakhstan; e-mail: karimov@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5378-2266

RULES FOR AUTHORS

A scientific article should be a textual material of the initial, intermediate or final results of a scientific research, experimental or analytical activity, containing author's developments, conclusions, recommendations that have not been previously published and have novelty. A scientific article also includes a work devoted to the study and analysis of previously published scientific results related to a common theme (review article), which provides generalizing conclusions and recommendations.

In the scientific journal “Bulletin of Shakarim University”. Series of technical sciences” accepts manuscripts in Kazakh, Russian, English.

Periodicity of the journal – 1 time per quarter (4 issues per year).

The article is submitted in electronic format (.doc, .docx, .rtf) by downloading through the functionality of the journal website tech.vestnik.shakarim.kz

To work with the portal, you need to register on the site tech.vestnik.shakarim.kz

Articles in the following areas are accepted for publication in the journal:

- Automation and information technology
- Engineering and mechanics
- Food engineering and biotechnology
- Technical physics and Thermal power engineering
- Chemical Technology

Requirements for the formalization of materials

The article is drawn up with the following margins: indent from the edge of the sheet – 2.0 cm. Font size – 11, line spacing – 1.0, typeface – Arial.

Structure of a scientific article

• ISTIR index (international scientific and technical information rubric) – indicated from the left edge of the page. To assign an ISTIR index to an article, you need to use the site www.grnti.ru.

• Information about the authors – written on the next line in the center

– initials and surname of the author (s) of the article (first write the initials, then the surname – A. Kaliev), font selection – bold;

– place of work of the author(s) – the name of the university (organization), city, country;

– contact information (e-mail) of the corresponding author.

• Title of the article (title) – next line, highlighted in bold, center alignment. It should accurately reflect the content, be short and concise. Shortening of words in the title is not allowed.

• Annotation - a summary of the main essence of research, methods and objects of research, the most important results, their significance, scientific and practical value. The annotation is placed one line after the title of the article in italics. The volume of the abstract is 150-300 words.

• Keywords are designed to search for an article and determine its subject area. The number of keywords - 5-8, are written in italics.

• The main text of the article – through the line:

Introduction – a reflection of relevance;

– Conditions and methods of research;

– Research results;

– Discussion of scientific results;

– Conclusion;

– The list of references is drawn up in the language of writing the article and in English.

• Funding information (in the presence).

• At the end of the article, the initials and surname, academic degree, title, place of work of the author(s) are given; the name of the university (organization), city, country; contact information (e-mail) for each author; title (heading) of the article; annotation; keywords in two languages distinct from the language of the article (Kazakh/Russian, English).

The volume of materials, as a rule, should not be less than 3 pages and not more than 8 pages, including text, figures, tables.

The number of authors should not exceed **5 people**.

Drawings, maps, photographs, tables, formulas are recommended to be done using computer technology and placed in the article as they are mentioned. Sequential numbers of figures are indicated by Arabic numerals, the name of the figure is given in the center under the figure (Figure 1 – The title of the figure).

Tables are reflected in the text of the article after the first link or on the next page. The number and title of the table are given on the left side of the page (Table 1 – The title of the table). If the table is transferred to the next page, the columns are numbered and on the next page, on the right side, the continuation of the table is indicated (Continuation of table 1).

The order of registration of literature:

– literature is arranged as it is mentioned in the text;

– the text in square brackets indicates the serial number of the work to which the link is given;

– the design of the literature should be carried out in accordance with the requirements of GOST 7.1-2003 «Bibliographic record. Bibliographic description. General requirements and rules for drafting»;

– when preparing referenced literature, provide a complete list of the authors of the publication (without others).

Examples of designing a list of references

1. Aksartov R.M. Metod kolichestvennogo opredeleniya leukomizina / Aksartov R.M., M.I. Aizikov, S.A. Rasulova // Vestnik KaZNU. Ser. khim. – 2003. – T.1., № 8. – S. 40-41.
2. Kurmukov A.A. Angioprotektornaya i gipolipidemicheskaya aktivnost' leuomizina / A.A. Kurmukov. – Almaty: Bastau, 2007. – 148 s.
3. Abimul'dina S.T. Funktsionirovanie i razvitie infrastruktury sakharnogo proizvodstva / S.T. Abimul'dina, G.E. Sydykova, L.A. Orazbaeva // Innovatsiya v agrarnom sektore Kazakhstana: Mater. Mezhdunar. konf. / KaZNU im. al'-Farabi. – Almaty, 2010. – S. 10-13.
4. Sokolovskii D.V. Teoriya sinteza samoustanavlivayushchikhsya kulachkovykh mekhanizmov privodov [Ehlektron. resurs] / D.V. Sokolovskii. – 2006. – URL: http://bookchamber.kz/stst_ 2006.htm (data obrashcheniya: 12.03.2009).

After the submission of the article by the author, the editors of the journal review the submitted work within two weeks in order to check its compliance with the requirements (anti-plagiarism, design, review, etc.).

In case of a positive decision of the editorial board of the journal to accept the article, the authors are sent a corresponding message to pay for the publication.

In case of non-compliance of the article with the requirements of the journal, the authors will be notified by e-mail.

The editorial board of the journal independently sends the received work for review. The journal uses *double-blind review*, that is, it is confidential.

The editorial board of the journal checks the article for borrowings (licensed software is used). The originality of the text must be **at least 75%.** The share of self-citations in articles should not exceed 15%. An article that does not reach the required percentage of originality is sent to the author for revision. The first and second checks are free of charge, the third check is 2000 tenge. If a negative result is obtained after the third check, the article is not allowed for publication in the journal.

Sample design of the article

IRSTI: 32.61.11

M. Smagulov[1], S. Zaitsev[2], M. Iskakova[1], A. Karimov[3]
[1]Shakarim University
071412, Republic of Kazakhstan, Semey, 20 A, Glinki str.
[2]Moscow State University,
119991, Russian Federation, Moscow, Leninskiye Gory, 1, str.
[3]Kazakh al-Farabi National University
050040, Republic of Kazakhstan, Almaty, al-Farabi Ave., 71
*e-mail: smagulov@mail.ru

BIOGEOCHEMICAL MIGRATION AND ACCUMULATION HEAVY METALS

Annotation: *The article presents the results of the study……*
Key words: *environment, biologist, nature,…....*

Introduction

Atmospheric, water, and biogenic migration plays an important role in the formation of the biogeochemical properties of landscape components. Of all natural waters, the most noticeable changes are observed in precipitation. The concentration of elements in the snow depends on the air temperature, the direction of the wind rose in relation to the source of pollution, the distance from it, and the terrain [1]. Differences in the chemical composition of precipitation are due to complex movements of air masses. Figure 1 shows the content of heavy metals in the ice of reservoirs.

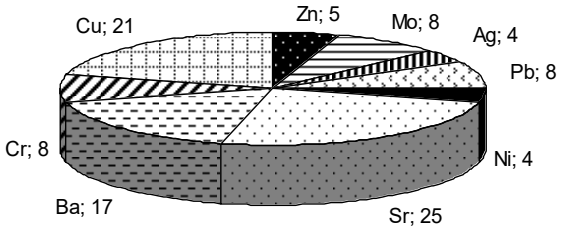


Figure 1 – Distribution of heavy metals in the ice of reservoirs of the Moskvoretskaya system

Research methods

Text……

Research results

Rain waters are sulfate-bicarbonate- and sulfate-chloride-calcium in composition. Their mineralization is higher due to the concentration of dust in the atmosphere. The predominance of heavy metals calculated for precipitation per unit area of the landscape was revealed in rain (Sr, Pb, Cr, Zn, Ni) compared to snow (Table 1).

Table 1 – Content of heavy metals in snow and rain, kg/ha

№	Heavy Metals	Snow	Rain
1	Pb	$0,5x10^{-6}$	$0,2x10^{-4}$
2	Cr	$0,4x10^{-6}$	$1,6x10^{-3}$
3	V	$8,5x10^{-5}$	–
*Note: **			

Discussion of scientific results

Text……

Conclusion

Text……

References

1. Kurmukov A.A. Angioprotektornaya i gipolipidemicheskaya aktivnost' leuomizina / A.A. Kurmukov. – Almaty: Bastau, 2007. – 148 s.
2. Khrustaleva M.A. Biogeokhimicheskaya migratsiya i akkumulyatsiya tyazhelykh metallov v komponentakh prirodnykh i antropogennykh landshaftov / M.A. Khrustaleva // Sbornik trudov 3-i Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii. – g. Semei: Izd-vo SGU im. Shakarima, 2012. – Tom 1. – S. 368-373.
3. …

М.А. Смагулов[1*], С.А. Зайцев[2], М.М. Искакова[1], А.К. Каримов[3]
[1]Шәкәрім университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинки к-сі, 20 А
[2]Мәскеу мемлекеттік университеті,
119991, Ресей Федерациясы, Мәскеу, Ленин таулары, 1-үй
[3]Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,
050040, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., әл-Фараби даңғылы, 71
*e-mail: smagulov@mail.ru

АУЫР МЕТАЛДАРДЫҢ БИОГЕОХИМИЯЛЫҚ МИГРАЦИЯСЫ ЖӘНЕ ЖИНАҚТАЛУЫ

Бұл мақалада биосферадағы экологиялық-геохимиялық өзгерістердің даму сипаттамасы қаралады. Қоршаған геохимиялық және экологиялық-геохимиялық өзгерістердің әсерлері бөлек және жекеше талданды. Біз биосферадағы экологиялық-геохимиялық өзгерістердің дамуының заңдылығын ұсынамыз. .....

Түйін сөздер:*.....*

М.А. Смагулов[1*], С.А. Зайцев[2], М.М. Искакова[1], А.К. Каримов[3]
[1] Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А
[2]Московский государственный университет,
119991, Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, д. 1
[3]Казахский национальный университет имени аль-Фараби,
050040, Республика Казахстан, г. Алматы, пр. аль-Фараби, 71
[*]e-mail: smagulov@mail.ru

БИОГЕОХИМИЧЕСКАЯ МИГРАЦИЯ И АККУМУЛЯЦИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

Аннотация: *В статье приведены результаты исследования……*
Ключевые слова: *среда, биолог, природа,…....*

Information about the authors

Maksat Smagulov* – doctor of technical sciences, professor of the department «Technological equipment and mechanical engineering»; Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: smagulov@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6369-3690.

Sergei Zaitsev – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Department of Physics and Mathematics; Moscow State University, Russian Federation; e-mail: zaisev@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7057-0461.

Marjan Iskakova – doctoral student of the department «Technological equipment and mechanical engineering»; Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: iskakova@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4787-4966

Aitbek Karimov – senior teacher at the Department of Automation; Al-Farabi Kazakh National University, Republic of Kazakhstan; e-mail: karimov@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5378-2266

Сведения об авторах

Максат Ануарбекович Смагулов* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологическое оборудование и машиностроение»; Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: smagulov@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6369-3690.

Сергей Александрович Зайцев – кандидат физико-математически наук кафедры «Физика и математика»; Московский государственный университет, Российская Федерация; e-mail: zaisev@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7057-0461.

Маржан Муратовна Искакова – докторант кафедры «Технологическое оборудование и машиностроение»; Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: iskakova@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4787-4966.

Айтбек Калиевич Каримов – старший преподаватель кафедры «Автоматизация»; Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Республика Казахстан; e-mail: karimov@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5378-2266.

Авторлар туралы мәліметтер

Максат Ануарбекович Смагулов* – техника ғылымдарының докторы, «Технологиялық жабдықтар және машина жасау» кафедрасының профессоры; Шәкәрім университеті, Қазақстан; e-mail: smagulov@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6369-3690.

Сергей Александрович Зайцев – «Физика және математика» кафедрасының физика-математика ғылымдарының кандидаты; Мәскеу мемлекеттік университеті, Ресей Федерациясы; e-mail: zaisev@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7057-0461.

Маржан Муратовна Искакова – «Технологиялық жабдықтар және машина жасау» кафедрасының докторанты; Шәкәрім университеті, Қазақстан; e-mail: iskakova@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4787-4966.

Айтбек Калиевич Каримов – «Автоматтандыру» кафедрасының аға оқытушысы; әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан; e-mail: karimov@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5378-2266.

МАЗМҰНЫ – СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТТАНДЫРУ ЖӘНЕ АҚПАРАТТЫҚ ТЕХНОЛОГИЯЛАР

АВТОМАТИЗАЦИЯ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

M.A. Beisenbi, A.A. Auyelbayeva, V.V. Nikulin, S.Sh. Beisembina GRADIENT-VELOCITY METHOD FOR APERIODIC ROBUST STABILITY OF LINEAR CONTROL SYSTEMS……..	6
Н.А. Модовов, Н.О. Мекебаев, А.Б.Тлеубаева, Ө.М. Белғожа, І. Садықжан КРИПТОГРАФИЯЛЫҚ ХАТТАМА: ИНТЕРАКТИВТІ ЕМЕС НӨЛДІК ЖАРИЯ ЕТІЛГЕН ДӘЛЕЛДЕМЕЛЕРДІҢ ЕСЕПТЕУ КҮРДЕЛІЛІГІН ТАЛДАУ.....	15
Р.Б. Абдрахманов, Ә.С. Төлеп, Д.Р. Сұлтан, А.С. Касымбеков, А.Б. Нуржанова ПОДХОДЫ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ К ОБНАРУЖЕНИЮ КИБЕРБУЛЛИНГА В МНОГОЯЗЫЧНОМ ОНЛАЙН-ТЕКСТОВОМ КОНТЕНТЕ……..	23
Н.П. Сапарходжаев, А. Хабай, М.Ж. Иген, Е.А. Тулешов, Ж.Н. Исабеков ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ НЕГІЗІНДЕ GNSS СИГНАЛДАРДЫҢ САПАСЫН ЖАҚСАРТУ ӘДІСТЕРІН ЖЕТІЛДІРУ.....	31
M.A. Sambetbayeva, V.B. Barakhnin, A.N. Sultangaziyeva, N.K. Mukazhanov, R.A. Begim ONTOLOGY-AWARE FOR PHENOTYPE TERM NORMALIZATION AND GROUP ASSIGNMENT……	42
O. Umarov, Zh. Oralbekova, Sh. Tutkyshbayeva, D. Oralbekova, G. Tyulepberdinova STUDENT STRESS CLASSIFICATION BASED ON MACHINE LEARNING ALGORITHMS……	54
Ye. Seitkulov, R. Ospanov, B. Yergaliyeva, K. Utebayev IMPLEMENTATION AND COMPARATIVE ANALYSIS OF SPHINCS+-BASED DIGITAL SIGNATURE SCHEMES…….	62
A. Zhakanova, Zh. Oralbekova, D. Oralbekova DEVELOPMENT OF A MODEL OF KAZAKH SIGN LANGUAGE FOR CLOSED-SET PHRASE RECOGNITION AND TRAINING……..	73
Е.А. Тулешов, Қ.М. Абуталипов, М.Ж. Куатова, П.М. Рахметова РАЗРАБОТКА ГИБРИДНОЙ АРХИТЕКТУРЫ КООРДИНАЦИИ ФЛОТА МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ НА ОСНОВЕ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ПЛАНИРОВАНИЯ И ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ НАВИГАЦИИ…	83
Б.Б. Оразбаев, А.Т. Кишубаева, К.Н. Оразбаева, Л.М. Абдибекова, Б.Е. Утенова ЛИНГВИСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО УПРАВЛЕНИЮ ВЫХОДОМ И КАЧЕСТВОМ НЕФТЯНОГО КОКСА……	91
А.Н. Бақытжанов, Д.К. Сатыбалдина, А.Ж. Закарина, Н.Б. Шмитов, Н.М. Тешебаев КҮЛ МӨЛШЕРІ ЖОҒАРЫ ОТЫНДЫ ЖАҒУ КЕЗІНДЕ БАРАБАНДЫ БУ ҚАЗАНДЫҒЫНЫҢ ЖҰМЫС РЕЖИМІН ОТЫН ШЫҒЫНЫНЫҢ МИНИМУМЫ КРИТЕРИЙІ БОЙЫНША ОҢТАЙЛАНДЫРУ.....	106
Б. Копабаева, А. Золотов, И. Карымсакова, Д. Мясоедов, Р. Назаров ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ ВТОРОГО ПОДЪЕМА НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА И ПРЕДИКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ……..	115
Е. Жантлесов, С. Алтынбек, В. Грузин, А.Тогусов, М. Шекеев РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОЙ АРХИТЕКТУРЫ МНОГОКАНАЛЬНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО МОДУЛЯ СИНХРОННОЙ РЕГИСТРАЦИИ СИГНАЛОВ……	127

Д.Т. Беккасимова, К.Ю. Дербышев, Ә.М. Сүгірбай, Д.О. Кожахметова, А.Д. Золотов МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ КУЛЬТИВИРОВАНИЯ CHLORELLA VULGARIS В ЗАКРЫТЫХ ФОТОБИОРЕАКТОРАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ……..	138
А.М. Қасенхан, Ә.Т. Аяпбергенова, Н.С. Байгаринова, Ә.М. Аманғосов, Ж.Н. Исабеков ОРТА БІЛІМ БЕРУ ҰЙЫМДАРЫНДА СЫНИ ТҰРҒЫДАН ОЙЛАУДЫ ДАМЫТУҒА АРНАЛҒАН ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ НЕГІЗІНДЕГІ ҚҰРАЛДЫ ӘЗІРЛЕУ: КЕЙС-СТАДИ.....	148
А.С. Инчин, А.З. Айтмагамбетов, А.Е. Кулакаева, С.Ж. Жұмағали, У.К. Уали ОЦЕНКА ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ МОДУЛЕЙ НАВИГАЦИОННОЙ ПЛОМБЫ……..	156
T. Zhylkybayev, A. Dautova, D. Zhumasheva, G. Shuitenov, S. Altynbek DEVELOPMENT OF AN INFORMATION SYSTEM FOR THE DIGITAL DOCUMENTATION OF HISTORICAL SITES IN A REGION……..	168
А. Асет, Е.А. Оспанов, А.М. Ахметова, Н.С. Сарсенбаев, А.А. Бейсембаев СУМЕН ЖАБДЫҚТАУДЫ АВТОМАТТАНДЫРУ ЖӘНЕ ДИСПЕТЧЕРЛЕУГЕ АРНАЛҒАН ЖОҒАРЫ ТИІМДІ, ЖОҒАРЫ СЕНІМДІ ТАРАТЫЛҒАН ЖҮЙЕЛЕРДІ МОДЕЛЬДЕУ.....	179
A.T. Kerimbayeva MATHEMATICAL MODEL AND COMPUTATIONAL ANALYSIS OF A LIGHTWEIGHT LATTICE-BASED SIGNATURE FOR IOT DEVICES……..	189
Б.С. Смақанов, И.М. Увалиева, А.К. Шайханова ЖҮРГІЗУШІ ЖАҒДАЙЫН БАҚЫЛАУДЫҢ КЛАССИКАЛЫҚ КОМПЬЮТЕРЛІК КӨРУ ӘДІСТЕРІНЕ НЕГІЗДЕЛГЕН МОДЕЛІН ӘЗІРЛЕУ……	196
I. Bainazarova, Zh. Umarova, Yu. Jusoh, Zh. Iztayev, S. Botayeva CONTEXT-DEPENDENT TRAJECTORY FORECASTING FOR AUTONOMOUS TRANSPORT SYSTEMS USING HYBRID GRAPH AND TRANSFORMER NEURAL NETWORKS……	205
Г.К. Абишева, Б.Ш. Разахова, Т.А. Айдынов*, М.К. Сапарбек ИССЛЕДОВАНИЕ ПУБЛИЧНЫХ ДАТАСЕТОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ.....	216
K.E. Iklassova, L.N. Abdullah, M.Zh. Bazarova ASSESSMENT OF INSTITUTIONAL DATA HETEROGENEITY FOR ARTIFICIAL INTELLIGENCE SYSTEMS……..	227
G.N. Kazbekova, Y.U. Serdaliyev LEAKAGE-FREE CAUSAL CONTEXT REPRESENTATION FOR POSE-BASED EXERCISE PHASE RECOGNITION……	236
А.К. Шайханова, Г.А. Шангытбаева, Г.Б. Бекешова, Лили Нурлияна Абдулла ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ИНСТРУМЕНТОВ В ПРОФЕССИОНАЛЬНУЮ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ ПЕДАГОГОВ…….	248
А.К. Үкібай, Е.А. Дайнеко, А.Б. Ақбаян, Д.С. Баймагамбетова, Г.Б. Бекешова РАЗРАБОТКА ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОЦЕНКИ РИСКА САХАРНОГО ДИАБЕТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ……	260
Н.А. Бажаев, А.К. Шайханова, А.К. Токкулиева ЖЕЛІЛІК ТРАФИКТІҢ УАҚЫТТЫҚ ҚАТАРЛАРЫН СЕГМЕНТАЦИЯЛАУ НЕГІЗІНДЕ IOT-ҚҰРЫЛҒЫЛАРДЫҢ АҚПАРАТТЫҚ ҚАУІПСІЗДІГІН МОНИТОРИНГТЕУ ҮШІН БЕЛГІЛЕР КЕҢІСТІГІН ҚАЛЫПТАСТЫРУ ЖӘНЕ КЕҢЕЙТУ ӘДІСІ.....	278
Ш.Ж. Сеилов, Б.Ш. Журсинбек, М.У. Байдельдинов, А.К. Майданов, А.А. Сейлов ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СЕЛЬСКАЯ ТЕРРИТОРИЯ КАК МОДЕЛЬ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗВИТИЯ КАЗАХСТАНА В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА……..	288

S.N. Uali, A.B. Seisenova, O.S. Kapizov, D.K. Mukhanov, K.R. Manap SIMULATION AND PERFORMANCE ANALYSIS OF PID-TYPE ITERATIVE LEARNING CONTROL IN THE LABORATORY LINE TESTING OF CYLINDRICAL CELL BATTERIES……	312
Ш.Ж. Сеилов, Б.Ш. Журсинбек, А.А. Кременчуцкий, С.Ж. Казыбаева, А.К. Майданов МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УРОЖАЙНОСТИ ЯБЛОНЕВЫХ САДОВ……	321
S. Aibagarov, D. Marlambekov, A. Mukhanbet SAC-BASED UPLINK POWER CONTROL IN 5G NR: DEEP REINFORCEMENT LEARNING FOR JOINT THROUGHPUT AND ENERGY EFFICIENCY OPTIMIZATION……..	331

МАШИНА ЖАСАУ ЖӘНЕ МЕХАНИКА

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МЕХАНИКА

A.B. Shayakhmetov, T.V. Bedych, M.A. Amantayev, R. Gabdyssalyk, A. Sugirbay COMPARATIVE ANALYSIS OF TECHNICAL AND OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF CHISEL PLOWS AND SUBSOILERS FOR ANTI-EROSION SOIL TILLAGE……..	343
A. Kusainov, G. Zhunissova*, N. Magazov, A. Kengesbekov, L. Bayatanova THE EFFECT OF ELECTROLYTE-PLASMA HARDENING PARAMETERS ON THE MICROSTRUCTURE, PHASE COMPOSITION, AND MECHANICAL AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF 20X STEEL.....	351
Е.Т. Абильмажинов, Е.Я. Шаяхметов, Д.К. Дукенбаев, Р.А. Советбаев, В.Н. Коц ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПНЕВМОДВИГАТЕЛЯ В СОСТАВЕ УСТАНОВКИ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ СЖАТОГО ВОЗДУХА……..	362
O.N. Sadu, G.D. Bazil, A. Ainul AUTOMATED SYSTEM FOR PREDICTING FAILURES OF LOW-VOLTAGE ELECTRIC MOTORS IN ELECTRIC POWER PLANTS……	369
К.К. Комбаев, Ж.М. Мұхаметбек, Б.Н. Азаматов, Д.И. Қалиев, Р. Ғабдысалық TI-6AL-4V ҚОРЫТПАСЫНАН ЖАСАЛҒАН КОРТИКАЛДЫ СҮЙЕК БҰРАНДАЛАРЫН СББ БІЛДЕКТЕРІНДЕ ӨНДІРУ КЕЗІНДЕ КЕСКІШ ҚҰРАЛ ТОЗУЫН БЕЙІМДЕЛМЕЛІ ӨТЕМДЕУ.....	378

ТАМАҚ ИНЖЕНЕРИЯСЫ ЖӘНЕ БИОТЕХНОЛОГИЯ

ПИЩЕВАЯ ИНЖЕНЕРИЯ И БИОТЕХНОЛОГИЯ

F.G. Sagymbek, Z.A. Kozhakhmetova, T.B. Abdigaliyeva DEVELOPMENT OF A TECHNOLOGY FOR PRODUCING DRY BIOPRODUCTS FOR THE FOOD INDUSTRY WITH PRESERVATION OF STRAIN FUNCTIONAL ACTIVITY……	391
Ж.С. Набиева, А.Н. Жаханова, А.А. Кулаипбекова, Э.К. Асембаева, Ш.А. Абжанова ДОЛАНА ЖАПЫРАҒЫ СЫҒЫНДЫСЫМЕН БАЙЫТЫЛҒАН ЖЕМІС-КӨКӨНІС ПАСТИЛАСЫНЫҢ САПАЛЫҚ КӨРСЕТКІШТЕРІН БАҒАЛАУ.....	398
М.Т. Мурсалыкова, М.М. Какимов, Б.М. Искаков, А.М. Шуленова, А.Д. Үсенова МАҚСАРЫ МАЙЫН ПРЕСТЕУ ЖӘНЕ БИОФИЛЬТРДІ ҚОЛДАНУ АРҚЫЛЫ БАСТАПҚЫ ТАЗАРТУ ПРОЦЕСІН ОҢТАЙЛАНДЫРУ.....	409
Г.Т. Доланбаева, К.О. Богданова, В.Н. Николаева, С.К. Кабдрахманова ПОЛУЧЕНИЕ ЭНДОГЕННОГО БИОСТИМУЛЯТОРА ФУЗИКОКЦИНА: СПОСОБ ВЫДЕЛЕНИЯ, АНАЛИЗ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ……	417
И.А. Махатова, А.У. Шингисов, А.Ж. Шиналиева, Э.Т. Кансеитова, Г.Е. Коштаева КОНФИТЮР ЖЕМІС-ЖИДЕК-КӨКӨНІСТІ ДЕСЕРТІНІҢ АНТИОКСИДАНТТЫ ШИКІЗАТЫ МЕН РЕОЛОГИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ.....	425

Ф.Х. Смольникова, Б.К. Асенова, Э.К. Окусханова, Ш.К. Жакупбекова, А.С.Камбарова РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ СВЕЖЕГО СЫРА ИЗ КОЗЬЕГО МОЛОКА С ПАПРИКОЙ, ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА……	432
С.С. Ануарбекова, Д.А. Шаймерденова, Ж.М. Чаканова, М.Ж. Кизатова АМИЛАЗА И МИКРООРГАНИЗМЫ – ПРОДУЦЕНТЫ АМИЛОЛИТИЧЕСКИХ ФЕРМЕНТОВ……	441
Д.Н. Бакытжан, Э.Б. Аскарбеков, А.К. Кекибаева СЫРА ӨНДІРІСІ ҮШІН БИДАЙ УЫТЫНЫҢ САПАСЫН ЗЕРТТЕУ.....	457
А.К. Суйчинов, Ж.С.Есимбеков, Г.А. Капашева, З.Т. Смагулова БИДАЙ КЕБЕГІНЕН ТАҒАМДЫҚ ҚОСПА АЛУ ТЕХНОЛОГИЯСЫН ӘЗІРЛЕУ ЖӘНЕ ОНЫҢ ФИЗИКА-ХИМИЯЛЫҚ ЖӘНЕ ФУНКЦИОНАЛДЫ-ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН БАҒАЛАУ.....	466
З.К. Конарбаева ТЕКСТУРНО-МОДИФИЦИРОВАННЫЕ ПИЩЕВЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПАЦИЕНТОВ С БОКОВЫМ АМИОТРОФИЧЕСКИМ СКЛЕРОЗОМ: ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ……	475
Ж.Д. Асқар, Ш.А. Абжанова, Ә.У. Байбекова, Н.С. Төкен, А.Н. Құрманәлі ШЫРҒАНАҚ ЖЕМІСТЕРІНЕН БИОЛОГИЯЛЫҚ БЕЛСЕНДІ ЗАТТАРДЫ УЛЬТРАДЫБЫСТЫҚ ЭКСТРАКЦИЯ АРҚЫЛЫ БӨЛІП АЛУ ӘДІСІН ОҢТАЙЛАНДЫРУ.....	483
Р.У. Ашакаева, Г.Т. Жуманова, Б.М. Кулуштаева, Ж.Т.Букабаева, Б.К. Оспанова ШҰЖЫҚ ӨНІМІНІҢ ҚҰРАМЫНДАҒЫ ОРГАНОЛЕПТИКАЛЫҚ, ФИЗИКА-ХИМИЯЛЫҚ, МИКРОБИОЛОГИЯЛЫҚ КӨРСЕТКІШТЕРІН АНЫҚТАУ.....	490
A.A. Ramazanova, S.A. Saparbayeva, G.I.Yernazarova, S.K. Kabdrakhmanova, Kh.R. Aisakulova THE ROLE OF *PSEUDOMONAS* BACTERIA IN THE BIOREMEDIATION OF PESTICIDE-CONTAMINATED ENVIRONMENTS: A LITERATURE REVIEW……	497
Г.Е. Сыдықова, З.Т. Смағұлова, К.Ю. Дербышев ҚАЙТАЛАМА ЕТ ЖӘНЕ БАЛЫҚ ШИКІЗАТЫНАН АҚУЫЗ ГИДРОЛИЗАТЫН (ПЕПТОН) АЛУ ТЕХНОЛОГИЯСЫН ӘЗІРЛЕУ.....	507
А.Е. Татищева, **Ф.Ғ. Сағымбек*** МОЛОЧНОКИСЛЫЕ БАКТЕРИИ ПРОРОСТКОВ ПШЕНИЦЫ И ИХ БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ: ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР……	518
Д.Б. Тоймбаева, С.А. Садуахасова, Д.Д. Хамитова, Г.Х. Оспанкулова АМАРАНТ ДӘНІНІҢ ХИМИЯЛЫҚ ЖӘНЕ ФИЗИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІ.....	525
Ж.К. Токанова, К.Ж. Амирханов, Ж.Б. Асиржанова МАШ БҰРШАҒЫ МЕН НОҚАТ ҚОСЫЛҒАН ҚОЙ ЕТІНІҢ ҚОСЫМША ӨНІМДЕРІ НЕГІЗІНДЕ ЕТ ПАШТЕТІН ӘЗІРЛЕУ.....	534
Ф.Х.Смольникова, Ж.М. Атамбаева, А.О. Утегенова, А.А. Даутова, Н.Р. Муслимова ТЕХНОЛОГИЯ КИСЛОМОЛОЧНОГО НАПИТКА НЭРЛІ-КӨЖЕ.....	543
А.М. Таева, Ф.Т. Диханбаева, Ж.К. Имангалиева, М.К. Изтилеуов, Р. Бақытжанұлы ОЦЕНКА КАЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КИСЛОМОЛОЧНОГО НАПИТКА, ОБОГАЩЕННОГО ЙОДОМ……	554
A.A. Kaisarova, A.U. Shingisov, E.U. Mailybayeva, M.B. Kenzhekhanova STUDY OF THE CHEMICAL COMPOSITION AND FUNCTIONAL-TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF *SALICORNIA EUROPAEA* PLANT POWDER.....	565
Э.К. Окусханова, Г.Б. Абдилова, Ж.М. Атамбаева, А.А. Даутова, Ш.К. Жакупбекова ВЛИЯНИЕ СУБЛИМИРОВАННОГО ПОРОШКА ПРОРОЩЕННЫХ ЗЕРЕН ПШЕНИЦЫ НА ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И КАЧЕСТВО ВАРЁНЫХ СОСИСОК ИЗ МЯСА ПТИЦЫ……	574

Г.Т. Жуманова, Г.Н. Нурымхан, Р.У. Ашакаева, С.К. Касымов, Б.М. Кулуштаева РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ МЯСНЫХ РУБЛЕНЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ ПРОТИВОАЛЛЕРГИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ……..	584
G.B. Bekeshova, N.K. Ibragimov, B.A. Lobasenko MATHEMATICAL MODELING OF THE FINE GRINDING PROCESS OF MEAT-AND-BONE RAW MATERIALS……	593
K.A. Urazbayeva, E.A. Gabrilyants, R.S. Alibekov, M.K. Kassymova, G.A. Kassymbekova EVALUATION OF MEAT SEMI-FINISHED PRODUCTS ENRICHED WITH LENTIL FLOUR…….	601
A. Mustafayeva, B. Leonidova, G. Sharikbaeva, V. Akhmetova, A. Utegenova IMPROVEMENT OF THE TECHNOLOGY FOR PRODUCING A FERMENTED MILK BEVERAGE BASED ON GOAT'S MILK……..	609

ТЕХНИКАЛЫҚ ФИЗИКА ЖӘНЕ ЖЫЛУЭНЕРГЕТИКАСЫ

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА И ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

А.А. Генбач, Д.Ю. Бондарцев, М.Д. Ерболатов ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ДЕТОНАЦИОННОМ НАПЫЛЕНИИ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ ПОКРЫТИЙ.....	618
S.M. Akbarova EVOLUTION OF SCIENTIFIC DISCOURSE AND INVESTMENT PRIORITIES IN RENEWABLE ENERGY INTEGRATION RISKS: A BIBLIOMETRIC ANALYSIS……..	626
L.G. Sulyubayeva, D.R. Baizhan, N.E. Berdimuratov, B.A. Alibekova INFLUENCE OF MICRO-ARC OXIDATION PROCESSING PARAMETERS ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF ALUMINOSILICATE COATINGS FORMED ON AMG6 ALUMINUM ALLOY…..……	633
А.А. Ахметов, М.В. Ермоленко, О.А. Степанова ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОПТИМИЗАЦИИ ОРОСИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ РАСПЫЛЕНИЯ – ОБЗОР.....	643
Т. Тусеев, А.А. Куйкабаева, Э.М. Зульбухарова, А.К. Данлыбаева, Қ.М. Омаров КРЕМНИЙ ДИОКСИДІНІҢ (SIO_2) ГИДРОКСИЛ ҚАБАТЫНА γ-СӘУЛЕЛЕНУДІҢ ӘСЕРІ……..……	663
А.К. Мухамедиев, И.В. Прозорова, А.А. Прозоров, А.С. Акаев МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ ОЯТ БН-350 ПРИ РАЗРУШЕНИИ ВНУТРЕННИХ КОНСТРУКЦИЙ КОНТЕЙНЕРА ХРАНЕНИЯ…….	670
Zh.B. Sagdolina, D.B. Buitkenov, M.M. Ezhembaev, N.N. Yusof, A.B. Nabioldina INFLUENCE OF PROTECTIVE COATING ON THE MECHANICAL AND TRIBOLOGICAL PERFORMANCE OF CEMENTED CARBIDE TURNING INSERTS……..	679
Н.А. Бурамбаева, А.А. Отто, Д.Ж. Уразалимова МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ТЕСТИРОВАНИЯ НАДЁЖНОСТИ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ: СИСТЕМАТИЧЕСКИЙ КРИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР……	687
Н.К. Ердыбаева, Ж.Р. Баденова ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ В СИСТЕМАХ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ВОСТОЧНО-КАЗАХСТАНСКОЙ ОБЛАСТИ……	702
Н.Е. Мухамедов, О. Өкен, С.А. Должиков, Д.М. Секен, А.З. Райко ЦЕМЕНТ КОМПАУНДЫН ҚАУІПСІЗ КОНДИЦИОНЕРЛЕУ ҮШІН ОНЫ ҚАТТЫ РАДИОАКТИВТІ ҚАЛДЫҚ ИМИТАТОРЫМЕН ТОЛТЫРУДЫҢ ОҢТАЙЛЫ ДӘРЕЖЕСІН АНЫҚТАУ.....	715

О.А. Степанова, М.В. Ермоленко, А.А.Бектемисов, А.Б. Касымов, Т.Н. Умыржан ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ПЛОТНОСТИ НАНОМАСЕЛ TiO_2/ПОДСОЛНЕЧНОЕ МАСЛО И ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ МОДЕЛИ РАК-СНО.....	723
А.А. Генбач, Д.Ю. Бондарцев, М.Д. Ерболатов ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПОКРЫТИЙ ИЗ ПРИРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ГОРЯЧИМ ДЕТОНАЦИОННЫМ МЕТОДОМ.....	732
D.R. Baizhan, Garip Erdogan, T. Alimbekuly, N.S. Raisov, E.E. Birzhan EFFECT OF PLASMA HARDENING PARAMETERS ON 65G STEEL STRUCTURE AND PROPERTIES	741
А.А. Бектемисов, М.В.Ермоленко СРАВНИТЕЛЬНОЕ ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ TiO_2 и Al_2O_3 НА ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ И КИНЕМАТИЧЕСКУЮ ВЯЗКОСТЬ ПОДСОЛНЕЧНОГО МАСЛА.....	748
Е.А. Қабдылқақов, Н.Е. Мухамедов, А.С. Сураев, С.А. Должиков, А.В. Пахниц ПРИМЕНЕНИЕ УСТАНОВКИ ЭШП ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ТВЕРДЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ РЕАКТОРА БН-350……	754

ХИМИЯЛЫҚ ТЕХНОЛОГИЯ

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

А.Ж. Бекей, Ф. Вакандио, Т.В. Шакиева, Г.Е. Ергазиева, Х. Авчукир СҮТ ҚЫШҚЫЛЫ-НАТРИЙ ДОДЕЦИЛСУЛЬФАТЫ ЖҮЙЕСІНДЕ ЭЛЕКТРТҰНДЫРЫЛҒАН МЫС КАТАЛИЗАТОРЛАРЫНЫҢ НУКЛЕАЦИЯСЫ МЕН ҚҰРЫЛЫМДЫҚ ЕРЕКШЕЛІКТЕРІ.....	766
K. Botabekova, A.K. Kipchakbayeva, M.T. Kaimova, M.B. Mukhitdin, E.B. Kartbayeva PHYTOCHEMICAL CHARACTERIZATION AND COMPARATIVE ANALYSIS OF BIOLOGICALLY ACTIVE COMPOUNDS IN *CIRSIUM VULGARE* AND *CIRSIUM ARVENSE*……	776
Б.Қ. Қасенов, Ш.Б. Қасенова, Ж.И. Сағынтаева, Е.Е. Қуанышбеков, М.А. Исабаева $LaSrCuVMnO_{7.5}$ ҚҰРАМДЫ ҚОСЫЛЫСТЫҢ ТЕРМОДИНАМИКАЛЫҚ ЖӘНЕ ЭЛЕКТРФИЗИКАЛЫҚ СИПАТТАМАЛАРЫН ЗЕРТТЕУ.....	785
А.Қ. Әбдрәсіл, А.Ж. Керимкулова, Х.С. Рафикова, М.А. Кожайсакова, Д.Б. Адиканова ТАЗА ТЕХНОЛОГИЯЛАР, ЖАСЫЛ ХИМИЯ ЖӘНЕ ТҰРАҚТЫ ДАМУ ҮШІН ТЕРЕҢ ЭВТЕКТИКАЛЫҚ ЕРІТКІШТЕРДІ ӘЗІРЛЕУ.....	796
S. Ashimova, T. Mukanov, Y. Amirbayev, D. Alizhanov, G. Aitkaliyeva BIO-BASED REJUVENATOR FOR RESTORING THE PROPERTIES OF AGED BITUMEN……	804
С.К. Танирбергенова, Қ. Қамұнұр, Л.К. Бейсембаева, Л.А. Мусапирова СЕЛЕКТИВНАЯ ФЛОТАЦИЯ ИЛЬМЕНИТА С ПРИМЕНЕНИЕМ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЛИГНОСУЛЬФОНАТОВ……	813
A.D. Moldashi, Y. Sailaukhanuly, S. Azat, K. Toshtay, N. Nurgaliyev DEVELOPMENT AND STANDARDIZATION OF A CARAMEL DOSAGE FORM BASED ON *ARTEMISIA ANNUA L*. MEDICINAL PLANT RAW MATERIALS……	823
Н.К. Ахмадиева, Е.Б. Абикак, Н.М. Бурабаева, Т.К. Сагынтаева, Н. Оракбай КАРБОНАТНО-ГИДРОТЕРМАЛЬНАЯ АКТИВАЦИЯ АЛЮМОСИЛИКАТНОГО СЫРЬЯ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ГЛИНОЗЁМА……	832
Д. Мұқталы, Б.Х. Мусабаева, А. Батқал, Қ. Қамұнұр, А. Абылайхан МЕХАНОХИМИЯЛЫҚ ЖӘНЕ ӨЗДІГІНЕН ТАРАЛАТЫН ЖОҒАРЫ ТЕМПЕРАТУРАЛЫҚ СИНТЕЗ КЕЗІНДЕ БОР КАРБИДІНІҢ ТҮЗІЛУ ЕРЕКШЕЛІКТЕРІ.....	839
А.Н. Сабитова, Б.Б. Баяхметова, Ж.Ш. Шәріпхан, А.Б. Абдрахманова, А.С. Конакбаева ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОТХОДОВ СВИНЦОВОГО ПРОИЗВОДСТВА В ТЕХНОЛОГИИ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТА……	849

Ұ. Әмзеева, А. Нурлыбек, К. Аскарулы, Ж. Токтарбай, С. Азат ЗЕЛЕНЫЙ СИНТЕЗ СЕРЕБРЯНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ЛЕЧЕНИЯ РАН ……	858
А.Р. Кажмуратов, **И.О. Сапаргали**, **Е.Н. Есжан**, **М.С. Кунарбекова, М. Токтар** ВОЗДЕЙСТВИЕ ХОЛОДНОЙ ПЛАЗМЫ НА ВОДНУЮ СРЕДУ И ЕЁ ЗАГРЯЗНИТЕЛИ: ОБЗОР…….	874
Y.O. Andrienko, R.M. Nesmeyanova, S.R. Massakbayeva, S.Yu. Kovtareva, O.E. Mukashev MECHANISMS OF POLYOLEFIN (PP AND PE) DEGRADATION AND COMPARATIVE CHARACTERISTICS OF PRIMARY AND SECONDARY POLYOLEFINS……	893
Ш.А. Муздыбаева, К.Б. Мусабеков, Н.К. Нокербекова, А.Ж. Женисова, Д.М-К Ибраимова ФЛОКУЛЯЦИЯ ГИДРОСУСПЕНЗИИ БЕНТОНИТОВОЙ ГЛИНЫ, ИСПОЛЬЗУЕМОЙ В ОЧИСТКЕ ШАХТНОЙ ВОДЫ ГОРНОРУДНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ, ПОЛИАКРИЛАМИДНЫМИ ПОЛИЭЛЕКТРОЛИТАМИ ……	904
Р.А. Турманов, Б.Г. Алимхан, Р.У. Жаппарбергенов, Н.Ә. Тоғызбаева, Н.О. Аппазов 4*H*-1,2,4-ОКСАДИАЗИН-5(6*H*)-ОН ЖАҢА ТУЫНДЫЛАРЫНЫҢ СИНТЕЗІ.....	914
А.Б. Маханбетов, Т.Э. Гаипов, Д.Х. Юлдашбек, А.М. Кенжегалиев, Г.Д. Исенова ПОЛУЧЕНИЕ ПОЛИСУЛЬФИДНОЙ КОМПОЗИЦИИ ИЗ ПРОМЫШЛЕННОГО ОТХОДА И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ В ФИТОСАНИТАРНОЙ ЗАЩИТЕ РАСТЕНИЙ.....	923
У.Е. Жантикеев, Л.Н. Сеймуханова, Д.Р. Мулдаш, Ш.Т. Султахан, М. Токтар ВЛИЯНИЕ ХОЛОДНОЙ ПЛАЗМЫ НА СВОЙСТВА ПОЧВЫ И РЕМЕДИАЦИЮ ЗАГРЯЗНЁННЫХ ГРУНТОВ: ОБЗОР……..	935
Ю.Ю. Бакланова, В.В. Яковлев, О.С. Букина, В.В. Бакланов ИММОБИЛИЗАЦИЯ ЖИДКИХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ В БИТУМНОЙ МАТРИЦЕ……....	955
У.Е. Жантикеев, Д.Т. Ыбырайымкул, Н.Б. Абильшаиков, М. Алипулы, К.С. Бексейтова РЕАКТОРЫ ХОЛОДНОЙ ПЛАЗМЫ В ПРОЦЕССАХ ОЧИСТКИ ВОДЫ: КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ, МЕХАНИЗМЫ ДЕЙСТВИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОГРАНИЧЕНИЯ…….	964
А. Кливенко, Г. Елемесова, В. Бакланов, О. Букина, Ю. Бакланова СИНТЕЗ И СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ ГИДРОГЕЛЕЙ В КАЧЕСТВЕ КАНДИДАТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СОРБЦИИ ЖИДКИХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ ……	976
АВТОРЛАРҒА АРНАЛҒАН ЕРЕЖЕ.....	986
ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ.....	991
RULES FOR AUTHORS.....	996

Басуға жіберілген күні 30.09.2026 ж. Пішімі 60х84 1/8
Шартты баспа табағы 62,5
Таралымы 100 дана. Бағасы келісімді.

Техникалық редакторы: Е.П. Евлампиева, З.Т. Семейская
Безендіруші: С.Т. Мырзабеков

Журнал Қазақстан Республикасы Ақпарат және қоғамдық даму министрлігінің
Ақпарат комитетінде тіркелген
Есепке қою туралы куәлік № KZ93VPY00033663 19.03.2021 ж.

Жылына 4 рет шығады

Құрылтайшысы: «Шәкәрім университеті»
коммерциялық емес акционерлік қоғам

Шәкәрім университетінің
баспаханасында басылды

Редакцияның мекен-жайы: 071412, Абай облысы,
Семей қаласы, ул. Глинки, 20 А
Тел.: +7 (7222) 31-32-49, эл.почта: rio@shakarim.kz