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

№1 (21)
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

№ 1 (21) 2026

Семей, 2026

Ғылыми журнал
«Шәкәрім Университетінің Хабаршысы.
Техникалық ғылымдар сериясы»

№ 1 (21) 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 – **Есимбеков Жанибек Серикбекович**, PhD (Қазақстан, Семей қ.)

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, Ридинг университеті (Ұлыбритания, Ридинг 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

Копирайт: © Безендіру, құрастыру, редакциялау.
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.

© «Шәкәрім университеті» коммерциялық емес акционерлік қоғам, 2026

Научный журнал
«Вестник Университета Шакарима. Серия технические науки»

№ 1 (21) 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 – **Есимбеков Жанибек Серикбекович,** PhD (Казахстан, г. Семей)

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

Копирайт: © Оформление, составление, редактирование.
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.

© Некоммерческое акционерное общество «Шәкәрім университет», 2026

Scientific journal
«Bulletin of Shakarim University. Technical Sciences»

№ 1 (21) 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 – Yessimbekov Zhanibek, PhD (Kazakhstan, Semey)

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

Copyright: © Compilation, design, editing. 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.

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

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-1

ҒТАХР: 50.01.11

А. Хабай[1,2], Е.А. Тулешов[1]*, Н.Т. Тұрар[1], Ж.Н. Исабеков[1], А.Е. Назырова[3]
[1]Satbayev University,
050013, Қазақстан Республикасы, Алматы, қ-сі. Сатпаева, 22а
[2]Алматы Технологиялық Университеті,
050013, Қазақстан Республикасы, Алматы, қ-сі. Төле би көшесі, 100
[3]Л.Н. Гумилёв атындағы Еуразия ұлттық университеті,
10000, Қазақстан, Астана қ., Сәтбаев к-сі, 2
***e-mail: y.tuleshov@satbayev.university**

5G МОБИЛЬДІ ЖҮЙЕЛЕРІНДЕ ТОҚТЫҚ РЕЖИМДЕ ЖҰМЫС ІСТЕЙТІН ҚУАТ КҮШЕЙТКІШІНІҢ ЖҰМЫС ТИІМДІЛІГІНЕ ТАЛДАУЫ

Аңдатпа: *Бұл мақалада 5G мобильді байланыс жүйелерінің FR1 (6 ГГц-ден кіші) диапазонында, нақтырақ айтқанда 3,4-3,8 ГГц аймағында қолдануға арналған токтық режимдегі D-класс қуат күшейткішінің (CMCD) жұмыс принципі, энергия тиімділігі және жиілікке тәуелді сипаттамалары қарастырылады. Күшейткіш коммутациялық режимде жұмыс істейтін классикалық push-pull CMCD архитектурасына негізделген және ток пен кернеу толқындарының уақыт бойынша қабаттаспауын қамтамасыз ету арқылы коммутациялық шығындарды азайтып, жоғары теориялық тиімділікке қол жеткізу мүмкіндігін көрсетеді.*

Талдау барысында дренаждық шын кернеуі, ток пен кернеу толқын пішіндері, жүктеме шарттары және жиілікке тәуелді параметрлер зерттелді. Модельдеу нәтижелері күшейткіштің 3,4-3,8 ГГц диапазонында тұрақты жұмыс істейтінін және жиілік артқан сайын күшейту коэффициенті мен тиімділіктің төмендеу үрдісі байқалатынын көрсетті. Бұл құбылыс транзисторлардың коммутациялық шығындарының артуымен және пассив элементтердің паразиттік параметрлерінің әсерімен түсіндіріледі. Алынған нәтижелер CMCD қуат күшейткішінің 5G FR1, әсіресе 3,5 ГГц аймағында жұмыс істейтін мобильді байланыс жүйелерінде қолдануға жарамды екенін және болашақта нақты RF транзистор модельдерін (LDMOS/GaN/CMOS) және паразиттік параметрлерді ескеру арқылы практикалық дәлдігін арттыруға болатынын көрсетеді.

Түйін сөздер: *CMCD, 5G FR1, push-pull архитектурасы, радиожиілікті дроссель, коммутациялық шығындар, дренаждық шын кернеуі, RF модельдеу.*

Кіріспе

Байланыс технологиясының қарқынды дамуымен бүкіл әлем бойынша тасымалданатын деректер көлемі айтарлықтай артып келеді [1]. Спектрлік ресурстарды тиімді пайдалану қажеттілігі сымсыз байланыс жүйелерінде жоғары өткізу қабілетін қамтамасыз ететін күрделі модуляция әдістерінің кеңінен қолданылуына әкелді [2-3]. Мұндай сигналдар, әдетте, шыңнан орташаға қатынасы (PAPR) жоғары сигналдар болып табылады, сондықтан оларды күшейту кезінде дәстүрлі қуат күшейткіштері жеткілікті тиімділік көрсете алмайды [4-5]. Осыған байланысты қазіргі заманғы байланыс жүйелері үшін жоғары тиімділікке ие қуат күшейткіш архитектураларын әзірлеу өзекті мәселе болып табылады.

Шығыс қуатының төмендеу аймағында тиімділікті арттыру мақсатында асимметриялық және көп тармақты архитектуралар кеңінен зерттелді [6-7]. Мұндай тәсілдер жүктеме модуляциясын кеңейту арқылы тиімділікті арттыруға мүмкіндік бергенімен, схемалық күрделіліктің өсуіне және белсенді құрылғылардағы қосымша шығындарға әкеледі. Осы бағытта соңғы жылдары кіріс сигналдарының фазасы мен амплитудасын сандық әдістермен басқаруға негізделген қос кірісті Догерти қуат күшейткіштері (ДҚУ) ұсынылды [8-11]. Бұл архитектуралар шығыс қуатының төмендеу резервін (ҚТР) кеңейтуге мүмкіндік береді, алайда

©А. Хабай, Е.А. Тулешов, Н.Т. Тұрар, Ж.Н. Исабеков, А.Е. Назырова, 2026

сандық басқару тізбектерінің күрделілігі мен өндірістік шығындардың артуы олардың практикалық қолданылуын шектейді. Мұндай шешімдер 5G FR1 (6 ГГц-ден кіші, sub-6 GHz) диапазонында, әсіресе 3,5 ГГц аймағында жұмыс істейтін мобильді байланыс жүйелері үшін перспективті болып саналады.

Тиімділікті арттырудың баламалы жолдары симметриялық архитектуралар негізінде де қарастырылған [8-11]. Бұл жұмыстарда жүктеме модуляциясын жетілдіру арқылы тиімді жұмыс аймағын кеңейту мүмкіндігі көрсетілген. Осы тұрғыдан алғанда, токтық режимде жұмыс істейтін қуат күшейткіштері кернеулік режимдегі аналогтарымен салыстырғанда дренаждық шың кернеуінің төмендігімен және жоғары теориялық тиімділігімен ерекшеленеді. Мұндай қасиеттер оларды 5G sub-6 ГГц диапазонында, әсіресе 3.5 ГГц аймағында жұмыс істейтін мобильді байланыс жүйелерінде қолдану үшін перспективті етеді.

Қуат күшейткіштері 5G мобильді байланыс жүйелерінің энергия тиімділігін анықтайтын негізгі функционалдық түйіндердің бірі болып табылады. Базалық станциялар мен қолданушы құрылғыларында қуат тұтынуды азайту және жылулық жүктемені төмендету үшін күшейткіштердің жоғары тиімділікпен жұмыс істеуі талап етіледі. Осыған байланысты токтық режимде жұмыс істейтін D-класс қуат күшейткіші (CMCD PA) кернеулік режимдегі D-класс күшейткіштерімен (VMCD) салыстырғанда энергия тиімділігі мен коммутациялық режимдегі артықшылықтарымен қызығушылық тудырады.

Осы жұмыстың мақсаты 5G FR1 желілік жағдайларында классикалық push-pull CMCD архитектурасын пайдаланудың тиімділігін талдау және 3,4-3,8 ГГц диапазонында жүргізілген модельдеу нәтижелері негізінде оның жиілікке тәуелді сипаттамаларын бағалау.

Материалдар мен тәсілдер

5G жүйелері әртүрлі жиілік диапазондарын қамтиды. Бұл зерттеу 5G FR1 (6 ГГц-ден кіші) үшін, нақтырақ айтқанда 3,4-3,8 ГГц диапазонында қуат күшейткішінің тиімділігі мен жиілікке тәуелді сипаттамаларын бағалауға бағытталған. Мұнад сигналды сапалы беру үшін қуат күшейткішінің тиімділігі мен жұмыс тұрақтылығы аса маңызды. CMCD архитектурасы қуат шығынын азайтып, тиімділікті арттыруға көмектеседі. CMCD күшейткіші екі тармақтан тұрады, олардың әрқайсысында радиожиілікті дроссель және NMOS транзисторлары орналасқан. Бұл схема 5G жиіліктерінде тиімді жұмыс істеуге бейімделген.

Токтық режимдегі жұмыс жасайтын қуат күшейткіші, кернеулік режимдегі тоқ негізінде жұмыс жасайтын қуат күшейткішінің негізгі нұсқасы болып табылады. Оның архитектурасы екі тармақтан тұрады, олардың әрқайсысында радио жиілікті дроссель және NMOS транзисторы бар. Бұл тармақтар орталық жиілікке бапталған RLC дифференциалды желісімен байланысады. Тоқ негізіндегі қуат күшейткіші идеалды қосқыштық жұмыс принципінің арқасында 100% теориялық тиімділікке қол жеткізе алады. Бұл тиімділік транзисторлардың тек кернеуді немесе токты өткізуімен сипатталуына байланысты болады, яғни олар ешқашан екеуін бір уақытта өткізбейді [12-13].

MOSFET транзисторлары кернеуді қосу және ажырату арқылы токтың белгілі бір бағытта ағуын қамтамасыз етеді. Радиожиілікті дроссельдер тұрақты ток көздерін қамтамасыз етіп, сигналды жоғары жиіліктен оқшаулайды. Жүктеме желісі (R_L,L_f,C_f) орталық жиілікте ток пен кернеуді синусоидалық формаға түрлендіреді. Бұл схема ток пен кернеу қабаттаспай жұмыс істейтіндіктен, қуаттың ысырабын барынша азайтып, жоғары тиімділікке қол жеткізеді. V_{DD} – күшейткішті тұрақты токпен қамтамасыз ететін негізгі қуат көзі. Токтық режимдегі жұмыс жасайтын қуат күшейткіші схемасы 1 суретте келтірілген.

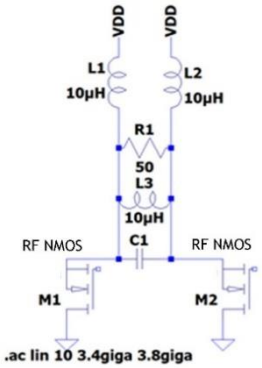
Бұл жұмыста архитектуралық принципті көрсету үшін транзистор идеал қосқышқа жақын модель ретінде қарастырылды; нақты 3.5 ГГц іске асыруда sub-6 ГГц-ке арналған RF транзистор моделі (LDMOS/GaN/CMOS RF) қолданылуы тиіс.

Компоненттік база және модельдеу параметрлері

Бұл жұмыста токтық режимдегі Class-D (CMCD) қуат күшейткішінің жұмыс принципін және 5G sub-6 ГГц диапазонындағы жиілікке тәуелді сипаттамаларын бағалау үшін сызбадағы M1 және M2 транзисторлары RF-қосқыштық NMOS моделі ретінде қарастырылды. Зерттеудің мақсаты нақты бір өнеркәсіптік транзистордың паспорттық параметрлерін дәл көшіру емес, CMCD архитектурасының коммутациялық режимдегі жұмысын, ток пен кернеу толқындарының қабаттасуын азайту идеясын және жүктеме желісінің бапталуына байланысты жиілік әсерін көрсету болып табылады. Сондықтан модельдеуде транзисторлар үшін қосу/ажырату процесін сипаттайтын шектеулі параметрлер (ашық күйдегі кедергі,

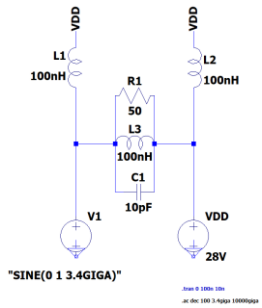
паразиттік сыйымдылықтар және коммутациялық уақыт) ескерілген идеалдандырылған қосқыштық модель қолданылды. Нақты аппараттық іске асыру кезінде 3.4-3.8 ГГц диапазонында жұмыс істеуге арналған RF LDMOS/GaN HEMT немесе CMOS RF құрылғыларын және олардың сызықтық емес (nonlinear) модельдерін пайдалану қажет.

Модельдеу 5G-дің 3.5 ГГц аймағына сәйкес келетін 3.4-3.8 ГГц жиілік диапазонында жүргізілді. Қорек көзі ретінде VDD тұрақты кернеуі қолданылды, ал шығыс жүктемесі R1=50 Ω ретінде алынды. Қуат күшейткіштің жүктеме желісі орталық жиілікке бапталған параллель RLC контурымен жүзеге асырылды (L3 және C1 элементтері). Тұрақты токты беру және радиожиіліктегі сигналдың қорек желісіне өтуін шектеу үшін екі тармақта RFC қызметін атқаратын индуктивтіктер (L1 және L2) қолданылды. Кіріс басқару сигналдары транзисторларға 180° фазалық ығысумен беріліп, жұмыс циклі 50% болатын қарсы фазалы қоздыру режимі қамтамасыз етілді. Жиілікке тәуелді күшейту мен тиімділік параметрлері AC sweep режимінде алынып, алынған нәтижелер бойынша жиілік артқан сайын коммутациялық шығындар мен пассивті элементтердің паразиттік параметрлері (ESR/ESL және өзіндік резонанстық жиілік әсері) күшейткіштің сипаттамаларына әсер ететіні талданды.



Сурет 1 – Тоқ негізіндегі қуат күшейткішінің схемасы

Мұнда M1 және M2 – архитектуралық талдау үшін алынған RF-қосқыштық NMOS модельдері (идеалдандырылған). Нақты sub-6 ГГц іске асыруда RF LDMOS/GaN/CMOS транзисторлары қолданылуы тиіс. Тоқ негізіндегі қуат күшейткішінің құрылымында транзисторлар қарама-қарсы фазадағы екі шаршы толқынмен басқарылады. Осылайша, бір уақытта тек бір ғана транзистор қосулы болады. Радиожиілікті дроссельдер тұрақты ток көздері ретінде әрекет ететіндіктен, ток тізбектің бір тармағынан екіншісіне ауысып, RLC желісі арқылы өтеді. Нәтижесінде, токтың шаршы толқын пішініне ие болып, әр тармақта 50% толтыру коэффициенті болады. Сонымен қатар, екі сигнал 180 градусқа фазалық ығысуға ие болады. Бұл жұмыс принципі 2 суретте көрсетілген.



Сурет 2 – Class-D қуат күшейткішіндегі ток ағымы

Нөлдік орташа мәні бар шаршы ток толқыны RLC желісіне беріледі. Бұл ток толқынының уақыттық сипаттамасы Фурье қатары арқылы өрнектеледі. Шаршы толқынның жалпы өрнегі келесідей беріледі:

$$i_{RLC}(\theta) = \sum_{-\infty}^{0} i - k^{e^{jk\theta}} + \sum_{-\infty}^{0} i - k^{e^{-jk\theta}} = i_k\left(e^{jk\theta} + e^{-jk\theta}\right) \quad (1)$$

мұнда $\theta = \omega_0 t$ және $i_k = i_{-k}$, өйткені $i_{RLC}(\theta)$ жұп функция болып табылады. Фурье қатарының бірінші мүшесі былайша өрнектеледі:

$$i_0 = \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{-\frac{\pi}{2}} \frac{-I_{peak}}{\omega_0} e^0 d\theta + \frac{1}{2\pi}\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{-I_{peak}}{\omega_0} e^0 d\theta \quad (2)$$

бұл $i_0 = 0$ мәніне әкеледі. Сондай-ақ, i_k мәнін келесі түрде есептеуге болады:

$$i_0 = \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{-\frac{\pi}{2}} \frac{-I_{peak}}{\omega_0} e^{-jk\theta} d\theta + \frac{1}{2\pi}\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{-I_{peak}}{\omega_0} e^{-jk\theta} d\theta = \frac{8I_{peak}}{\omega_0} \sin\left(\frac{k\pi}{4}\right)^3 \cos(\frac{k\pi}{4}) \quad (3)$$

Теңдеулер 1 және 3 біріктірілгенде, шаршы толқынның формуласы алынады.

$$i_{RLC}(\theta) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{16I_{peak}}{k\pi} \sin\left(\frac{k\pi}{4}\right)^3 \cos(\frac{k\pi}{4}) \cos(k\theta) \quad (4)$$

Оны келесідей қарапайым түрге келтіруге болады.

$$i_{RLC}(\theta) = \sum_{k=odd}^{\infty} \frac{4I_{peak}}{k\pi} \sin(\frac{k\pi}{2}) \cos(k\theta) = \frac{4I_{peak}}{\pi} \sum_{k=odd}^{\infty} \frac{1}{k} \cos(k\theta + \varphi_k) \quad (5)$$

мұндағы φ_kкелесі мәндерді қабылдайды. $\begin{cases} 0 & k = 1,5,9,\ldots \\ \pi rad & k = 3,7,11,\ldots \end{cases}$

RLC параллель желісі негізгі f_c жиілігіне бапталғандықтан, басқа барлық жиіліктерде ол қысқа тұйықталу сияқты әрекет етеді. Осылайша, тек қызығушылық жиілігінде, яғни синусоидалық ток толқыны арқылы R_L -ден ток өтеді. Сондықтан R_L жүктемесінде синусоидалық кернеу толқыны да пайда болады, бұл схеманың әр тармағында жартылай синусоидалық толқын бар екенін білдіреді. Осылайша, жүктеме желісіндегі кернеуді келесідей өрнектейміз.

$$V_{RLC}(\theta) = |I_1| R_L \cos(\theta + \varphi_1) = \frac{4}{\pi} I_p R_L \cos(\theta) \quad (6)$$

Radio Frequency Chokes (Радиожиілік дроссельдері) арқылы кернеу түспеген жағдайда әр тармақта орташа мәні V_{DD} -ға тең жартылай синусоидалық толқын пайда болады, бұл кезде MOSFET транзисторының дренаждық кернеу шығының мәні πV_{DD}-ге тең болады [13]. Бұл келесі түрде алынады:

$$V_{DD} = \frac{1}{2\pi}\int_0^{\pi} \frac{V_{DS}(\theta)}{\omega} d\theta = \frac{1}{2\pi}\int_0^{\pi} \frac{V_{peak}\sin(\theta)}{\omega} d\theta = \frac{V_{peak}}{\omega} \quad (7)$$

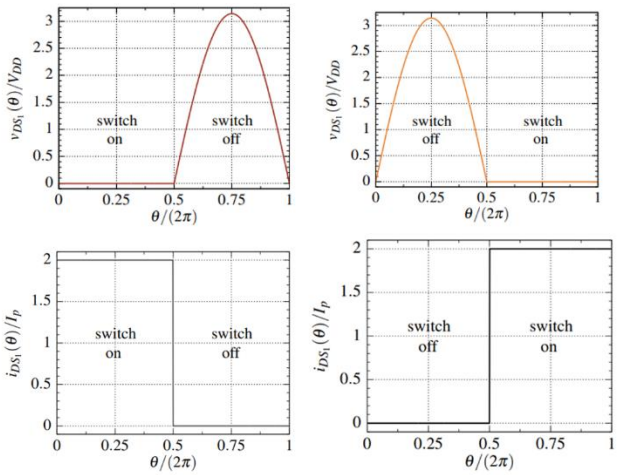
Тоқ негізіндегі қуат күшейткішінде дренаждық кернеу мен токтың толқын пішіндері әртүрлі сипатқа ие, себебі жүктеме желісі (RLC контуры) орталық жиілікке бапталған. Бұл синусоидалық толқын пішіндерін қалыптастыруға мүмкіндік береді. Осы қарастырып отырған тоқ негізіндегі қуат күшейткішінің дренаждық шың кернеуі V_{DD}-ға тең болады [10]. Енді қуат күшейткіші үшін толқын пішіндерін көрсете аламыз. Мұны жүзеге асыру үшін дренаждық токтың шың мәнін де есептеу қажет. Vpeak-тің мәні белгілі болған жағдайда, шыңдық ток мәні келесі формула арқылы анықталады:

$$I_{peak} = \frac{\pi^2}{4} \cdot \frac{V_{DD}}{R_L} \quad (8)$$

Нәтижелер мен талқылаулар.

Дренаждық кернеу мен токтың шың мәндерін ескере отырып, сондай-ақ жүктеме желісі үшін сапа факторы QLQ_LQL шексіз деп қабылданғанда, әр тармақта дренаждық кернеу жартылай синусоидалық толқын түрінде, ал дренаждық ток 50% жұмыс циклінде (duty cycle) шаршы толқын түрінде болады. Тоқ негізінде қуат күшейткіші үшін идеал толқын пішіндері 3 суретте көрсетілген.

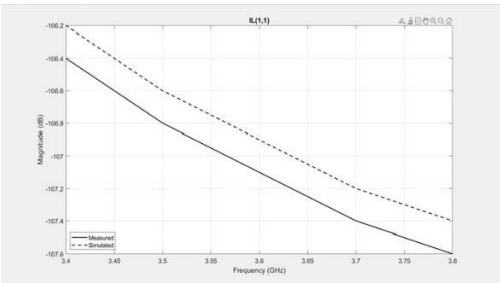
3 суретте көрсетілген кернеу және ток толқын пішіндері жүктеме желісінің сапа факторы өте үлкен деп қабылданған идеалдандырылған жағдай үшін алынған. Бұл жағдайда RLC жүктеме желісі негізгі гармониканы іріктеп, дренаждық кернеудің жартылай синусоидалық, ал дренаждық токтың 50% жұмыс циклідегі шаршы толқын пішінінде қалыптасуын қамтамасыз етеді. Нақты практикалық құрылғыларда транзисторлардың сызықтық емес сипаттамалары, коммутациялық уақыттары, сондай-ақ пассивті элементтердің паразиттік сыйымдылықтары мен индуктивтіліктері бұл толқын пішіндерінің бұрмалануына әкелуі мүмкін. Сондықтан көрсетілген толқын пішіндері CMCD қуат күшейткішінің жұмыс принципін және теориялық шектегі тиімділік мүмкіндігін сипаттайды, ал нақты 3.4-3.8 ГГц диапазонындағы жұмыс режимдері келесі бөлімде модельдеу нәтижелері арқылы бағаланады.



Сурет 3 – CMCD қуат күшейткішінің толқындық пішіндері
(a) 1-ші қосқыштағы кернеу толқын пішіні, (b) 2-ші қосқыштағы кернеу толқын пішіні,
(c) 1-ші қосқыштағы ток толқын пішіні, (d) 2-ші қосқыштағы ток толқын пішіні

Алдыңғы бөлімде қарастырылған кернеу мен токтың идеал толқын пішіндері CMCD қуат күшейткішінің жұмыс принципін және теориялық тиімділік шегін сипаттайды. Алайда нақты жұмыс режимінде күшейткіштің жиілікке тәуелді сипаттамалары транзисторлардың коммутациялық қасиеттеріне, жүктеме желісінің параметрлеріне және пассив элементтердің паразиттік әсерлеріне тәуелді болады. Осы себепті күшейткіштің нақты жұмыс қабілетін бағалау үшін 5G sub-6 ГГц диапазонына сәйкес келетін 3.4-3.8 ГГц аралығында модельдеу жүргізілді.

Күшейткіштің жиілікке тәуелді сипаттамаларын зерттеу үшін 3.4-3.8 ГГц диапазонында модельдеу жүргізілді. Алынған нәтижелер күшейту коэффициентінің (G) және күшейткіштің тиімділігінің жиілікке байланысты өзгерісін көрсетеді. Модельдеу нәтижелері бойынша жиілік артқан сайын, яғни зерттелген диапазонның жоғарғы шегіне жақындаған кезде, күшейту коэффициентінің біртіндеп төмендеуі байқалады (сурет 4).



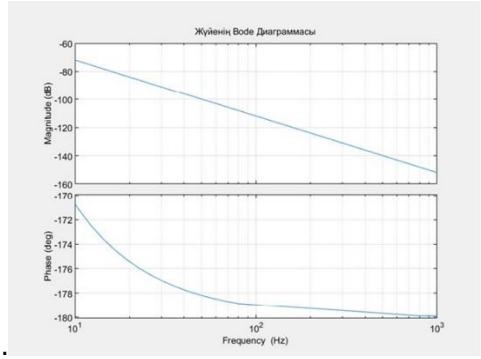
Сурет 4 – Күшейткіштің 3.4 ГГц-тен 3.8 ГГц-ке аралығындағы моделдеуден алынған нәтиже

Тиімділіктің жиілікке тәуелділігін сипаттайтын нүктелі сызық та төмендеу трендін көрсетеді, бұл күшейткіштің 3.4-3.8 ГГц диапазонының жоғарғы бөлігінде салыстырмалы түрде төмен тиімділікпен жұмыс істейтінін білдіреді. Мұндай құбылыс транзисторлардың коммутациялық шығындарының артуымен, сондай-ақ индуктивтілік пен сыйымдылық элементтерінің паразиттік параметрлерінің әсерімен түсіндіріледі.

Айта кету қажет, берілген нәтижелер идеалдандырылған RF-қосқыштық транзистор моделіне негізделген. Нақты аппараттық іске асыру кезінде транзисторлардың сызықтық емес сипаттамалары мен паразиттік элементтер бұл әсерді күшейтуі мүмкін. Осыған қарамастан, алынған нәтижелер CMCD қуат күшейткішінің 5G sub-6 ГГц, атап айтқанда 3.5 ГГц аймағында жұмыс істейтін радио-жиілікті байланыс жүйелері үшін қолдануға жарамды.

Күшейткіштің жоғары жиілікті (3.4-3.8 ГГц) жұмыс режимдері алдыңғы бөлімде қарастырылды. Сонымен қатар, жүктеме желісінің динамикалық қасиеттерін және токтың амплитуда-фазалық өзгерісінің жалпы үрдісін талдау үшін төмен жиілікті эквиваленттік модель негізінде жиілікке тәуелді сипаттамалар қосымша қарастырылды. Бұл талдау нақты радиожиіліктегі жұмыс режимін тікелей сипаттауға емес, CMCD күшейткішіндегі индуктивті-сыйымдылық элементтердің әсерін сапалық тұрғыдан көрсетуге бағытталған.

5 суретте эквиваленттік жүктеме желісінің төмен жиілікті моделы үшін алынған ток амплитудасы мен фазасының жиілікке тәуелді сипаттамалары көрсетілген. Мұнда жиілік осі герцпен (Гц) берілген, себебі бұл талдау радиожиілікті жұмыс диапазонын тікелей модельдеуге емес, индуктивті және сыйымдылық элементтердің жүйенің фазалық және амплитудалық сипаттамаларына әсерін сапалық тұрғыдан бағалауға арналған.



Сурет 5 – Эквиваленттік жүктеме желісі үшін ток амплитудасы мен фазасының жиілікке тәуелді сипаттамалары (төменжиілікті модель)

Графиктен төмен жиіліктерде ток амплитудасының жоғары мәнге ие болатыны, ал жиілік артқан сайын оның біртіндеп төмендейтіні байқалады, бұл сүзгілеу қасиеттері бар жүктеме желісіне тән құбылыс болып табылады. Фазаның жиілікке байланысты өзгеруі индуктивті элементтердің реактивті әсерімен түсіндіріледі және жүйеде фазалық кешігудің пайда болатынын көрсетеді.

Айта кету қажет, бұл Bode диаграмма 3.4-3.8 ГГц диапазонында алынған нақты модельдеу нәтижелерін алмастырмайды және тек жүктеме желісінің динамикалық қасиеттерін түсіндіру мақсатында келтірілген. Нақты радиожиілікті жұмыс режимдері алдыңғы бөлімде көрсетілген жоғары жиілікті модельдеу нәтижелері арқылы бағаланады.

Қорытынды

Бұл мақалада 5G FR1 (6 ГГц-ден кіші) мобильді жүйелерінде қолдану үшін токтық режимдегі D-класс қуат күшейткішінің жұмыс принципі, тиімділігі және жиілікке тәуелді сипаттамалары жан-жақты талданды. Зерттеу жаңа немесе “бірегей” архитектура ұсынуға емес, 5G FR1 желілік жағдайларында классикалық push-pull D-класс қуат күшейткішінің архитектурасын пайдаланудың тиімділігін талдауға бағытталды. Идеал қосқыштық режимде ток пен кернеу толқындарының қабаттаспай жұмыс істеуі теориялық тұрғыдан жоғары тиімділікке (идеал жағдайда 100%-ға дейін) қол жеткізу мүмкіндігін көрсетеді, бұл энергия шығынын азайтуға және жылулық жүктемені төмендетуге негіз болады.

Модельдеу нәтижелері күшейткіштің 3,4-3,8 ГГц диапазонында тұрақты жұмыс істейтінін, ал жиілік артқан сайын күшейту коэффициенті мен тиімділіктің төмендеу үрдісі байқалатынын көрсетті. Бұл құбылыс транзисторлардың коммутациялық шығындарының артуымен және пассив элементтердің паразиттік параметрлерінің әсерімен түсіндіріледі. Сондықтан нақты аппараттық іске асыруда RF транзисторлардың (LDMOS/GaN/CMOS) сызықтық емес модельдерін қолдану, жүктеме желісінің параметрлерін дәл баптау және паразиттік әсерлерді азайту арқылы тиімділікті жақсарту маңызды.

Зерттеудің шектеулері. Бұл зерттеуде 3,5 ГГц жиілік диапазоны үшін идеалдандырылған коммутатор моделін пайдалану нақты транзисторлардың паразиттік реактивті параметрлерін (мысалы,Cds, Cgd) толық ескерілмейді. Осыған байланысты алынған нәтижелер және теориялық шектегі тиімділік (идеал жағдайда 100%) архитектураның соңғы практикалық бағасы болып табылмайды және шектік теориялық мүмкіндік ретінде қарастырылуы керек. Құрылғыны практикалық іске асыру 3,4-3,8 ГГц (әсіресе 3,5 ГГц) диапазонына тән коммутациялық шығындарды, паразиттік әсерлерді және нақты құрылғылардың сызықтық емес қасиеттерін есепке алуды талап етеді.

Қорыта айтқанда, токтық режимдегі CMCD қуат күшейткіші 5G FR1(6 ГГц-ден кіші), әсіресе 3,5 ГГц аймағында жұмыс істейтін мобильді байланыс жүйелері үшін перспективті шешім болып табылады. Болашақта элементтік базаны және схемалық параметрлерді

оңтайландырумен қатар, нақты RF транзистор модельдерін және паразиттік параметрлерді толық енгізу арқылы оның практикалық қолдану тиімділігін арттыруға болады.

Әдебиеттер тізімі

1. Bandwidth Enhancement of Догерти Power Amplifier Using Modified Load Modulation Network / M. Li et al // IEEE Trans. Circuits Syst. I Regul. Pap. – 2020, № 67. – P. 1824-1834. https://doi.org/10.1109/TCSI.2020.2972163.
2. Boumaiza S. Multispectrum Signal Transmitters: Advances in Broadband High-Efficiency Power Amplifiers for Carrier Aggregated Signals / S. Boumaiza, H. Golestaneh, M.N.A. Abadi // IEEE Microw. Mag. – 2014, № 15. – P. S14-S24. https://doi.org/10.1109/MMM.2014.2356150.
3. Akbarpour M. A Transformer-Less Load-Modulated (TLLM) Architecture for Efficient Wideband Power Amplifiers / M. Akbarpour, M. Helaoui, F.A Ghannouchi, // IEEE Trans. Microw. Theory Tech – 2012. – № 60. – P. 2863-2874. https://doi.org/10.1109/TMTT.2012.2206050.
4. Barton, New mixed mode design methodology for high-efficiency out-phasing chireix amplifiers / H.C. Chang et al // IEEE Trans. Circuits Syst. I Reg. Pap. – 2019. – № 66. – P. 1594-1607. https://doi.org/10.1109/tcsi.2018.2882770.
5. Design of a Broadband High-Efficiency Hybrid Class-EFJ Power Amplifier / Z. Zhang et al // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. – 2020. – vol. 30, № 4. – P. 407-409. https://doi.org/10.1109/LMWC.2020.2973487.
6. Design of a Post-Matching Asymmetric Догерти Power Amplifier for Broadband Applications / J. Pang et al // IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett. – 2015. – № 26. – P. 52-54. https://doi.org/10.3390/en17092006.
7. Optimum operation of asymmetrical-cells-based linear Doherty power Amplifiers-uneven power drive and power matching / J. Kim et al // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. – 2005. – № 53. – P. 1802-1809. https://doi.org/10.1109/TMTT.2005.847073.
8. Fang X.H. Extension of High-Efficiency Range of Doherty Amplifier by Using Complex Combining Load / X.H. Fang, K.-K.M. Cheng // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. – 2014. – № 62. – P. 2038-20. https://doi.org/10.1109/TMTT.2014.2333713.
9. Özen, M. Symmetrical Doherty Power Amplifier with Extended Efficiency Range / M. Özen, K. Andersson, C. Fager // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. – 2016. – № 64. – P. 1273-1284. https://doi.org/10.1109/TMTT.2016.2529601.
10. Fang X.-H. Extended Efficiency Range, Equal-Cell Doherty Amplifier Design Using Explicit Circuit Model / X.-H. Fang, H.-Y. Liu, K.-K.M. Cheng // IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett. – 2017. – № 27. – P. 1-3. https://doi.org/10.1109/LMWC.2017.2690870.
11. Shi W. Extending high-efficiency power range of symmetrical Doherty power amplifiers by taking advantage of peaking stage / W. Shi, S. He, N. Gideon // IET Microw. Antennas Propag. – 2017. – № 11. – P. 1296-1302. https://doi.org/10.1049/iet-map.2017.0119.
12. Hasin M.R. Exploiting Phase for Extended Efficiency Range in Symmetrical Doherty Power Amplifiers / M.R. Hasin, J. Kitchen // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. – 2019. – № 67. – P. 3455-3463. https://doi.org/10.1109/TMTT.2019.2921366.
13. Two-Way Doherty Power Amplifier Efficiency Enhancement by Incorporating Transistors' Nonlinear Phase Distortion / X.-H. Fang et al // IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett. – 2018. – № 28. – P. 168-170. https://doi.org/10.1039/D1EE01508G.

А. Хабай[1,2], Е.А. Тулешов[1]*, Н.Т. Тұрар[1], Ж.Н. Исабеков[1], А.Е. Назырова[3]
[1]Satbayev University,
050013, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22а
[2]Алматинский технологический университет,
050013, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Толе би, 100
[3]Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева,
10000, Казахстан, г. Астана, ул. Сатпаева, 2
*e-mail: y.tuleshov@satbayev.university

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ, РАБОТАЮЩЕГО В ТОКОВОМ РЕЖИМЕ В СИСТЕМАХ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ 5G

В данной статье рассматриваются принцип работы, энергетическая эффективность и частотно-зависимые характеристики усилителя мощности класса D в токовом режиме (CMCD),

предназначенного для применения в диапазоне 5G FR1 (ниже 6 ГГц), в частности в полосе 3,4-3,8 ГГц. Усилитель основан на классической push-pull CMCD-архитектуре, работающей в коммутационном режиме, и демонстрирует возможность достижения высокой теоретической эффективности за счёт уменьшения коммутационных потерь благодаря минимизации временного перекрытия токовых и напряженческих форм сигналов.

В ходе анализа исследованы пиковое значение напряжения стока, формы токовых и напряженческих сигналов, условия нагрузки и частотно-зависимые параметры. Результаты моделирования показали, что усилитель стабильно работает в диапазоне 3,4-3,8 ГГц, при этом с ростом частоты наблюдается тенденция к снижению коэффициента усиления и эффективности. Данное явление объясняется увеличением коммутационных потерь транзисторов и влиянием паразитных параметров пассивных элементов. Полученные результаты подтверждают, что усилитель мощности CMCD применим в мобильных системах связи 5G FR1, особенно в области 3,5 ГГц, а в дальнейшем практическую точность можно повысить за счёт использования реалистичных RF-моделей транзисторов (LDMOS/GaN/CMOS) и учёта паразитных параметров.

Ключевые слова: *CMCD, 5G FR1, push-pull архитектура, радиочастотный дроссель (RFC), коммутационные потери, пиковое напряжение стока, RF-моделирование.*

A. Khabay[1,2], E. Tuleshov[1]*, N. Turar[1], Zh. Issabekov[1], A. Nazyrova[3]
[1]Satbayev University,
050013, Republic of Kazakhstan, Almaty, Satpayev Street, 22a
[2]Almaty Technological University,
050013, Republic of Kazakhstan, Almaty, Tole Bi Street, 100
[3]L.N. Gumilyov Eurasian National University,
10000, Kazakhstan, Astana, Satpayev str., 2
*e-mail: y.tuleshov@satbayev.university

ANALYSIS OF THE OPERATING EFFICIENCY OF A POWER AMPLIFIER OPERATING IN CURRENT MODE IN 5G MOBILE SYSTEMS

This paper investigates the operating principle, energy efficiency, and frequency-dependent characteristics of a current-mode class-D power amplifier (CMCD) intended for 5G FR1 (sub-6 GHz, below 6 GHz) applications, specifically within the 3.4-3.8 GHz band. The amplifier is based on a classical push-pull CMCD architecture operating in switching mode and demonstrates the potential for high theoretical efficiency by reducing switching losses through minimizing the temporal overlap between current and voltage waveforms.

The analysis examines the peak drain voltage, current and voltage waveforms, load conditions, and frequency-dependent parameters. Simulation results show stable operation across 3.4-3.8 GHz, while indicating a decreasing trend in gain and efficiency as frequency increases. This behavior is attributed to increased transistor switching losses and the impact of parasitic parameters of passive components. The results confirm that the CMCD power amplifier is suitable for 5G FR1 mobile communication systems, particularly around 3.5 GHz, and that practical accuracy can be further improved by employing realistic RF transistor models (LDMOS/GaN/CMOS) and explicitly accounting for parasitic effects

Key words: *CMCD, 5G FR1, push-pull architecture, radio-frequency choke (RFC), switching losses, drain peak voltage, RF simulation.*

Авторлар туралы мәліметтер

Анар Хабай – PhD, «Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Satbayev University, Алматы қ., Қазақстан, e-mail: a.khabay@satbayev.university, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0409-1531.

Еркебулан Амандыкович Тулешов* – техникалық ғылымдар кандидаты, «Роботты техника және автоматиканың техникалық құралдары» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Satbayev University, Алматы қ., Қазақстан, e-mail: y.tuleshov@satbayev.university, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9146-7137.

Нұрлыбек Тұрдыбекұлы Тұрар – «Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар» кафедрасының 1 курс магистранты, Satbayev University, Алматы қ., Қазақстан, e-mail: nurlybek.turar.01@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0009-0000-3383-7040.

Жанібек Назарбекұлы Исабеков – PhD, Роботты техника және автоматиканың техникалық құралдары кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Satbayev University, Алматы қ., Қазақстан, z.issabekov@satbayev.university, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2900-8025.

Айжан Есболқызы Назырова – PhD, «Жасанды интеллект технологиялары» кафедрасының аға оқытушысы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия Ұлттық Университеті, Астана қ., Қазақстан, e-mail: nazyrova_aye_1@enu.kz, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9162-6791.

Информация об авторах

Анар Хабай – PhD, ассоциированный профессор кафедры «Электроники, телекоммуникации и космических технологий», Satbayev University, г. Алматы, Казахстан, e-mail: a.khabay@satbayev.university, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0409-1531.

Еркебулан Амандыкович Тулешов* – кандидат технических наук, ассоциированный профессор кафедры «Робототехники и технических средств автоматики», Satbayev University, г. Алматы, Казахстан, e-mail: y.tuleshov@satbayev.university, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9146-7137.

Нурлыбек Турдыбекулы Турар – магистрант 1-го курса кафедры «Электроники, телекоммуникации и космических технологий», Satbayev University, г. Алматы, Казахстан, e-mail: nurlybek.turar.01@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0009-0000-3383-7040.

Жанибек Назарбекулы Исабеков – PhD, ассоциированный профессор кафедры «Робототехники и технических средств автоматики», Satbayev University, г. Алматы, Казахстан, e-mail: z.issabekov@satbayev.university, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2900-8025.

Айжан Есболовна Назырова – PhD, старший преподаватель кафедры «Технологий искусственного интеллекта», Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилёва, г. Астана, Казахстан, e-mail: nazyrova_aye_1@enu.kz, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9162-6791.

Information about the authors

Anar Khabai – PhD, Associate Professor of the Department of Electronics, Telecommunications and Space Technologies, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan, e-mail: a.khabay@satbayev.university, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0409-1531.

Yerkebulan Tuleshov* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Robotics and Engineering Tools of Automation, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan, e-mail: y.tuleshov@satbayev.university, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9146-7137.

Nurlybek Turar – Master's student at the Department of Electronics, Telecommunications and Space Technologies, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan, e-mail: nurlybek.turar.01@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0009-0000-3383-7040.

Zhanibek Issabekov – PhD, Associate Professor of the Department of Robotics and Engineering Tools of Automation, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan, e-mail: z.issabekov@satbayev.university, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2900-8025.

Aizhan Nazyrova – PhD, Senior Lecturer at the Department of Artificial Intelligence Technologies, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, e-mail: nazyrova_aye_1@enu.kz, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9162-6791.

Редакцияға енуі 19.09.2025
Өңдеуден кейін түсуі 18.12.2025
Жариялауға қабылданды 19.12.2025

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-2

CC BY 4.0
Check for updates

МРНТИ: 49.45.01

А.Е. Кулакаева[1], А.З. Айтмагамбетов[1], Е.А. Дайнеко[1,2], Г.Т. Джаканова[1], Б.А. Кожахметова[1,3*]

[1]Международный университет информационных технологий,
050040, Республика Казахстан, г. Алматы, улица Манаса, 34/1
[2]Satbayev University,
Республика Казахстан, г. Алматы, ул. К. Сатпаева, 22А
[3]Алматинский университет энергетики и связи им. Г. Даукеева,
050013, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Байтурсынова, 126/1
*e-mail: b.kozhakhmetova@iitu.edu.kz

К ВОПРОСУ О НЕОБХОДИМОСТИ ВНЕДРЕНИЯ ЦИФРОВОГО ЗВУКОВОГО ВЕЩАНИЯ В РЕСПУБЛИКЕ КАЗАХСТАН

Аннотация. *В данной статье рассматривается необходимость перехода Республики Казахстан к цифровому звуковому вещанию стандарта DRM для модернизации устаревшей аналоговой радиосети и обеспечения равного доступа к информационным ресурсам даже в*

©А.Е. Кулакаева, А.З. Айтмагамбетов, Е.А. Дайнеко, Г.Т. Джаканова, Б.А. Кожахметова, 2026

отдаленных районах. Цель заключается в обосновании технических, экономических и организационных преимуществ внедрения DRM в условиях сложного рельефа и низкой плотности населения. Для достижения поставленной цели проведен детальный анализ существующего аналогового звукового вещания, выявлены его недостатки по охвату территории и энергоэффективности. Выполнено моделирование зоны обслуживания с использованием программного обеспечения ICS Telecom для цифрового звукового вещания. При расчетах учитывались модели распространения радиосигнала ITU-R, в том числе ITU-R P.1546, и метод Deygout для оценки дифракционных потерь, что позволило получить примерную зону уверенного приема цифрового сигнала для частотного присвоения Алма-Ата-549 кГц при мощности передатчика 100 кВт, обеспечивающую радиус действия порядка 250 км. Результаты исследования свидетельствуют о том, что внедрение DRM позволяет значительно расширить охват территории (до 95% территории страны), снизить энергопотребление передатчиков как минимум на 50% по сравнению с аналоговыми системами, а также улучшить качество звука и обеспечить возможность интеграции дополнительных сервисов, таких как системы экстренного оповещения. Практическая значимость работы заключается в разработке поэтапного плана модернизации радиовещательной инфраструктуры за счет переоборудования законсервированных радиоцентров и эффективного использования национальных частотных присвоений, что позволяет существенно сократить капитальные и эксплуатационные затраты. Полученные результаты демонстрируют, что переход на цифровое звуковое вещание стандарта DRM является стратегическим шагом к цифровизации медиаиндустрии Республики Казахстан.

Ключевые слова: *DRM, цифровое звуковое вещание, радиопокрытие, управление радиочастотным спектром, оповещение населения.*

Введение

С развитием информационных технологий, качество и доступность медиасервисов становятся важнейшими факторами в интеграции и развитии национальной экономики. Республика Казахстан, обладая одной из крупнейших по площади территорий в мире (2724,9 тыс. км^2, занимая 9 место), в настоящее время сталкивается с серьезными вызовами в области звукового вещания, особенно в отношении покрытия удаленных и малонаселенных регионов, а также обеспечения непрерывного звукового вещания вдоль междугородних и международных автодорог.

В настоящее время аналоговая звуковая вещательная система Республики Казахстан больше не соответствует современным требованиям по качеству звука и эффективности распределения радиочастотного ресурса. Аналоговое звуковое вещание не только требует значительных затрат на содержание из-за своей низкой энергоэффективности, но также не способно обеспечить полное покрытие территории страны.

АО «Казтелерадио», занимая особое место в системе телерадиовещания Республики Казахстан, обеспечивает население страны доступом к радио- и телепрограммам. Компания функционирует как национальный оператор, управляя распространением контента в FM диапазоне и обслуживая обширную сеть из 631 радиопередатчика по всей территории страны. В соответствии с [1] в 2022 году компанией было заключено 30 договоров на предоставление аналогового звукового вещания. Однако все аналоговые передатчики компании на сегодняшний день морально и технически устарели, что делает их замену и модернизацию срочной необходимостью для повышения эффективности, надежности радиовещательной инфраструктуры, сокращения эксплуатационных расходов и минимизации воздействия на окружающую среду. Данные шаги становятся необходимыми условиями для улучшения качества звуковых вещательных услуг и обеспечения равного доступа к информации для всех жителей страны. Также в условиях растущих требований к качеству медийных услуг важную роль играет внедрение передовых технологий цифрового звукового вещания стандарта DRM (Digital Radio Mondiale). Также исследования [2-3] демонстрируют как современные методы обработки сигналов, могут улучшить надежность и качество приема радиосигналов.

Например, в работе [4] авторами исследуется переход от аналогового звукового вещания к цифровому в Индонезии. Результаты исследования авторов показали, что для успешного внедрения цифрового вещания в стране требуется обучение кадров, разработка единой платформы и социальная работа с населением. В свою очередь, внедрение цифрового звукового вещания обеспечит улучшенное качество звука, повышение энергоэффективности и устойчивость радиовещания в цифровую эпоху [5].

В работах [6-7] представлен практический опыт, результаты измерений и решения по внедрению цифрового звукового вещания стандарта DAB+ в Чешской Республике и Хорватии [7]. В исследовании [6] обсуждаются вопросы выделения полосы частот III Национальным регулирующим органом, емкости мультиплексов DAB+ (Digital Audio Broadcasting Plus), а также настройки головной станции и кодеков для мультимедийных сервисов. Результаты испытаний и измерений легли в основу создания общенациональной сети DAB+ и подтвердили эффективность внедрения стандарта, обусловленную оптимальным покрытием сети, высоким качеством звука и достаточным количеством транслируемых услуг.

Также технические основы проектирования сетей цифрового звукового вещания для Республики Венесуэлы с учетом ее климатических особенностей, электропроводности почвы в различных частях страны и распределения максимальных уровней атмосферных радиопомех рассмотрены в работе [8]. Исследование показало, что действующая аналоговая система в Венесуэле имеет низкое качество сигнала из-за высокого уровня атмосферного шума, особенно в экваториальной зоне. В работе рассмотрены сценарии построения крупномасштабной сети синхронного одночастотного цифрового вещания стандарта DRM, которая включает три крупных кластера передатчиков, обеспечивающих покрытие всей территории страны. Это позволило минимизировать мощность передатчиков и оптимизировать затраты. Исследования определило преимущества внедрения стандарта DRM для территории Венесуэлы, которое позволяет обеспечивать качественное покрытие на больших территориях, особенно в условиях низкой проводимости почвы.

Норвегия стала первой в страной в мире полностью отключившей в 2017 году аналоговое звуковое вещание [9], что стало важным шагом к цифровизации медиаиндустрии. В работе [10] рассмотрены основные этапы трансформации норвежского звукового вещания, а также определено, что цифровизация радиовещания в Норвегии способствовала увеличению количества радиопрограмм, улучшению качества звука и расширению аудитории, особенно для местных и специализированных радиостанций.

Цифровое звуковое вещание обладает рядом преимуществ, таких как улучшенное качество звука [11], меньшее энергопотребление и возможность интеграции с другими цифровыми платформами, включая интернет и мобильные приложения [12]. Использование стандарта DRM для сети цифрового звукового вещания позволяет повысить эффективность работы сетей радиовещания, сэкономить радиочастотный ресурс, а также обеспечивает улучшенное качество вещания с высокой достоверностью [13].

Таким образом, переход к цифровому звуковому вещанию является важным шагом для Республики Казахстан, стремящейся модернизировать и оптимизировать свою радиовещательную инфраструктуру. Учитывая текущие ограничения аналоговой системы, которая не только требует значительных затрат на содержание из-за своей низкой энергоэффективности, но и не способна обеспечить полное покрытие территории страны, цифровая трансформация является важной необходимостью.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования является система звукового вещания Республики Казахстан, включающая как действующую аналоговую инфраструктуру (радиостанции и передатчики), так и потенциальную цифровую систему на базе стандарта DRM. Предмет исследования охватывает технические аспекты перехода, в частности анализ мощности передатчика для частного присвоения Алма-Ата-549 кГц, зон покрытия, моделей распространения радиосигнала и эффективности использования национальных частотных присвоений.

В исследовании использовалось программное обеспечение ICS Telecom для моделирования распространения радиосигнала на основе детализированных геоинформационных карт с альтиметрией (разрешение 1 м) и морфологическими характеристиками местности (6 классов). Методологическая база опирается на модель ITU-R P.1546 для расчета свободного затухания сигнала, метод Deygout (1994) для оценки дифракционных потерь, методику Fine integration для расчета ослабления сигнала в зоне Френеля, а также на рекомендации ITU-R BS.703 и BS.1615 для определения минимальной напряженности электромагнитного поля.

Исследование проводилось следующим образом, сначала были собраны и проанализированы исходные данные о состоянии аналогового вещания (статистика передатчиков, данные международных частотных присвоений, технические характеристики). Затем с помощью ICS Telecom была проведена компьютерное моделирование для частотного

присвоения Алма-Ата – 549 кГц с моделированием различных сценариев мощности (с учетом нормативного снижения на 7 дБ, что позволяет получить зону покрытия до 250 км при мощности 100 кВт). Данные для моделирования были получены из базы данных ITU, международных реестров и нормативных документов. Эксперимент представлял собой серию симуляций, учитывающих влияние рельефа местности и различных параметров передатчика.

В рамках исследования было проведено сопоставление технологий цифрового звукового радиовещания DRM и DAB+ с точки зрения их практического применения в условиях Республики Казахстан. Сравнение осуществлялось по ряду базовых критериев, которые напрямую влияют на возможность внедрения цифрового радиовещания в стране. территориальный охват, необходимая плотность сети передатчиков, использование существующей радиовещательной инфраструктуры, особенности частотно-территориального планирования (ЧТП), а также пригодность технологий для государственного и экстренного оповещения. Результаты данного сопоставления представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение технологий цифрового звукового радиовещания DRM и DAB+

Критерий оценки	DRM	DAB+
Территориальный охват	Очень большой (сотни км)	Ограниченный
Плотность сети передатчиков	Низкая	Высокая
Использование существующей инфраструктуры	Да, для систем DRM в диапазонах длинных и средних волн ЧТП возможно с использованием положений соглашения Женева-75	Нет
Необходимость нового диапазона	Нет	Да, 174-230 МГц (ЧТП цифрового радиовещания по стандарту DAB+ выполняется в соответствии с Региональным соглашением Женева-06 (GE06) в диапазоне 174-230 МГц)
Экстренное оповещение	Встроенная поддержка	Реализуемо, но сложнее
Государственное вещание	Очень эффективно	Ограниченно
Автомобильное покрытие трасс	Высокое	Ограниченное

При анализе учитывалось, что система DAB+ ориентирована на мультиплексную модель вещания и работает в диапазоне очень высоких частот (ОВЧ) 174-230 МГц, где частотно-территориальное планирование осуществляется в соответствии с Региональным соглашением Женева-06 (GE06). Такой подход хорошо подходит для города, но требует развертывания новой сети передатчиков и не использует уже существующие частотные присвоения в диапазонах ДВ и СВ. В то же время технология DRM допускает работу в диапазонах ДВ и СВ, для которых планирование частот возможно на основе положений соглашения Женева-75. Это позволяет опираться на уже имеющиеся международные частотные присвоения Республики Казахстан, что особенно важно с учетом протяженной территории страны и неравномерного распределения населения. Эти особенности были учтены при выборе технологии цифрового звукового вещания для последующего моделирования и анализа зон покрытия.

Результаты исследований

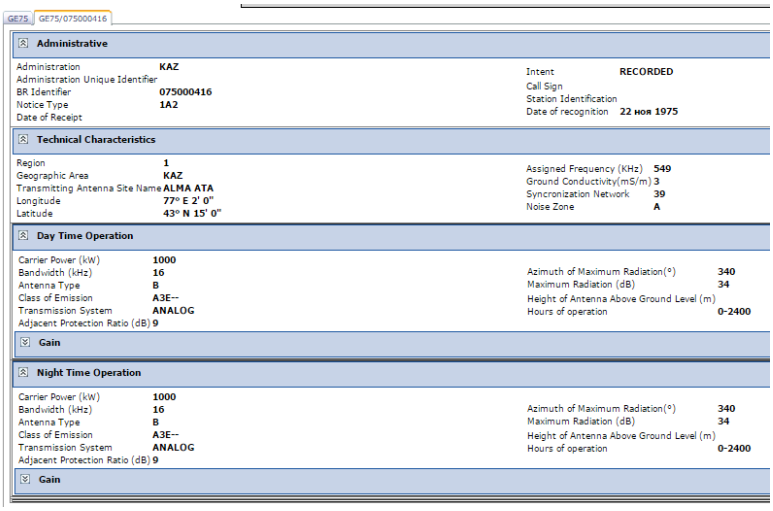
Учитывая то, что ранее отмечалось, в Республике Казахстан в настоящее время функционирует всего 631 радиопередатчик аналогового звукового вещания [1], данного количества явно недостаточно для полноценного охвата такой обширной территории, как Республика Казахстан. Территория Республики Казахстан характеризуется сложным рельефом, включающим горные массивы, степи и пустынные территории, что дополнительно влияет на распространение радиосигнала. Существующая сеть аналогового звукового вещания не способна эффективно справляться с такими вызовами, что приводит к появлению значительных «мертвых зон», где прием сигнала либо нестабилен, либо вовсе отсутствует. В условиях растущего спроса на надежное звуковое вещание и своевременное информационное оповещение населения, особенно в экстренных ситуациях, такая система требует модернизации.

Введение цифрового радиовещания стандарта DRM позволит решить данную проблему, обеспечив расширенное покрытие при меньшем количестве передатчиков за счет более эффективного использования радиочастотного ресурса. Благодаря высокой дальности распространения цифрового сигнала можно достичь равномерного охвата всей территории страны, включая автодороги, железнодорожные дороги и малонаселенные районы, что станет важным шагом в развитии национальной инфраструктуры радиовещания.

Стоит отметить, что в 1970-1980-е годы на территории Республики Казахстан функционировали 14 радиоцентров, обеспечивавших трансляцию программ «Маяк», «Союз», «Qazaq Radiosy». Звуковое вещание велось в диапазонах длинных (ДВ) и средних (СВ) волн на различных мощностях. Однако с течением времени данные объекты были выведены из эксплуатации и переведены в режим консервации.

На сегодняшний день большинство таких радиостанций остаются бездействующими, а их инфраструктура, включая технические здания, антенно-мачтовые сооружения и энергоснабжение, постепенно приходит в негодность. Затраты на содержание данных объектов продолжают расти из-за увеличения цен на энергоносители, заработной платы охранного персонала, налогов и других расходов. Дополнительным фактором, усложняющим дальнейшую эксплуатацию, является приватизация земельных участков вблизи данных объектов и активное строительство в их окрестностях, что в будущем может негативно повлиять на возможность их использования.

При этом в международном реестре частотных присвоений Международного союза электросвязи (МСЭ) остаются закрепленные за администрацией связи Республики Казахстан частотные присвоения, использовавшиеся для работы таких радиоцентров. Данные частотные присвоения обладают международным статусом, что обеспечивает возможность их использования для новых задач. Для наглядности характеристики для частотного присвоения Алма-ата-549 кГц, зарегистрированной за администрацией связи Республики Казахстан в международном реестре частотных присвоений представлены на рисунке 1.


GE75 GE75/075000416

Administrative

Administration	KAZ	Intent	RECORDED
Administration Unique Identifier		Call Sign	
BR Identifier	075000416	Station Identification	
Notice Type	1A2	Date of recognition	22 ноя 1975
Date of Receipt			

Technical Characteristics

Region	1	Assigned Frequency (KHz)	549
Geographic Area	KAZ	Ground Conductivity(mS/m)	3
Transmitting Antenna Site Name	ALMA ATA	Syncronization Network	39
Longitude	77° E 2' 0"	Noise Zone	A
Latitude	43° N 15' 0"		

Day Time Operation

Carrier Power (kW)	1000	Azimuth of Maximum Radiation(°)	340
Bandwidth (kHz)	16	Maximum Radiation (dB)	34
Antenna Type	B	Height of Antenna Above Ground Level (m)	
Class of Emission	A3E--	Hours of operation	0-2400
Transmission System	ANALOG		
Adjacent Protection Ratio (dB)	9		

Gain

Night Time Operation

Carrier Power (kW)	1000	Azimuth of Maximum Radiation(°)	340
Bandwidth (kHz)	16	Maximum Radiation (dB)	34
Antenna Type	B	Height of Antenna Above Ground Level (m)	
Class of Emission	A3E--	Hours of operation	0-2400
Transmission System	ANALOG		
Adjacent Protection Ratio (dB)	9		

Gain

Рисунок 1 – Частотное присвоение Алма-Ата – 549 кГц

Как представлено на рисунке 1, частотное присвоение Алма-Ата – 549 кГц было нотифицировано с мощностью 1000 кВт. Однако такая мощность предназначена для аналогового звукового вещания. Если данное частотное присвоение планируется использовать для организации цифрового звукового вещания, то в соответствии с Резолюцией 543 Всемирной административной конференции радиосвязи 2007 года, мощность передатчика должна быть снижена на 7 дБ.

Пересчет снижения мощности осуществляется по следующей формуле:

$$P_{digital} = P_{analog} * 10^{-\frac{7}{10}},$$

Подставляя значение:

$$P_{digital} = 1000 * 10^{-\frac{7}{10}} \approx 200 \text{ кВт}.$$

Минимальная напряженность электромагнитного поля для аналоговых систем в диапазонах ДВ и СВ установлена Рекомендацией МСЭ-R BS.703 и составляет 66 дБ для ДВ и 60 дБ для СВ, измеряемых относительно 1 мкВ/м. Для цифровых систем, рекомендация МСЭ-R BS.1615 предусматривает напряженность поля 40-50 дБ для стабильного сигнала. Проводимость почвы, важный параметр для расчетов, может колебаться от 1 до 60 мС/м, в зависимости от региона, что влияет на изменения напряженности поля. В плане «Женева-75» большинству передатчиков СССР присвоена проводимость 3 мС/м, что является усредненным значением и приемлемым для практических расчетов.

Таким образом, для цифрового радиовещания на данной частоте потребуется снизить мощность передатчика с 1000 кВт до примерно 200 кВт. Однако в расчетах для данной статьи была выбрана еще более низкая мощность в 100 кВт, что позволяет дополнительно снизить вероятность возникновения помех и уменьшить энергопотребление, сохраняя при этом адекватное покрытие территории.

С учетом современных требований к радиовещанию, данные частотные присвоения представляют собой стратегический ресурс для организации цифрового звукового вещания в стандарте DRM. Переход на цифровое звуковое вещание позволит не только восстановить активное использование таких частот, но и обеспечить значительное улучшение качества звука, расширение зоны покрытия, экономию энергии и оптимизацию использования радиочастотного ресурса. Это особенно важно в условиях географических особенностей Республики Казахстан и необходимости равного доступа к информационным ресурсам для всего населения.

В этой связи перед Республикой Казахстан стоит необходимость принятия стратегического решения по дальнейшему использованию законсервированных радиостанций. Один из наиболее рациональных вариантов – это их модернизация и интеграция в цифровую сеть радиовещания DRM.

Использование уже существующей инфраструктуры позволит существенно сократить капитальные вложения в развертывание цифрового радиовещания. Стандарт DRM обладает рядом преимуществ перед аналоговыми системами, включая:

– высокое качество звука (по сравнению с АМ);

– эффективное использование частотного спектра;

– возможность охвата больших территорий при минимальных затратах;

– энергосбережение – передатчики DRM потребляют значительно меньше энергии, чем аналоговые передатчики аналогичной мощности.

Для расчета напряженности поля в свободном пространстве применяется формула:

$$E = \sqrt{\frac{30 * P * G}{d}},$$

где P – мощность передатчика в Вт, G – коэффициент усиления антенны, d – расстояние от передатчика в метрах.

Для перевода величины поля в дБ(μV/m) используется преобразование:

$$E(dB(\mu V/m)) = 20 * \log_{10}(E\ (\mu V/m)),$$

где напряженность электромагнитного поля E (μV/m) = 10^6 * E (V/m).

В конечном виде можно записать:

$$E(dB(\mu V/m)) = 10 * \log_{10}(30 \cdot P \cdot G) - 20 \cdot \log_{10}(d) + 120.$$

Для расчета свободного пространственного затухания используется стандартная формула:

$$L_{fs}\ (дБ) = 32.45 + 20 \cdot \log_{10}(f) + 20 \cdot \log_{10}(d),$$

где f – частота вещания в МГц, d – расстояние в км [14].

На рисунке 2 показано примерное покрытие цифровым звуковым вещания в стандарте DRM, с мощностью 100 кВт, работающего на частоте 549 кГц. Радиус покрытия достигает 250 км, что обеспечивает устойчивый сигнал на значительной территории вокруг передатчика.

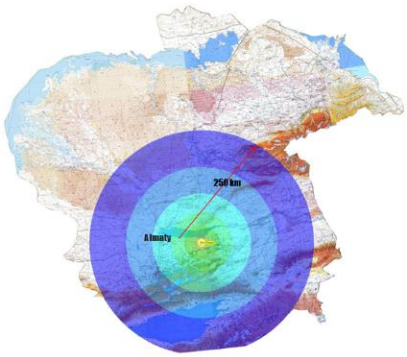


Рисунок 2 – Примерное покрытие цифрового звукового вещания DRM

С использованием ICS Telecom были рассчитаны карты покрытия при условии, что на входе приемника требуется не менее 45 дБ (мкВ/м) для надежного DRM-приема. Зона уверенного приема достигла радиуса примерно 250 км, что покрывает значительную часть Южного Казахстана (рис. 2).

Суммарное энергопотребление передающего центра определялось на основе баланаса мощности:

$$P_{\Sigma} = \frac{P_{\text{ВЧ}}}{\eta} + P_{\text{ВС}},$$

где $P_{\text{ВЧ}}$ – выходная ВЧ-мощность передатчика, η – коэффициент полезного действия передатчика, $P_{\text{ВС}}$ – мощность вспомогательных систем (охлаждение, вентиляция, системы управления).

Для аналогового режима звукового вещания при $P_{\text{ВЧ,АМ}}$ =1000 кВт и $\eta_{\text{АМ}}$=0,35 суммарное энергопотребление составляет:

$$P_{\Sigma\text{АМ}} = \frac{1000}{0{,}35} + P_{\text{ВС}}$$

Для цифрового звукового вещания в стандарте DRM, с учетом нормативного снижения мощности, при $P_{\text{ВЧ,DRM}}$=100P кВт и η_{DRM}=0,45.

$$P_{\Sigma DRM} = \frac{P_{\text{ВЧ},DRM}}{0{,}45} + P_{\text{ВС}}$$

Относительное снижение общего энергопотребления можно определить с помощью следующего выражения:

$$\Delta = 1 - \frac{P_{\Sigma\, DRM}}{P_{\Sigma\text{АМ}}}$$

При переходе от аналогового режима мощностью 1000 кВт к цифровому вещанию DRM суммарное энергопотребление передающего центра снижается. Таким образом, 1 передатчик в DRM с мощностью 100 кВт потенциально заменяет прежний аналоговый 1000 кВт и при этом экономит как минимум 50% электроэнергии.

Таким образом, целями развития республиканской сети звукового вещания являются:

1. Обеспечение качественного цифрового звукового вещания для 100% населения и территории Республики Казахстан. Создание новой инфраструктуры сети цифрового звукового вещания позволит охватить практически все населенные пункты и территорию страны, обеспечив доступ к радиопрограммам с высоким качеством звука.

2. Создание единой системы оповещения населения о чрезвычайных ситуациях. Внедрение цифрового звукового вещания DRM обеспечит эффективное и оперативное информирование населения в случае чрезвычайных ситуаций, охватывая всю территорию страны, включая удаленные и труднодоступные регионы.

Цифровое звуковое вещание стандарта DRM обеспечит стабильный прием всех радиопрограмм на мобильные приемные устройства вдоль автомобильных и железнодорожных трасс республиканского и областного значения, а также на всей

территории страны. Это создаст условия для повышения информационной доступности и оперативности передачи данных в любое время и в любом месте.

Данные цели направлены на модернизацию радиовещательной инфраструктуры, улучшение качества и доступности информационных услуг, а также на повышение уровня безопасности и информированности населения. Реализация данного проекта станет важным шагом в цифровизации Республики Казахстан и обеспечит соответствие современным мировым стандартам радиовещания

Обсуждение результатов

Сопоставление полученных результатов с исследованиями, проведенными в Индонезии, Норвегии, Чешской Республике и Венесуэле [4, 6-8], показывает, что основные тенденции перехода к цифровому вещанию сохраняются. К ним относятся повышение качества звука, снижение энергозатрат, рациональное использование радиочастотного спектра и др. Незначительные различия в численных оценках, таких как радиус действия сигнала и коэффициенты снижения мощности, можно объяснить специфическими географическими и климатическими условиями, а также различиями в методах моделирования. Это не умаляет общей тенденции повышения эффективности цифровых систем. Практическая значимость работы заключается в возможности использования ее результатов для разработки поэтапного плана модернизации существующей радиовещательной инфраструктуры. Это позволит переоборудовать устаревшие аналоговые системы в цифровые, снизить капитальные и эксплуатационные затраты, расширить охват сигналом, даже в отдаленных районах, обеспечить оперативное оповещение населения в экстренных ситуациях, а также интегрировать цифровые сервисы с другими современными коммуникационными платформами.

Несмотря на очевидные технические и энергетические преимущества цифрового звукового вещания в стандарте DRM, его практическое внедрение в Республике Казахстан сталкивается с рядом нерешенных вопросов, которые требуют отдельного и более детального изучения. В первую очередь, это касается доступности приемного оборудования, поддерживающего DRM. На практике именно этот фактор, особенно в автомобильном и портативном сегментах, может существенно влиять на темпы и эффективность внедрения цифрового вещания.

Кроме того, расчетные результаты компьютерного моделирования также требуют экспериментальной проверки в реальных условиях эксплуатации, с учетом сезонных изменений проводимости почвы, особенностей рельефа и текущей помеховой обстановки, которые могут существенно воздействовать на устойчивость приема сигнала DRM.

Также остается открытым вопрос разработки практической организационно-технической модели поэтапного перехода от аналогового к цифровому звуковому вещанию. Здесь важно учитывать не только частотно-территориальное планирование и техническую интеграцию DRM с существующими системами оповещения населения, но также и социально-экономические аспекты внедрения. В совокупности указанные вопросы определяют направления для дальнейших научных и прикладных исследований, необходимых для реальной и устойчивой реализации цифрового звукового вещания в условиях Республики Казахстан.

Заключение

Проведенный анализ показал, что аналоговое звуковое вещание в Республике Казахстан больше не соответсвует современным требованиям. Так, в стране насчитывается 14 законсервированных радиоцентров, которые ранее обеспечивали вещание в диапазонах ДВ и СВ диапазонах. Частотные присвоения, зарегистрированные за Администрацией связи РК в ITU, могут быть использованы для цифрового звукового вещания. Внедрение цифрового стандарта DRM позволит увеличить покрытие минимум до 95% территории страны и обеспечит устойчивый сигнал вдоль междугородних и международных автодорог. Кроме того, это позволит снизить энергопотребление передатчиков как минимум на 50% по сравнению с аналоговым вещанием и повысит качество звука. Предварительный расчет показал, что использование передатчика мощностью 100 кВт на частоте 549 кГц обеспечит радиус покрытия до 250 км. Также на базе цифрового звукового вещания можно также создать единую систему оповещения о чрезвычайных ситуациях, обеспечивая при это стабильный прием сигнала на автомобильных и железнодорожных трассах республиканского и

областного значения. Планирование сети требует точного расчета мощности передатчиков, характеристик антенн и условий распространения сигнала. Рекомендации МСЭ-R предоставляют универсальные методы, которые обеспечивают стабильность сигнала и минимизацию помех. Внедрение цифрового звукового вещания DRM является стратегическим шагом для модернизации радиовещательной инфраструктуры Республики Казахстан и интеграции страны в мировую цифровую систему.

Кроме того, переход на цифровое звуковое вещание DRM не только обеспечивает существенное улучшение параметров вещания, но и способствует повышению национальной информационной безопасности и оперативности коммуникаций в экстренных ситуациях. Использование централизованных систем управления цифровыми потоками позволяет быстрее реагировать на чрезвычайные ситуации, что особенно важно для территории с большой площадью и со сложным рельефом местности.

Список литературы

1. Годовой отчет Акционерного общества «Казтелерадио» за год, закончившийся 31 декабря 2022 г. – Утверждено Председателем Правления АО «Казтелерадио».
2. Identifying the regularities of the signal detection method using the Kalman filter / B. Medetov et al // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2023. – Т. 125, № 9.
3. Improvement of signal reception reliability at satellite spectrum monitoring system / K. Aigul et al // IEEE Access. – 2022. – Т. 10. – P. 101399-101407.
4. Harliantara H., Widiarto D. S., Prasetyo I. J. Analogue to Digital Radio Transition in Broadcasting [Электронный ресурс]. – 2024. – URL: https://ssrn.com/abstract=4998071 (дата обращения: 04.08.2025).
5. Comparative analysis of QoS management and technical requirements in 3GPP standards for cellular IoT technologies / V.O. Tikhvinskiy et al // Journal of Telecommunications and Information Technology. – 2018. – № 2. – P. 41-47.
6. Zyka K. The Digital Audio Broadcasting Journey from the Lab to Listeners – the Czech Republic Case Study / K. Zyka // Radioengineering. – 2019.
7. Šulentić A. The Development of Digital Audio Broadcasting in Croatia: The Case of DAB+ / A. Šulentić, M. Mučalo // Journal of Radio & Audio Media. – 2024. – P. 1-18.
8. Varlamov O.V. A. Basis of Technical Design and Development a Single-Frequency DRM Digital Broadcasting Network for Venezuela / O.V. Varlamov, A.A. Bychkova // 2021 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). – IEEE, 2021. – P. 1-7.
9. Television in Norway [Электронный ресурс] // Wikipedia. –URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Television_in_Norway (дата обращения: 04.08.2025).
10. Простякова В.А. Радиовещание в Норвегии: этапы развития / В.А. Простякова // Меди@льманах. – 2023. – № 5 (118). – С. 90-97.
11. Wamanji J.N. Analogue to Digital Broadcast Migration: Communication and Local Broadcast Audio-visual Content Ecosystem – University of Nairobi, 2022.
12. Falkowski-Gilski P. Digital Transformation of Terrestrial Radio: An Analysis of Simulcasted Broadcasts in FM and DAB+ for a Smart and Successful Switchover / P. Falkowski-Gilski // Applied Sciences. – 2021. – Т. 11, № 23. – P. 11114. https://doi.org/10.3390/app112311114.
13. Varlamov O.V. Organization of single frequency DRM digital radio broadcasting networks. Features and results of practical tests / O.V. Varlamov // 2018 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). – Minsk, Belarus, 2018. – P. 1-8. – https://doi.org/10.1109/SYNCHROINFO.2018.8456925.
14. Международный союз электросвязи. Рекомендация ITU-R P.525. Распространение радиоволн на открытой местности: свободное пространство. – Женева: ITU.

References

1. Godovoi otchet Aktsionernogo obshchestva «KazteleradiO» za god, zakonchivshiisya 31 dekabrya 2022 g. – Utverzhdeno Predsedatelem Pravleniya AO «KazteleradiO». (In Russian).
2. Identifying the regularities of the signal detection method using the Kalman filter / B. Medetov et al // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2023. – Т. 125, № 9. (In English).

3. Improvement of signal reception reliability at satellite spectrum monitoring system / K. Aigul et al // IEEE Access. – 2022. – T. 10. – R. 101399-101407. (In English).
4. Harliantara H., Widiarto D. S., Prasetyo I. J. Analogue to Digital Radio Transition in Broadcasting [Ehlektronnyi resurs]. – 2024. – URL: https://ssrn.com/abstract=4998071 (data obrashcheniya: 04.08.2025). (In English).
5. Comparative analysis of QoS management and technical requirements in 3GPP standards for cellular IoT technologies / V.O. Tikhvinskiy et al // Journal of Telecommunications and Information Technology. – 2018. – № 2. – R. 41-47. (In English).
6. Zyka K. The Digital Audio Broadcasting Journey from the Lab to Listeners – the Czech Republic Case Study / K. Zyka // Radioengineering. – 2019. (In English).
7. Šulentić A. The Development of Digital Audio Broadcasting in Croatia: The Case of DAB+ / A. Šulentić, M. Mučalo // Journal of Radio & Audio Media. – 2024. – P. 1-18. (In English).
8. Varlamov O.V. A. Basis of Technical Design and Development a Single-Frequency DRM Digital Broadcasting Network for Venezuela / O.V. Varlamov, A.A. Bychkova // 2021 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). – IEEE, 2021. – P. 1-7. (In English).
9. Television in Norway [Ehlektronnyi resurs] // Wikipedia. –URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Television_in_Norway (data obrashcheniya: 04.08.2025). (In English).
10. Prostyakova V.A. Radioveshchanie v Norvegii: ehtapy razvitiya / V.A. Prostyakova // Medi@l'manakh. – 2023. – № 5 (118). – S. 90-97. (In Russian).
11. Wamanji J.N. Analogue to Digital Broadcast Migration: Communication and Local Broadcast Audio-visual Content Ecosystem – University of Nairobi, 2022. (In English).
12. Falkowski-Gilski P. Digital Transformation of Terrestrial Radio: An Analysis of Simulcasted Broadcasts in FM and DAB+ for a Smart and Successful Switchover / P. Falkowski-Gilski // Applied Sciences. – 2021. – T. 11, № 23. – R. 11114. https://doi.org/10.3390/app112311114. (In English).
13. Varlamov O.V. Organization of single frequency DRM digital radio broadcasting networks. Features and results of practical tests / O.V. Varlamov // 2018 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). – Minsk, Belarus, 2018. – P. 1-8. – https://doi.org/10.1109/SYNCHROINFO.2018.8456925. (In English).
14. Mezhdunarodnyi soyuz ehlektrosvyazi. Rekomendatsiya ITU-R P.525. Rasprostranenie radiovoln na otkrytoi mestnosti: svobodnoe prostranstvo. – Zheneva: ITU. (In Russian).

А.Е. Кулакаева[1], А.З. Айтмагамбетов[1], Е.А. Дайнеко[1,2], Г.Т. Джаканова[1], Б.А. Кожахметова[1,3*]
[1]Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті,
050040, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Манас 34/1 көшесі
[2]Satbayev University,
Алматы қ, К. Сатпаев 22А көшесі
[3]Ғ. Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті,
050013, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Байтурсынов 126/1 көшесі
*e-mail: b.kozhakhmetova@iitu.edu.kz

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНДА ЦИФРЛЫҚ ДЫБЫСТЫҚ ХАБАР ТАРАТУДЫ ЕНГІЗУ ҚАЖЕТТІЛІГІ ТУРАЛЫ МӘСЕЛЕ ЖӨНІНДЕ

Бұл мақалада Қазақстан Республикасының ескірген аналогтық радиожелісін жаңғырту және шалғай аудандарда да ақпараттық ресурстарға тең қолжетімділікті қамтамасыз ету мақсатында DRM стандартына сәйкес цифрлық дыбыстық хабар таратуға көшу қажеттілігі қарастырылады. Мақсат – күрделі жер бедері мен халық тығыздығы төмен жағдайларда DRM технологиясын енгізудің техникалық, экономикалық және ұйымдастырушылық артықшылықтарын негіздеу. Осы мақсатқа жету үшін қазіргі аналогтық дыбыстық хабар тарату жүйесіне жан-жақты талдау жүргізіліп, оның аумақты қамту және энергия тиімділігі тұрғысынан кемшіліктері анықталды. ICS Telecom бағдарламалық қамтамасыздандыруын пайдалану арқылы цифрлық дыбыстық хабар таратудың қызмет көрсету аймағына модельдеу жүргізілді. Есептеулерде ITU-R радиотолқын таралу модельдері, соның ішінде ITU-R P.1546 және дифракциялық шығындарды бағалауға арналған Deygout әдісі ескерілді. Бұл Алма-Ата-549 кГц жиілігіне 100 кВт таратқыш қуатымен шамамен 250 км сенімді қабылдау аймағын анықтауға мүмкіндік берді. Зерттеу нәтижелері DRM технологиясын енгізу ел аумағының қамтылуын едәуір кеңейтуге (ел аумағының 95%-ына дейін), таратқыштардың энергия тұтынуын аналогтық жүйелермен салыстырғанда кем дегенде 50%-ға азайтуға, дыбыс

сапасын жақсартуға және төтенше жағдайлар туралы хабарлау жүйелері сияқты қосымша сервистерді интеграциялау мүмкіндігін қамтамасыз етуге мүмкіндік беретінін көрсетті. Жұмыстың практикалық маңыздылығы – консервацияланған радиобекеттерді қайта жабдықтау және ұлттық жиілік ресурстарын тиімді пайдалану арқылы радиохабар тарату инфрақұрылымын кезең-кезеңімен жаңғырту жоспарын әзірлеуде. Бұл өз кезегінде күрделі және операциялық шығындарды айтарлықтай азайтуға мүмкіндік береді. Алынған нәтижелер DRM стандарты бойынша цифрлық дыбыстық хабар таратуға көшу – Қазақстан Республикасының медиаиндустриясын цифрландыруға бағытталған стратегиялық қадам екенін дәлелдейді.

Түйін сөздер: *DRM, цифрлық дыбыстық хабар тарату, радиоқамту, радиожиілік спектрін басқару, халықты хабардар ету жүйелері.*

A. Kulakayeva[1], A. Aitmagambetov[1], Ye. Daineko[1,2], G. Dzhakanova[1], B. Kozhakhmetova[1,3*]
[1]International Information Technologies University,
050040, Republic of Kazakhstan, Almaty, 34/1 Manasa street
[2]Satbayev University,
Almaty, 22A K.Satbayev street
[3]Almaty University of Power Engineering and and Telecommunications named after G.Daukeev,
Almaty,126/1 Baitursynov street
*e-mail: b.kozhakhmetova@iitu.edu.kz

ON THE NEED TO INTRODUCING DIGITAL AUDIO BROADCASTING IN THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

This article examines the necessity for the Republic of Kazakhstan to transition to Digital Radio Mondiale (DRM) standard digital audio broadcasting, in order to modernize its outdated analog radio network and ensure equal access to information resources, even in remote areas. The objective is to substantiate the technical, economic, and organizational advantages of implementing DRM under conditions of complex terrain and low population density. To achieve this goal, a detailed analysis of the existing analog audio broadcasting system was conducted, highlighting its shortcomings in terms of territorial coverage and energy efficiency. Service area modeling for digital audio broadcasting was carried out using ICS Telecom software. The calculations took into account ITU-R radio signal propagation models, including ITU-R P.1546, as well as the Deygout method for assessing diffraction losses. This allowed for an approximate determination of the reliable reception zone for the Alma-Ata-549 kHz frequency assignment with a transmitter power of 100 kW, providing a coverage radius of approximately 250 km. The research results indicate that the introduction of DRM can significantly expand territorial coverage (up to 95% of the country), reduce transmitter energy consumption by 50% compared to analog systems, improve audio quality, and enable the integration of additional services such as emergency alert systems. The practical significance of this work lies in the development of a step-by-step plan for modernizing the broadcasting infrastructure through the re-equipment of decommissioned radio centers and the efficient use of national frequency assignments, which can substantially reduce capital and operational costs. The findings demonstrate that transitioning to DRM standard digital audio broadcasting is a strategic step toward the digitalization of the media industry in the Republic of Kazakhstan.

Key words: *DRM, digital audio broadcasting, radio coverage, radio frequency spectrum management, public alerting systems.*

Сведения об авторах

Айгуль Ергалиевна Кулакаева – Phd, ассоциированный-профессор кафедры «Радиотехника, электроника и телекоммуникации», Международный Университет Информационных Технологий города Алматы, Республика Казахстан; e-mail: a.kulakayeva@iitu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0143-085X.

Алтай Зуфарович Айтмагамбетов – кандидат технических наук, профессор кафедры «Радиотехника, электроника и телекоммуникации», Международный Университет Информационных Технологий города Алматы, Республика Казахстан; e-mail: a.aitmagambetov@iitu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7808-5273.

Евгения Александровна Дайнеко – PhD, Директор Института автоматики и информационных технологий, Satbayev University. Ассоциированный профессор кафедры «Компьютерная инженерия» в АО «Международный университет информационных технологий» города Алматы, Республика Казахстан; e-mail: y.daineko@iitu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6581-2622.

Гаухар Талгатовна Джаканова – магистр, сениор-лектор кафедры «Радиотехника, электроника и телекоммуникации», Международный Университет Информационных Технологий города Алматы, Республика Казахстан; e-mail: gjakanova@iitu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-7890-3573.

Багдат Абдурашидовна Кожахметова* – Phd студент 3 курса, Алматинский университет энергетики и связи им. Г. Даукеева, ассистент-профессор кафедры «Радиотехника, электроника и телекоммуникации» Международного Университета Информационных Технологий города Алматы, Республика Казахстан; e-mail: b.kozhakhmetova@iitu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9566-3629.

Авторлар туралы мәліметтер

Айгуль Ергалиевна Кулакаева – PhD, «Радиотехника, электроника және телекоммуникациялар» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Алматы қаласындағы Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: a.kulakayeva@iitu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0143-085X.

Алтай Зуфарович Айтмагамбетов – техникалық ғылымдар кандидаты, «Радиотехника, электроника және телекоммуникациялар» кафедрасының профессоры, Алматы қаласындағы Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: a.aitmagambetov@iitu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7808-5273.

Евгения Александровна Дайнеко – PhD, Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар институтының директоры, Satbayev University. «Компьютерлік инженерия» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті; e-mail: y.daineko@iitu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6581-2622.

Гаухар Талгатовна Джаканова – магистр, «Радиотехника, электроника және телекоммуникациялар» кафедрасының сениор-лекторы, Алматы қаласындағы Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: gjakanova@iitu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-7890-3573.

Багдат Абдурашидовна Кожахметова* – PhD докторанты, Г. Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университетінің 3 курс студенті, «Радиотехника, электроника және телекоммуникациялар» кафедрасының ассистент-профессоры, Алматы қаласындағы Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: b.kozhakhmetova@iitu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9566-3629.

Information about the authors

Aigul 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.

Altay 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.

Yevgeniya Daineko – PhD, Director of the Institute of Automation and Information Technology, Satbayev University. Associate Professor, Department of Computer Engineering, International University of Information Technology, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: y.daineko@iitu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6581-2622.

Gaukhar Zhakanova – Master, senior-lecturer of the Department of «Radio Engineering, Electronics and Telecommunications», International Information Technologies University, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: gjakanova@iitu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-7890-3573.

Bagdat Kozhakhmetova* – 3rd-year PhD student at Gumarbek Daukeyev University of Power Engineering and Telecommunications, Assistant Professor of the Department of «Radio Engineering, Electronics and Telecommunications», International Information Technologies University, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: b.kozhakhmetova@iitu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9566-3629.

Поступила в редакцию 17.09.2025
Поступила после доработки 15.12.2025
Принята к публикации 17.12.2025

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-3

IRSTI: 27.35.33

CC BY 4.0
Check for updates

B. Orazbayev[1], Y. Izbassarov[2*], S. Santeyeva[1], Sh. Kodanova[3], B. Utenova[3]
[1]L.N. Gumilyov Eurasian National University,
010008, Republic of Kazakstan, Astana, Pushkin Street 11
[2]Satbayev University,
050013, Republic of Kazakstan, Almaty, Satbayev Street 22,a
[3]Atyrau Oil and Gas university,
060027, Republic of Kazakstan, Atyrau, Baymukhanov Street 45, a
[*]e-mail: erlan_1081@mail.ru

DEVELOPMENT OF LINGUISTIC MODELS FOR EVALUATING QUALITY INDICATORS OF BENZENE AT THE OUTLET OF THE BENZENE COLUMN IN A FUZZY ENVIRONMENT

Annotation: *Currently, due to the intensive development of the petrochemical industry and the growing demand for its products, increasing the productivity of high-quality benzene production facilities based on their models has become an actual scientific and practical problem. In practice, the main indicators of benzene quality are assessed imprecisely based on the experience and knowledge of process engineers who manage the benzene production process and specialists from the plant laboratory. The paper proposes a method for synthesizing linguistic models of poorly formalized technological facilities, such as a benzene column, with fuzzy input and output parameters, allowing for the modeling and optimization of their operating modes in a fuzzy environment. Based on the proposed method, linguistic models have been developed to evaluate the main quality indicator of benzene produced in the benzene column of the Atyrau oil refinery, which is the subject of the study. Based on the developed linguistic models-a rule base in Fuzzy Logic Toolbox-fuzzy modeling of various operating modes of the studied benzene column and optimization of its mode were carried out. As a result, the optimal operating mode of the benzene column was determined, allowing to maximize the volume and quality of benzene from its output. The novelty and importance of the proposed method for synthesizing linguistic models of complex technological objects in a fuzzy environment lies in the fact that it allows the development of effective linguistic models of objects with fuzzy input and output parameters. The practical significance of the developed linguistic models of the object under study lies in the optimization of its operating modes in a fuzzy environment based on fuzzy modeling.*

Key words: *benzene column, fuzzy modeling, optimization, linguistic models, benzene production process.*

Introduction

The benzene column, designed to produce benzene from naphtha with quality indicators that meet current standards, is the main unit of the benzene production unit (BPU) at oil refineries (OR). The quality indicators of benzene, such as the average octane number of benzene and the sulfur content in benzene from the benzene column at the Atyrau and many other refineries, are not directly measured in production. These important indicators, which determine the quality of benzene in practice, are assessed imprecisely with the participation of process operators, decision-makers (DMs) responsible for managing the benzene production process, and specialists from the plant laboratory [1, 2]. At the same time, they determine these qualitative indicators of benzene based on their knowledge, experience, and intuition, as well as additional research in laboratory conditions using fuzzy expressions: “less,” “more,” “low,” “medium,” “high” quality, etc. [3]. Accordingly, to determine such vaguely assessed parameters and indicators of poorly formalized production facilities, it is necessary to use available fuzzy information obtained from decision makers and expert specialists based on expert assessment methods and processed using fuzzy set theory methods [4, 5].

Recently, with the intensive development of the petrochemical industry, in which high-quality benzene obtained at oil refineries is the main raw material, issues related to the optimization and management of the benzene production process in oil refinery benzene columns have become a highly relevant and priority task for the oil refining and petrochemical industries. In this regard, research dedicated to solving this problem using mathematical models and information technology

©B. Orazbayev, Y. Izbassarov, S. Santeyeva, Sh. Kodanova, B. Utenova, 2026

has intensified. Several studies [6-11] are devoted to the problems of developing mathematical models and simulating benzene production facilities. The authors of [6, 7] presented the results of research into the processes of benzene production by hydrodealkylation and from naphtha in oil refineries and the problems of optimizing these processes based on mathematical modeling under deterministic conditions. Zhilin, Franck, and others in their works [8, 9] investigated issues of modeling the technology of benzene and toluene production based on the synthesis and production of high-quality benzene for use in petrochemistry under conditions of stochastic uncertainty. Han et al. in their work [10] investigated the conversion of benzene and synthesis gas into alkylbenzenes using various catalysts based on kinetic models describing the rates of chemical reactions and their mechanisms, as well as the influence of temperature.

The sources analyzed above and other sources on the subject mainly examine the problems of modeling benzene production processes under deterministic conditions and under conditions of stochastic uncertainty, while the problems of modeling in optimization under conditions of uncertainty have not been sufficiently studied. Works [11, 12] examine the problems of developing fuzzy models and multi-criteria optimization of hydrocarbon production facilities, including benzene, with clear input and fuzzy output parameters. However, in these and other known similar works, the problems of developing linguistic models under conditions of fuzzy input and output parameters of benzene production facilities have not yet been sufficiently studied and solved. In this regard, the development of an effective method for synthesizing linguistic models for linguistic modeling of facilities with fuzzy input and output parameters is a relevant scientific and practical task for many poorly formalized facilities, such as benzene columns, operating in a fuzzy environment. This work is devoted to the study and solution of this task, i.e., the development of linguistic models for evaluating the quality indicators of benzene at the outlet of the benzene column of the BPU in a fuzzy environment.

Research methods

The conditions for conducting the study are the availability and use of the following materials and information:

– technological regulations for the operation of the benzene column of the BPU and a description of its technological scheme [1];

– results of various studies and analyses, assessments of the quality characteristics of benzene and benzene quality requirements according to current standards [3, 10];

– standards and methods for determining benzene quality indicators, such as: GOST 9572-93; ASTM D2699; ISO 22854; GOST 511-82; spectroscopic methods [13, 14];

– unclear information obtained from the decision-maker responsible for managing the benzene production process and expert specialists from the plant laboratory.

The benzene column C-401 BPU of the Atyrau Oil Refinery, in which benzene production processes take place, was selected as the object of study. The main quality indicators are taken into account as fuzzy constraints according to the requirements of current standards. The main fuzzy quality indicators controlled in the benzene production process in accordance with the requirements of current standards are: $\mu_1(\mathbf{x}) =$ «the average octane number of benzenes is greater than: $\widetilde{\geq}102$» and $\mu_2(\mathbf{x}) =$ «the sulfur content in the produced benzene is less than: $\widetilde{\leq}0.00005$». Here, $\mu_1(\mathbf{x})$ and $\mu_2(\mathbf{x})$ are membership functions that formalize the fuzzy descriptions of the constraints, determining the dependence of the fuzzy constraints on the vector of input operating parameters of the benzene column $\mathbf{x}$. These fuzzy constraints are described by term sets: {“low”, “below average”, ‘average’, “above average”, “high”}, for each term, for which membership functions $\mu_q(\mathbf{x})$, $q = 1,2,$ are constructed, which evaluate the degree of fulfillment of fuzzy constraints:

In this work, the collection and processing of statistical and experimental data are implemented using methods of mathematical statistics and probability theory [15, 16]. To obtain fuzzy information from decision makers and experts, and to process and use it, expert assessment methods and fuzzy set theory are used [17, 18]. The paper also proposes and uses a new method for synthesizing linguistic models for complex production facilities such as a benzene column operating in a fuzzy environment. The MATLAB system toolkit Fuzzy Logic Toolbox [19] is used for fuzzy modeling of the benzene column operation and visualization of the results.

The proposed method for synthesizing linguistic models is based on conditional logical inference rules, a production model of knowledge representation, and various operations on fuzzy

sets. Below are the main stages of the method for synthesizing linguistic models of complex technological systems with fuzzy input and output parameters.

1. Selection of fuzzy input and operating parameters of the modeled object $\tilde{x}_i, i = \overline{1,n}$ that affect the values of its fuzzy output parameters $\tilde{y}_j, j = \overline{1,m}$, which are optimized.

2. Definition of the term set $T(X,Y)$ for fuzzy description of selected fuzzy inputs, mode $\tilde{x}_i, i = \overline{1,n}$ and outputs $\tilde{y}_j, j = \overline{1,m}$, value parameters, i.e., a set of terms that are represented as linguistic variables. Also, definition of universes X and Y, i.e., intervals of variation of fuzzy input and output parameters.

3. Construction of membership functions that formally describe the degrees of membership of terms in fuzzy sets that vaguely describe the values of linguistic variables $\tilde{x}_i, i = \overline{1,n}$ and $\tilde{y}_j, j = \overline{1,m}$ i.e., implementation of fuzzification procedures.

4. Building a rule base based on a production model of knowledge representation and logical rules of conditional inference, and synthesizing linguistic models with the following structure:

$$IF\ \ \tilde{x}_1 \in \tilde{A}_1\ and/or\ \tilde{x}_2 \in \tilde{A}_2, \dots, and/or\ \ \tilde{x}_n \in \tilde{A}_n\ THEN\ \ \tilde{y}_j \in \tilde{B}_j, j = \overline{1,m}. \quad (1)$$

To synthesize linguistic models that vaguely describe the influence of fuzzy input parameters $\tilde{x}_i, i = \overline{1,n}$ on fuzzy output parameters $\tilde{y}_j, j = \overline{1,m}$ of a fuzzy object, expert assessment methods and fuzzy set theories are used.

5. Construction of fuzzy mappings $\tilde{R}_{ij}$, describing fuzzy relationships between linguistic variables $\tilde{x}_i, i = \overline{1,n}$ и $\tilde{y}_j, j = \overline{1,m}$, of the optimized object. For convenience, fuzzy mappings $\tilde{R}_{ij}$ are formalized through their membership functions $\mu_{\tilde{R}_{ij}}(\tilde{x}_i, \tilde{y}_j)$. Then, based on the compositional inference rule $\tilde{B}_j = \tilde{A}_i \circ \tilde{R}_{ij}$, where $\tilde{A}_i \subset X,\ \tilde{B}_j \subset Y$,and X, Y are universal sets defined in step 4. For each term *t* from the term sets $T(X,Y)$, the fuzzy mapping can be defined by the Cartesian product of the corresponding universal sets: $\tilde{R}_{ij}^t = \tilde{A}_i^t \times \tilde{B}_j^t$.

6. For convenience, the fuzzy relation matrices $\mu_{\tilde{R}_{ij}}^t(\tilde{x}_i, \tilde{y}_j)$ are calculated based on the membership function of the fuzzy mapping $\tilde{R}_{ij}^t$ using the formula:

$$\mu_{\tilde{R}_{ij}}^t(\tilde{x}_i, \tilde{y}_j) = min\left[\mu_{\tilde{A}_i}^t(x_i), \mu_{\tilde{B}_j}^t(y_j)\right], i = \overline{1,n}, j = \overline{1,m}, \quad (2)$$

based on which the values of the membership functions of the output parameters $\tilde{y}_j, j = \overline{1,m}$: are determined:

$$\mu_{\tilde{B}_j}^t(y_j') = \max_{x_i \in X}\{\min[\mu_{\tilde{A}_i}(x_i^*), \mu_{R_{ij}}(\tilde{x}_i, y_j^M)]\}. \quad (3)$$

Here, x_i^* are fuzzy values of input and operating parameters estimated by experts. Then, the desired set, to which the current values of input and operating parameters belong, is determined by the formula $\mu_{A_i}(x_i^*) = \max_i \mu_{A_i}(x_i)$, i.e., as a set in which the values of the operating parameters have the maximum values of the membership function.

7. The adequacy condition of the obtained model is checked $\min \sum_{j=1}^{m}(y_j^M - y_j^E)^2 \leq S_R$, , where y_j^M are the defased values of the output parameters of the technological system; y_j^E are the actual values of the output parameters obtained experimentally on the technological system under study; S_R is the specified level of adequacy. The values y_j^M and y_j^E must be obtained at the same values of $x_i^*, i = \overline{1,n}$.

If the condition is not met, then starting from stage 5, the next iteration of synthesizing more adequate models is performed.

8. Synthesized linguistic models with the necessary adequacy are output, and fuzzy modeling is performed to optimize the output parameters of the object under study.

When the condition of step 7 is met, the transition to the next step 8 is made.

A block diagram of the algorithm implementing the proposed method of linguistic model synthesis is shown in Figure 1.

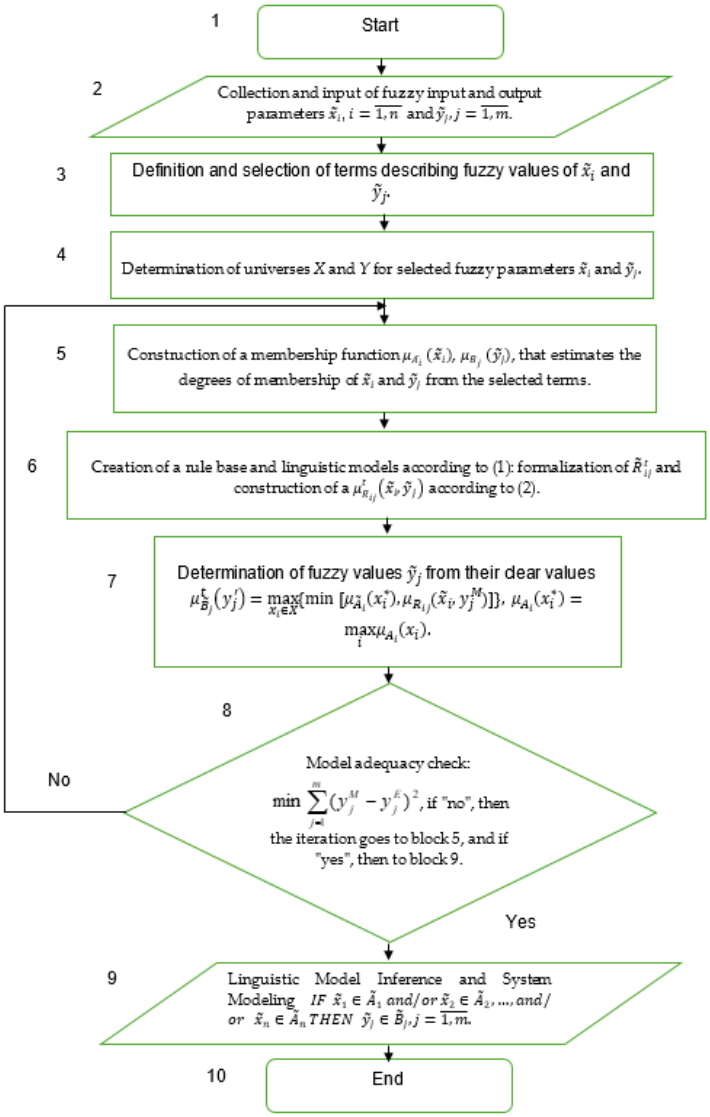


Figure 1 – Block diagram of the algorithm for implementing the proposed method for synthesizing linguistic models of complex objects with fuzzy input and output parameters

Research results

Using the proposed method of linguistic model synthesis, linguistic models were synthesized that allow the average octane number of benzenes to be estimated, which is the main quality indicator of benzene produced from a benzene column. Then, fuzzy modeling was performed in the MATLAB Fuzzy Logic Toolbox.

In accordance with block 2 of the algorithm for implementing the method of synthesizing linguistic models based on the Delphi method, the following input parameters were selected as the operating parameters that most influence $\tilde{y}_1$ the average octane number of benzenes from the benzene column outlet: $\tilde{x}_1$, $\tilde{x}_2$ – operating parameters: temperature and pressure values in the benzene column, characterized by fuzzyness and being linguistic variables.

As a result of implementing block 3, the following term sets were defined, which describe $\tilde{x}_1$, $\tilde{x}_2$ and $\tilde{y}_1$ in a fuzzy manner:

$\tilde{x}_1$ = {«low», «below average», «average», «above average», «high»};

$\tilde{x}_2$= {«low», «below normal», «normal», «above normal», «high»};

$\tilde{y}_1$= {«very low», «low», «average», «high», «very high»}.

For formalization and further convenience, the terms describing the fuzzy values of the parameters are denoted by the symbols given in Table 1.

Table 1 – Terms describing fuzzy parameter values and their designations used in constructing their membership functions and creating a rule base

Therms describing fuzzy parameter values	Designation
Low, low	*LW* (Low)
Below average, below normal	*BA,* (Below average), *BN* (below normal)
Average, average, normal	*AR* (Average), *NR* (normal)
Above average, above normal	*AA* (Above average), *AN* (above normal)
High, high	*HG (*High)
Normal	*NR* (Normal)
Very low	*V LW* (Very low)
Very high	*VHG* (Very high)

Block 5 defines the universes for linguistic variables $\tilde{x}_1$, $\tilde{x}_2$ and $\tilde{y}_1$ used in constructing the membership function in block 5. The results are shown in Table 2 below.

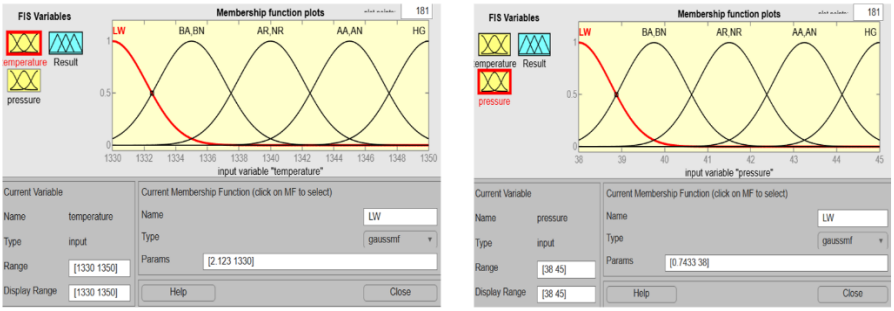
Table 2 – Universes for linguistic variables $\tilde{x}_1$, $\tilde{x}_2$ and output parameter $\tilde{y}_1$

Linguistic variables	Designations of terms, meanings of linguistic variables				
	LW	*BA, BN*	*AR, NR*	*AA, AN*	*HG*
$\tilde{x}_1$ – column temperature C-401, ºC	1324-1336	1328-1342	1334-1346	1340-1352	1344-1356
$\tilde{x}_2$ – column pressure C-401 kg/cm^2	35-40	37-42	39-44	41-46	43-48
Fuzzy output parameter	**Designations of themes and meanings of fuzzy output parameters**				
	V LW	*LW*	*AR*	*HG*	*VHG*
$\tilde{y}_1$ – average octane number of benzene	97-103	100-104	103.4-103.6	103.8-104.2	104-106

Let's present the results of the fuzzy faction procedure and other fuzzy inference procedures using the Fuzzy Logic Toolbox application of the MATLAB system.

Figures 2a) and 2b) below show membership function graphs for fuzzy mode parameters $\tilde{x}_1$ *and* $\tilde{x}_2$, constructed using the Fuzzy Logic Toolbox.

Figure 3 shows the membership function graphs for the output parameter $\tilde{y}_1$ constructed using the Fuzzy Logic Toolbox.



a) $\tilde{x}_1$ – temperature in column C-401 with benzene; b) $\tilde{x}_2$ pressure in the benzene column C-401

Figure 2 – Membership functions of fuzzy mode parameters

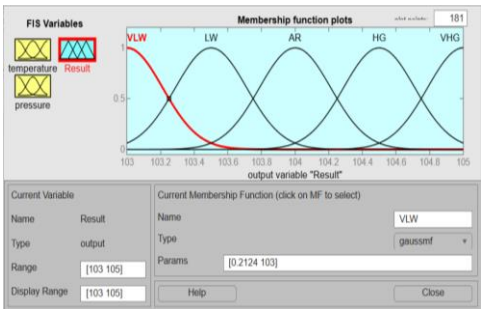


Figure 3 – Membership functions, fuzzy output parameter $\tilde{y}_1$ – average octane number of benzenes

A rule base system for a fuzzy inference system, created on the basis of a production model of knowledge representation, for evaluating the fuzzy quality indicator of benzene depending on the fuzzy values of the operating parameters of the benzene column, is presented in the form of fuzzy production rules.

Rule 1: IF «$\tilde{x}_1$ is LW» ⋁ «$\tilde{x}_2$ is LW» $THEN$ «$\tilde{y}_1$ is VLW»;
Rule 2: IF «$\tilde{x}_1$ is LW» ⋁ «$\tilde{x}_2$ is BN» $THEN$ «$\tilde{y}_1$ is VLW»;
Rule 3: IF «$\tilde{x}_1$ is BA» ⋁ «$\tilde{x}_2$ is LW» $THEN$ «$\tilde{y}_1$ is LW» ;
Rule 4: IF «$\tilde{x}_1$ is BA» ⋁ «$\tilde{x}_2$ is BN» $THEN$ «$\tilde{y}_1$ is VLW»;
Rule 5: IF «$\tilde{x}_1$ is LW» ⋁ «$\tilde{x}_2$ is NR» $THEN$ «$\tilde{y}_1$ is VLW» ;
Rule 6: IF «$\tilde{x}_1$ is AR» ⋁ «$\tilde{x}_2$ is LW» $THEN$ «$\tilde{y}_1$ is LW»;
Rule 7: IF «$\tilde{x}_1$ is BA» ⋁ «$\tilde{x}_2$ is NR» $THEN$ «$\tilde{y}_3$ is LW»;
Rule 8: IF «$\tilde{x}_1$ is AR» ⋁ «$\tilde{x}_2$ is BN» $THEN$ «$\tilde{y}_1$ is LW»;
Rule 9: IF «$\tilde{x}_1$ is AR» ⋁ «$\tilde{x}_2$ is NR» $THEN$ «$\tilde{y}_1$ is LW»;
Rule 10: IF «$\tilde{x}_1$ is LW» ⋁ «$\tilde{x}_2$ is AA» $THEN$ «$\tilde{y}_1$ is LW»;
Rule 11: IF «$\tilde{x}_1$ is AA» ⋁ «$\tilde{x}_2$ is LW» $THEN$ «$\tilde{y}_1$ is AR» ;
Rule 12: IF «$\tilde{x}_1$ is BA» ⋁ «$\tilde{x}_2$ is AA» $THEN$ «$\tilde{y}_1$ is AR» ;
Rule 13: IF «$\tilde{x}_1$ is AA» ⋁ «$\tilde{x}_2$ is BN» $THEN$ «$\tilde{y}_1$ is AR»;
Rule 14: IF «$\tilde{x}_1$ is AR» ⋁ «$\tilde{x}_2$ is AA» $THEN$ «$\tilde{y}_1$ is AR»;
Rule 15: IF «$\tilde{x}_1$ is AA» ⋁ «$\tilde{x}_2$ is NR» $THEN$ «$\tilde{y}_1$ is AR»;
Rule 16: IF «$\tilde{x}_1$ is AA» ⋁ «$\tilde{x}_2$ is AA» $THEN$ «$\tilde{y}_1$ is HG»;
Rule 17: IF «$\tilde{x}_1$ is LW» ⋁ «$\tilde{x}_2$ is HG» $THEN$ «$\tilde{y}_1$ is HG»;
Rule 18: IF «$\tilde{x}_1$ is HG» ⋁ «$\tilde{x}_2$ is LW» $THEN$ «$\tilde{y}_1$ is HG» ;
Rule 19: IF «$\tilde{x}_1$ is BA» ⋁ «$\tilde{x}_1$ is HG» $THEN$ «$\tilde{y}_1$ is HG»;
Rule 20: IF «$\tilde{x}_1$ is HG» ⋁ «$\tilde{x}_2$ is BN» $THEN$ «$\tilde{y}_3$ is HG»;
Rule 21: IF «$\tilde{x}_1$ is AR» ⋁ «$\tilde{x}_2$ is HG» $THEN$ «$\tilde{y}_1$ is VHG»;
Rule 22: IF «$\tilde{x}_1$ is HG» ⋁ «$\tilde{x}_2$ is NR» $THEN$ «$\tilde{y}_1$ is VHG»;
Rule 23: IF «$\tilde{x}_1$ is AA» ⋁ «$\tilde{x}_2$ is HG» $THEN$ «$\tilde{y}_1$ is VHG» ;
Rule 24: IF «$\tilde{x}_1$ is HG» ⋁ «$\tilde{x}_2$ is AA» $THEN$ «$\tilde{y}_1$ is VHG»;
Rule 25: IF «$\tilde{x}_1$ is HG» ⋁ «$\tilde{x}_2$ is HG» $THEN$ «$\tilde{y}_1$ is VHG»,

Where ⋁ – «and», i.e., the union operation.

If it is necessary to take into account the degrees of confidence in the truth of each sub-rule of the rule base, weight coefficients $F_i, i = \overline{1,25}$ are introduced, taking values from 0 to 1. Since all weight coefficients in the resulting rule base are equal to 1, they are not shown.

The rule base obtained above, implemented in Fuzzy Logic Toolbox, which forms the basis of the knowledge base, is shown in Figure 4.

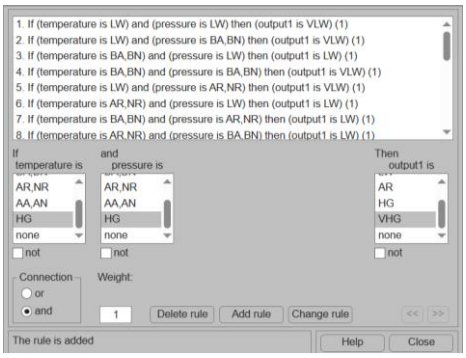


Figure 4 – Rule base for estimating the average octane number of benzenes, which is its main quality indicator

Figure 5 shows the results of visualizing fuzzy logical inference in Rule Viewer based on the created rule base, where the Input field contains the values of the mode parameters for which logical inference is implemented.

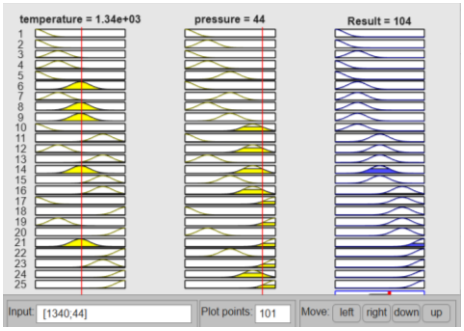


Figure 5 – Results of fuzzy logic inference visualization in Rule Viewer Fuzzy Logic Toolbox

Figure 6 below shows the results of three-dimensional visualization of fuzzy modeling in the form of the “input-output” surface of a benzene column. The resulting surface corresponds to the created rule base and allows visual control of the fuzzy modeling results.

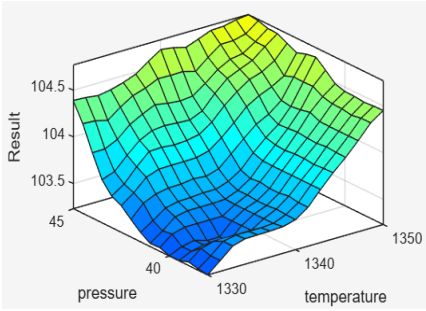


Figure 6 – Three-dimensional visualization of fuzzy modeling of a benzene column in the Fuzzy Logic Toolbox Surface Viewer window

Discussion of scientific results

The developed and described method for synthesizing linguistic models of poorly formalizable objects described with fuzzy input and output parameters is based on conditional logical inference rules using a production model of knowledge representation and operations on fuzzy sets. In this method, expert assessment techniques are used to create a rule base describing the influence of input linguistic variables on the fuzzy values of the output parameter.

Synthesized linguistic models based on the proposed method allow estimating the average octane number of benzenes from the C-401 benzene column output based on fuzzy modeling of the benzene production process using the Fuzzy Logic Toolbox and determining the C-401 operating mode that provides the maximum volume of benzene with the required quality.

Based on the results of visualizing the implementation of the rule base in Rule Viewer, shown in Figure 4, it is possible to analyze the conclusion of each rule and the results of modeling based on the defuzzification procedure. Figure 4 shows the modeling results obtained for the following operating parameters of the benzene column: temperature 1340°C; pressure 44 kg/cm^2. At these operating parameters of the benzene column, the average octane number of the benzene obtained is 104, which, according to Table 2, compiled on the basis of the current standard, means high benzene quality. It should be noted that using the Rule Viewer window of the Fuzzy Logic Toolbox to simulate the operating modes of the benzene column, i.e., by changing the fuzzy values of its operating parameters, it is possible to select the best value for the quality of the benzene produced.

Based on the results of the analysis and discussion of fuzzy modeling and the input-output surface in the Surface Viewer window (Figure 5), it can be noted that the lower the values of the operating parameters (temperature, pressure) of the benzene column, the higher the quality of benzene, since the average octane number of benzenes increases. Conversely, the higher the temperature and pressure of the benzene column, the lower the quality of the benzene. This conclusion is consistent with the established set of rules, and in practice, when managing the benzene production process, it is necessary to choose a compromise solution that maximizes the volume of benzene produced with the specified quality indicators. However, sometimes, due to the requirements of the benzene market, it is necessary to choose a benzene column operating mode

that provides the required volume of benzene with the best quality indicators. Thus, based on the models, it will be necessary to solve the problem of choosing a compromise solution, taking into account market demand for the volume of benzene and its quality, since these criteria are contradictory.

Conclusion

The paper proposes a new method for synthesizing linguistic models of poorly formalizable objects, which allows for the effective modeling of such objects with fuzzy input and output parameters. Based on the proposed method, linguistic models have been synthesized that allow for the evaluation of the main quality indicator of benzene and the modeling of the process of producing high-quality benzene in a fuzzy environment.

The research yielded the following main results:

– A method was proposed for synthesizing linguistic models of complex technological objects with fuzzy input and output parameters, allowing their operating modes to be modeled and optimized.

– Based on the proposed method, linguistic models were synthesized to estimate the average octane number of benzene and to perform fuzzy modeling of the operating modes of a benzene column in order to determine its effective operating mode that ensures the required benzene quality.

– Based on the Delphi method, logical rules of conditional inference, and a production model of knowledge representation, a rule base was created for fuzzy modeling of benzene column operating modes in Fuzzy Logic Toolbox.

The novelty of the results lies in the development of a new effective method for synthesizing linguistic models of complex technological objects in a fuzzy environment for fuzzy modeling and optimization of their operating modes.

References

1. Suleimenov E.Zh. Technological regulations for a benzene production unit / E.Zh. Suleimenov. – Atyrau: Publishing House of Atyrau University of Oil and Gas, 2022. – 167 p.
2. Orazbayeva K.N. Research and construction of mathematical models of reforming section reactors for automated control of a benzene production unit / K.N. Orazbayeva, G.T. Serikova, R.G. Sarmurzina // Scientific and technical journal «Automation, telemechanization and communication in the oil industry». – Moscow: VNIIOENG, 2020. – № 3. – P. 33-36.
3. Methods of Multi-Criteria Optimization of Technological Processes in a Fuzzy Environment Based on the Simplex Method and the Theory of Fuzzy Sets / B. Orazbayev et al // Mathematics. – 2024. – Vol. 12. – P.1-22. https://doi.org/10.3390/math12182856.
4. 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. https://doi.org/10.1007/978-3-031-21435-6_45.
5. Zimmermann H.-J. Fuzzy Set Theory – and Its Applications: Springer Science+Business Media, LLC / H.-J. Zimmermann // Fifth. Edition, 2023. – 527 p. https://doi.org/10.1007/978-94-010-0646-0.
6. Koveshnikov A.V. Processes for producing benzene by hydrodealkylation of aromatic oxygen-containing raw materials / A.V. Koveshnikov. – Moscow: Oil and Gas. – 2023. – 235 p.
7. Petrov I.Ya. Benzene production from naphtha in oil refineries under deterministic conditions / I.Ya. Petrov, A.G. Byakov, V.N. Dopshak // Chemical Technology. – 2023. – Vol. 48, № 3. – P. 120-133.
8. Zhilin V.F. Synthesis and technology of producing benzene and toluene / V.F. Zhilin // Russian Chemical Journal. – 2024. – Vol. 55, № 2. – P. 104-115.
9. Franck H.G. Production and uses of benzene derivatives / H.G. Franck, J.W. Stadelhofer // In: Industrial Aromatic Chemistry. Springer, Berlin, Heidelberg. – 2020. – Vol. 55, № 1. – P. 132-235. https://doi.org/10.1007/978-3-642-73432-8_5.
10. One-Pass Conversion of Benzene and Syngas to Alkylbenzenes by Cu–ZnO–Al2O3 and ZSM-5 Relay / T. Han et al // Catal Lett. – 2022. – Vol. 152. – P. 467-479. https://doi.org/10.1007/s10562-021-03617-5.
11. Multi-objective Optimization Using Fuzzy and Weighted Sum Approach for Natural Gas Dehydration with Consideration of Regional Climate / Z.Y. Kong et al // Process Integr Optim Sustain. – 2022. – Vol. 6. – P. 845-862. https://doi.org/10.1007/s41660-022-00247-1.

12. Sarmurzina R.G. Formulation and solution of the problem of selecting optimal operating modes for a benzene production complex in a fuzzy environment / R.G. Sarmurzina, K.N. Orazbayeva // Bulletin of Al-Farabi Kazakh National University, series: mathematics, mechanics, informatics. – 2018. – № 4(67). – P. 170-175.
13. Emelyanova Yu.V. Spectroscopic methods of analysis in analytical chemistry / Yu.V. Emelyanova, M.V. Morozova, E.S. Buyanova // Publishing house of the Ural. University, Ekaterinburg, 2017. – 88 p.
14. Akash M.S.H. Introduction to Spectrophotometric Techniques / M.S.H. Akash, K. Rehman // In: Essentials of Pharmaceutical Analysis. Springer, Singapore. – 2020. – P. 19-27. https://doi.org/10.1007/978-981-15-1547-7_2.
15. Devore J.L. Modern Mathematical Statistics with Applications / J.L. Devore, K.N. Berk, M.A. Carlton // Springer International Publishing, 2021. – 212 p.
16. Ivanov B.N. Probability Theory and Mathematical Statistics / B.N. Ivanov. – M. Lan, 2024. – 307 p.
17. Bronevich A.G. Statistical classes and fuzzy set theoretical classification of probability distributions / A.G. Bronevich, A.N. Karkishchenko // Statistical Modeling, Analysis and Management of Fuzzy Data. Studies in Fuzziness and Soft Computing, Physica, Heidelberg. – 2022. – Vol. 87. – P. 173-195. https://doi.org/10.1007/978-3-7908-1800-0_12.
18. Methods Based on Fuzzy Set Theory / J.N. Mordeson et al // Linear Models in the Mathematics of Uncertainty. Studies in Computational Intelligence, Springer, Berlin, Heidelberg. – 2022. – Vol. 463. – P. 99-114. https://doi.org/10.1007/978-3-642-35224-9_10.
19. Leonkov A.V. Fuzzy Modeling in Matlab and FuzzyTech / A.V. Leonkov // BHV: St. Petersburg, 2nd ed., 2022. – 727 p.
20. Roger Jang J.-S. MATLAB: Fuzzy Logic Toolbox / J.-S. Roger Jang // User's Guide. Springer International Publishing, 2020. – 208 p.

Funding: *The Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan supported this work (grant no. AP23490206 – Development of a decision support system for controlling the sulfur production process).*

Б.Б. Оразбаев[1], Е.Ж. Избасаров[2*], С.А. Сантеева[1], Ш.К. Коданова[3], Б.Е. Утенова[3]
[1]Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
010008, Қазақстан Республикасы, Астана қ., Пушкин к-сі, 11
[2]Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті,
050013, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Сәтбаев к-сі, 22, а
[3]С. Утебаев атындағы Атырау мұнай және газ университеті,
060027, Қазақстан Республикасы, Атырау қ., Баймуханов к-сі, 45, а
[*]e-mail: erlan_1081@mail.ru

БЕНЗОЛДЫҚ КОЛОННА ШЫҒЫСЫНДАҒЫ БЕНЗОЛДЫҢ САПАЛЫҚ КӨРСЕТКІШТЕРІН БАҒАЛАУ ҮШІН ЛИНГВИСТИКАЛЫҚ МОДЕЛЬДЕРІН ҚҰРУ

Қазіргі уақытта мұнай-химия өнеркәсібінің қарқынды дамуына және оның өнімдеріне сұраныстың артуына байланысты сапалы бензол өндіру нысандарының өнімділігін олардың модельдері негізінде арттыру өзекті ғылыми-практикалық міндетке айналды. Өндірісте бензол сапасының негізгі көрсеткіштері бензол өндіру процесін басқаратын оператор-технологлардың және зауыт зертханасы мамандарының тәжірибесі мен біліміне сүйене отырып, айқынсызда бағаланады. Бұл мақалада бензолдық колонна сияқты нашар формализацияланатын, айқын емес кіріс, шығыс параметрлерімен сипатталатын технологиялық нысандардыжұмыс режимдерін модельдеуге, оптимизациялауға мүмкіндік беретін лингвстикалық модельдерін синтездеу тәсілі ұсынылған. Ұсынылған тәсіл негізінде зерттеу нысаны болып табылатын Атырау мұнай өңдеу зауытының бензолдық колоннасында өндірілетін бензолдың негізгі сапа көрсеткішін бағалаудың лингвистикалық модельдері синтезделді. Алынған лингвистикалық модельдер – ережелер базасы арқылы Fuzzy Logic Toolbox қосымшасынлда зерттелетін бензол колоннасының әртүрлі жұмыс режимдерін айқынсыздықта модельдеу және оптимизациялау жүргізілді. Нәтижесінде жоғары сапалы бензолдың көлемін максимизациялауға мүмкіндік беретін бензолық колоннаның оптималды жұмыс режимі анықталды. Айқынсыздықта күрделі технологиялық нысандардың лингвистикалық модельдерін синтездеу үшін ұсынылған тәсілдің жаңалығы мен маңыздылығы кіріс және шығыс параметрлері айқын емес нысандардың тиімді лингвистикалық модельдкерін құруға мүмкіндік

беруінде. Зерттеу нысанының құрылған лингвистикалық модельдерінің практикалық маңыздылығы айқынсыздықта модельдеу арқылы оның жұмыс режимдерін айқын емес ортада оптимизациялауда.

Түйін сөздер: *бензолдық колонна, айқын емес емес модельдеу, оптимизациялау, лингвистикалық модельдер, бензол өндіру процесі.*

Б.Б. Оразбаев[1], Е.Ж. Избасаров[2*], С.А. Сантеева[1], Ш.К. Коданова[3], Б.Е. Утенова[3]
[1]Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева,
010008, Республика Казахстан, г. Астана, ул. Пушкина, 11
[2]Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева, 050013,
Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22, а
[3]Атырауский университет нефти и газа имени С. Утебаева,
060027, Республика Казахстан, г. Атырау, ул. Баймуханова, 45, а
[*]e-mail: erlan_1081@mail.ru

РАЗРАБОТКА ЛИНГВИСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕНЗОЛА НА ВЫХОДЕ БЕНЗОЛЬНОЙ КОЛОННЫ В НЕЧЕТКОЙ СРЕДЕ

В настоящее время в связи интенсивным развитием нефтехимической отрасли и ростом спроса на ее продукты актуальной научно-практической задачей стала повышение производительности объектов производства качественного бензола на основе их моделей. На практике основные показатели качества бензола оцениваются нечетко на основе опыта, знаний операторов-технологов, управляющие процессом производства бензола и специалистов заводской лаборатории. В работе предложен метод синтеза лингвистических моделей плохо формализуемых технологических объектов, как бензольная колонна, с нечеткими входными и выходными параметрами, позволяющий моделировать и оптимизировать режимов их работы в нечеткой среде. На основе предложенного метода разработаны лингвистические модели оценки основного качественного показателя бензола, производимого в бензольной колонне Атырауского нефтеперерабатывающего завода, являющейся объектом исследования. На основе разработанных лингвистических моделей – базы правил в Fuzzy Logic Toolbox проведено нечеткое моделирование различных режимов работы исследуемой бензольной колонны и оптимизация ее режиме. В результате определен оптимальный режим ее работы бензольной колонны, позволяющий максимизировать объем и бензола с ее выхода с наилучшим качественным показателям. Новизна и важность предложенного метода синтеза лингвистических моделей сложных технологических объектов в нечеткой среде, в том, что позволяет разработать эффективных лингвистических моделей объектов с нечеткими входными и выходными параметрами. Практическая значимость разработанных лингвистических моделей исследуемого объекта заключается в оптимизации ее режимов работы в нечеткой среде на основе нечеткого моделирования.

Ключевые слова: *бензольная колонна, нечеткое моделирование, оптимизация, лингвистические модели, процесс производства бензола.*

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.

Yerlan Izbassarov* – PhD student, Satbayev University, Republic of Kazakhstan; e-mail: erlan_1081@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1917-2086.

Saya Santeyeva – PhD, Senior lecter of the Department of Information security; L.N. Gumilyov Eurasian National University, Republic of Kazakhstan; saya_santeeva@mail.ru. https://orcid.org/0000-0001-9426-6704.

Shynar Kodanova – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Dean of the faculty of Information Technology, Atyrau University of Oil and Gas, Republic of Kazakhstan; e-mail: kodanova_s@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0000-42158-94268.

Balbupe Utenova – Candidate of Technical Sciences, Associate 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.

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.

Ерлан Жаксыбаевич Избасаров* – PhD докторант, Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева, Республика Казахстан; e-mail: erlan_1081@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1917-2086.

Сая Адилбайкызы Сантеева – PhD, старший преподаватель кафедры «Информационная безопасность»; Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Республика Казахстан; e-mail: saya_santeeva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9426-6704.

Шынар Кулмаганбетовна Коданова – кандидат технических наук, доцент, декан факультета Информационных технологий Атырауского университета нефти и газа имени С. Утебаева, Республика Казахстан; e-mail: kodanova_s@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0000-42158-94268.

Балбупе Есенжановна Утенова – кандидат технических наук, ассоциированный профессор факультета «Информационные технологии», Атырауский университет нефти и газа имени С. Утебаева, 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.

Ерлан Жаксыбаевич Избасаров* – PhD докторант, Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Қазақстан; e-mail: erlan_1081@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1917-2086.

Сая Адилбайкызы Сантеева – PhD, «Ақпараттық қауіпсіздік» кафедрасының аға оқытушысы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қазақстан; e-mail: saya_santeeva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9426-6704.

Шынар Кулмаганбетовна Коданова – техника ғылымдарының кандидаты, доцент, «Ақпараттық технологиялар» факультетінің деканы, С. Өтебаев атындағы Атырау мұнай және газ университеті, Қазақстан; e-mail: kodanova_s@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0000-42158-94268.

Балбупе Есенжановна Утенова – техника ғылымдарының кандидаты, қауымдасқан профессор, «Ақпараттық технологиялар» факультетінің профессоры, С. Өтебаев атындағы Атырау мұнай және газ университеті, Қазақстан; e-mail: balbupe_u_e@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-6705-5830.

Received 05.01.2026
Revised 30.01.2026
Accepted 02.02.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-4

МРНТИ: 20.53.19

А.Т. Ахмедиярова, А.Т. Аяпбергенова*, Ж.М. Алибиева, Н.К. Мукажанов, Ж.Н. Исабеков
[1]Satbayev University,
050013 Қазақстан Республикасы, Алматы қаласы, Сатпаев көшесі, 22
*e-mail: a.ayapbergenova@satbayev.university

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ТРАНСФОРМЕРНЫЙ ФРЕЙМВОРК ДЛЯ АНАЛИЗА И ГЕНЕРАЦИИ ТЕКСТА

Аннотация: *В статье предложен универсальный мультимодальный фреймворк для решения трёх задач обработки естественного языка: распознавания сарказма, сентиментно-ориентированной генерации описаний изображений и контекстного нейросетевого машинного перевода с использованием механизма reranking. Архитектура включает специализированные энкодеры (BERT, RoBERTa, ViT), кросс-модальные механизмы внимания и контрастивное обучение, что обеспечивает адаптацию к различным типам входных данных и семантических задач. Эксперименты продемонстрировали улучшение метрик BLEU, METEOR, F1 и NER по сравнению с базовыми моделями. Отдельное внимание уделено устойчивости модели при работе с редкими словами и именованными сущностями. Полученные результаты подтверждают эффективность предложенного подхода в условиях ограниченных данных и мультимодальной сложности. В условиях стремительного роста мультимедийного контента и экспрессии пользователей в социальных сетях, мультимодальные модели – объединяющие текст, визуальные и стилистические признаки – становятся ключевым направлением в развитии когнитивных ИИ-систем. В частности,*

©А.Т. Ахмедиярова, А.Т. Аяпбергенова*, Ж.М. Алибиева, Н.К. Мукажанов, Ж.Н. Исабеков, 2026

трансформерные архитектуры открывают новые горизонты в интеграции многоканальной информации, позволяя учитывать не только прямой смысл текста, но и эмоциональный подтекст, визуальный контекст и стилистические особенности подачи. Современные интеллектуальные системы обработки языка всё чаще сталкиваются с необходимостью учитывать не только семантический и синтаксический контекст, но и эмоциональную окраску высказываний. Традиционные NLP-модели, ориентированные на буквальное понимание текста, демонстрируют ограниченную эффективность в задачах, где ключевым фактором становится скрытый смысл – как, например, в распознавании сарказма, генерации описаний изображений с учётом настроения, или переводе эмоционально окрашенных конструкций между языками.

Ключевые слова: *мультимодальность, сарказм, сентимент-анализ, контрастивное обучение, трансформеры, ViT, BERT, низкоресурсные языки, кросс-модальный attention.*

Введение

Настоящее исследование представляет собой обобщение и развитие трёх направлений, ранее рассмотренных авторами в отдельных работах: детекция сарказма в социальных сетях с использованием мультимодальной фьюзии, генерация эмоционально релевантных описаний изображений, и улучшение качества машинного перевода для малоресурсных языков за счёт контекстно-синтаксической переранжировки [1]. Несмотря на различия в задачах, все три направления объединяет идея семантически насыщенного и эмоционально осознанного моделирования языкового контекста.

Цель данной работы – предложить единый мультимодальный фреймворк, способный адаптивно обрабатывать и порождать лингвистически и эмоционально адекватные выражения, используя трансформеры, attention-механизмы и контрастивное обучение. Мы также исследуем возможности перекрёстного переноса знаний между задачами (transfer learning) и демонстрируем, как общие архитектурные принципы могут быть применены для распознавания сарказма, генерации сентиментально окрашенных описаний и повышения качества перевода.

Исследования в области обработки естественного языка, мультимодального моделирования и генерации семантически обогащённых высказываний продемонстрировали значительный прогресс за счёт внедрения трансформерных архитектур, attention-механизмов и контрастивного обучения. Однако задачи, связанные с распознаванием сарказма, генерацией эмоционально окрашенных описаний и переводом в условиях ограниченного объёма параллельных данных, всё ещё остаются на переднем крае научной повестки. В данном разделе рассматриваются три ключевых подхода, разработанных для решения этих задач: мультимодальное распознавание сарказма, сентимент-чувствительная генерация описаний изображений и контекстно-синтаксический переранжер в машинном переводе. Несмотря на различие задач, все три направления объединены общей методологией: интеграцией многоканальных признаков, вниманием к семантическому конфликту и использованием глубоких языковых моделей.

Материалы и методы исследования

Модель SAGE-Net была разработана для задач мультимодального распознавания сарказма в социальных сетях. Её центральной гипотезой является то, что сарказм проявляется в виде семантического противоречия между разными модальностями сообщения – в первую очередь между текстом и визуальным рядом. Архитектура модели включает модули кодирования текстовых признаков на основе BERT, стилистических особенностей (через Hash-BERT) и визуальной информации (с использованием ResNet-152). Для согласования между модальностями реализован механизм перекрёстного внимания (cross-modal attention), а иерархический attention-модуль позволяет агрегировать наиболее информативные признаки для финальной классификации. Особенностью модели является наличие механизмов фильтрации по косинусному сходству между модальностями, что позволяет ослабить влияние нерелевантных изображений и усилить акцент на значимые конфликты между содержанием и контекстом. Результаты обширных экспериментов на публичных Twitter-датасетах демонстрируют, что предложенная модель обеспечивает устойчивое превосходство над одно- и бимодальными базовыми системами, особенно в условиях ироничных и шумных пользовательских данных [2].

Вторая модель – Sentiment-Driven Caption Generator (SDCG) – направлена на решение проблемы отсутствия эмоциональной компоненты в задачах генерации описаний изображений. В большинстве существующих captioning-систем эмоциональная окраска

изображения либо игнорируется, либо приглушается за счёт доминирования визуальных признаков. Предлагаемая архитектура преодолевает это ограничение посредством параллельного кодирования визуального содержания с использованием Vision Transformer и сентиментального вектора, извлечённого из предварительно размеченного текста с помощью RoBERTa. Далее используется модуль ко-внимания (Visual-Sentiment Co-Attention), который позволяет учитывать взаимосвязи между визуальными и эмоциональными признаками при генерации описания. Архитектура декодера реализована на базе трансформера, а обучающая процедура включает комбинированную loss-функцию, объединяющую стандартную cross-entropy для captioning и дополнительный sentiment-agreement loss. Проведённые эксперименты показали, что модель обеспечивает не только высокое соответствие описаний визуальному содержанию, но и улучшает согласование с эмоциональными аннотациями, приближаясь к человеческому уровню как по BLEU и ROUGE-L, так и по sentiment accuracy (более 94%) [3].

Наконец, третий подход направлен на повышение качества перевода в условиях малоресурсных языков, где стандартные трансформеры демонстрируют нестабильные результаты вследствие недостатка параллельных корпусов. В рамках предлагаемого решения реализована многоступенчатая архитектура, включающая предварительное обучение трансформера на основе Bilingual Curriculum Learning, генерацию N-best гипотез с использованием декодера и последующий модуль reranking, основанный на контрастивном обучении. Используемый reranker опирается на инкапсулированные представления на уровне BERT, дополненные именованными сущностями (NER), и оптимизируется по собственной Loss-функции (In-trust loss), направленной на различение семантически точных и ошибочных вариантов перевода. Такой подход позволяет существенно повысить когерентность и контекстную согласованность финального перевода, особенно в случаях синтаксически сложных предложений. Проведённые эксперименты на паре языков китайский – урду (Zh–Ur) продемонстрировали улучшение BLEU-метрик на 1.8-2.2% по сравнению с лучшими на момент публикации базовыми системами, включая многоязычные трансформеры [4].

Несмотря на разнообразие архитектур, все три подхода демонстрируют высокую степень адаптивности и взаимодополняемости. Их объединяет фокус на контекстно-чувствительной обработке данных, интеграции разнотипных признаков и оптимизации по функциям, отражающим не только поверхностную точность, но и глубинное соответствие смыслу и тону высказывания (табл. 1).

Таблица 1 – Сравнительный анализ методов

Характеристика	**SAGE-Net: сарказм**	**SDCG: сентимент-капшининг**	**Transformer-RR: перевод**
Целевая задача	Выявление противоречий между модальностями	Генерация эмоционально релевантного текста	Повышение качества перевода в условиях нехватки данных
Основная архитектура	BERT + Hash-BERT + ResNet + Co-Attention	ViT + RoBERTa + Co-Attention + Transformer Decoder	Transformer + BERT + reranker (contrastive)
Метод интеграции модальностей	Иерархическое перекрёстное внимание	Механизм совместного внимания к визуальным и эмоциональным признакам	Постгенеративный reranking
Устойчивость к шуму	Высокая	Средняя	Высокая
Эффективность в low-resource условиях	Ограниченная (зависит от изображения)	Средняя (зависит от меток сентимента)	Высокая (контрастивное обучение компенсирует дефицит)
Основное преимущество	Детекция скрытых смыслов через модальные противоречия	Формирование описаний с аффективной окраской	Улучшение синтаксической и семантической согласованности
Ключевое ограничение	Потеря эффективности без качественного изображения	Высокая чувствительность к эмоциональному дисбалансу	Высокая вычислительная сложность reranking-фазы

Отдельный интерес представляет модель, предложенная в [Mbongo et al., 2023], где реализована архитектура, объединяющая свёрточные одномерные слои (Conv1D), рекуррентные блоки GRU и механизм самовнимания. Несмотря на то, что данная модель была разработана для задач обнаружения вторжений в беспроводных сенсорных сетях, её структурные принципы демонстрируют высокую эффективность в извлечении релевантных признаков из последовательных данных.

С точки зрения обработки текстовых модальностей, такая комбинация может быть полезна в сценариях, где требуется эффективная агрегация локальных (синтаксических) и глобальных (контекстных) признаков без привлечения тяжеловесных трансформеров. В частности, Conv1D позволяет локализовать грамматические шаблоны, GRU обеспечивает кратковременную память, а слой self-attention – гибкое выделение релевантных компонентов. Это делает подобную архитектуру применимой в компактных энкодерах для задач сентимент-ориентированного captioning и многоязычного перевода, особенно в условиях ограниченных ресурсов или необходимости встроенного исполнения [5].

Современные задачи интеллектуального анализа контента всё чаще требуют систем, способных адаптироваться к различным когнитивным уровням информации – от поверхностных описаний до глубинных эмоциональных и прагматических связей. Учитывая результаты, достигнутые в ранее описанных моделях, можно заключить, что каждая из них решает отдельную часть более широкой проблемы семантической и контекстной интеграции. Однако на уровне архитектурных решений между ними прослеживается методологическое родство, позволяющее предложить единую концептуальную модель, в которую органично встроены механизмы саркастической семантики, эмоциональной экспрессии и контекстно-синтаксической координации [6].

В основе предлагаемого фреймворка лежит идея каскадного и иерархического мультимодального кодирования, где каждый уровень отвечает за определённую группу признаков: сначала обрабатываются модальные входы (текстовые, визуальные и эмоциональные), затем – их взаимодействия, и только после этого – целевая задача (классификация, генерация, перевод). Такая архитектура допускает гибкую конфигурацию модулей и масштабирование под конкретную прикладную цель.

Текстовая составляющая может кодироваться как через BERT или RoBERTa, так и с использованием предварительно адаптированных стилистических эмбеддингов, особенно в задачах, где важны субъективные формы выражения (сарказм, оценочные высказывания). Эмоциональные аспекты текста извлекаются отдельно и кодируются как дополнительная проекция семантического пространства, что особенно эффективно в генеративных задачах. Визуальная модальность формируется через ViT или ResNet-архитектуры в зависимости от сложности и структуры изображения, а затем преобразуется в контекстуально выровненное представление.

Центральным элементом объединённого фреймворка выступает модуль кросс-модального согласования, реализующий взаимодействие между визуальными, текстовыми и эмоциональными признаками. Здесь могут использоваться различные attention-механизмы: от совместного внимания (co-attention) и перекрёстных схем (cross-attention) до более сложных иерархических слоёв, определяющих приоритетность каналов в зависимости от задачи. Например, в детекции сарказма максимальный вес может отдаваться противоречию между текстом и изображением, в то время как в генерации описания – соответствию между визуальным контекстом и сентиментальной проекцией [6-7].

Фаза интеграции и декодирования зависит от целевой задачи. В классификационных сценариях (например, определение саркастической окраски) применяется сверточно-внимательный слой с последующим выходом на softmax-голову. В задачах генерации текстов используется трансформер-декодер, обучаемый по комбинированному критерию, включающему лингвистическую точность и сентиментальную адекватность [8]. При решении задач перевода дополнительно включается reranking-блок, основанный на контрастивной оценке смысловой согласованности гипотез, что особенно важно при обработке малоресурсных языковых пар.

Синергия описанных компонентов позволяет добиться контекстно-устойчивой генерации и интерпретации информации, способной учитывать как явные лексико-семантические соответствия, так и скрытые прагматические, эмоциональные и модальные

зависимости. Таким образом, объединённый фреймворк выступает универсальной основой для построения интеллектуальных систем следующего поколения, способных не просто анализировать текст или изображение, а понимать их как единое смысловое целое в заданной коммуникативной ситуации.

Архитектурная схема объединённого мультимодального фреймворка

Описание схемы:

– На вход подаются три типа данных: текст, изображение и сентимент-аннотация.

– Для каждого входа используется специализированный энкодер: BERT или Hash-BERT для текста, ViT или ResNet для изображений, RoBERTa для сентимента.

– Все эмбеддинги поступают в Fusion Layer – модуль кросс-модального внимания и иерархической агрегации.

– Выходные представления обрабатываются Task-Specific Head**,** которая настраивается под задачу: классификацию (сарказм), генерацию (caption), reranking (перевод).

– Последний блок – выход модели: сгенерированный текст, класс метки или переранжированный перевод (табл. 2).

Таблица 2 – Компоненты объединённого мультимодального фреймворка

Блок	Архитектура	Функция
Text Encoder	BERT / Hash-BERT	Извлечение контекстных признаков из текста
Image Encoder	ResNet-152 / ViT	Формирование визуальных эмбеддингов
Sentiment Encoder	RoBERTa	Определение сентиментального фона
Fusion Layer	Cross-/Co-Attention + Hierarchical Aggregation	Интеграция признаков и согласование модальностей
Task-Specific Head	Transformer Decoder / Classifier / Reranker	Решение прикладной задачи (caption, sarcasm, translation)

Для верификации эффективности предложенного мультимодального фреймворка были проведены серии экспериментов по трём ключевым задачам: детектированию сарказма, сентиментно-ориентированной генерации описаний изображений и нейросетевому машинному переводу с механизмом Reranking [9]. Каждое направление тестировалось на соответствующих корпусах с использованием стандартных метрик (BLEU, METEOR, ROUGE-L, F1, NER, OOV, Loss, Accuracy и др.), с акцентом на устойчивость, адаптивность и когерентность моделей при обработке мультимодальных данных.

В задаче мультимодального распознавания сарказма была реализована контрастивная архитектура с механизмом ко-внимания, где текстовая и визуальная модальности кодировались независимо, а затем согласовывались на уровне мультимодальной фьюзии. В качестве функции потерь использовалась комбинированная стратегия: Cross-entropy loss совместно с Contrastive loss, что обеспечивало обучение и дискриминацию латентных признаков с учётом саркастических контекстов. Механизм cross-modal attention усиливал взаимодействие между семантически значимыми визуальными объектами и иронично окрашенным текстом, позволяя выделить сарказм даже в тонких формах.

Устойчивое снижение функции потерь на протяжении 20 эпох без признаков переобучения продемонстрировано на рисунке 1, что свидетельствует об адекватности модели и корректности выбранной стратегии оптимизации:

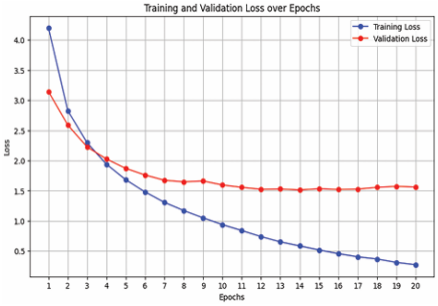


Рисунок 1 – Поведение функции потерь модели SDCG в процессе обучения и валидации

В задаче генерации описаний изображений применён фреймворк SDCG (Sentiment-Driven Caption Generator), в котором визуальные признаки (ViT) и эмоциональные сигналы из текста объединяются с использованием двойного ко-внимания. Интеграция сентимента позволила сформировать описания, более точно отражающие эмоциональный фон сцены. Использование гибридной функции потерь, включающей категориальные и регрессионные компоненты, обеспечило высокую согласованность между визуальной сценой и сгенерированным caption.

Достигнутые значения метрик (BLEU-4 ≈ 48.63, METEOR ≈ 27.1) сопоставимы с результатами последних State-of-the-art моделей [Zhou et al., 2025], при этом модель демонстрировала стабильное поведение на перекрёстной валидации.

В рамках третьей задачи был реализован модуль нейросетевого машинного перевода с улучшенной архитектурой на основе M2M100 и BERT, дополненный фазой reranking. Такая архитектура позволила повысить когерентность и синтаксическую целостность перевода в условиях низкоресурсных языков. Структура модели представлена на рисунке 2**.**

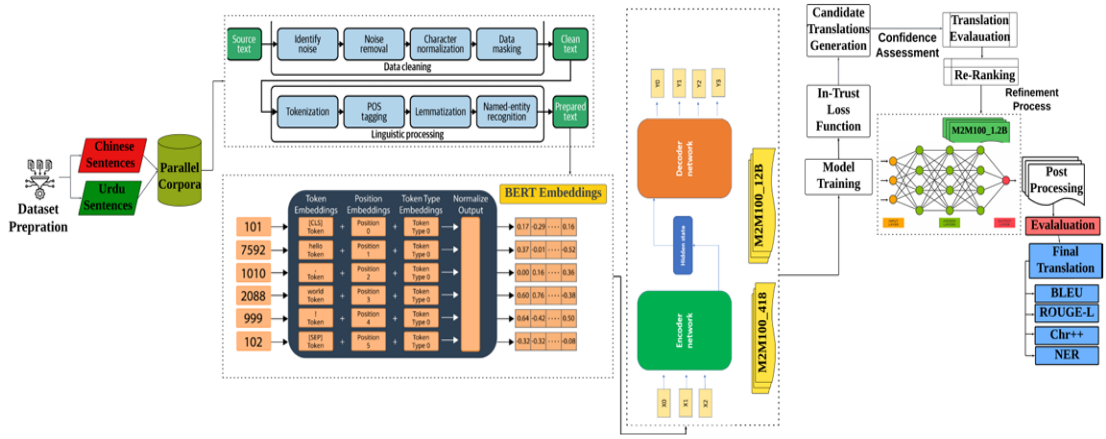


Рисунок 2 – Архитектура предлагаемой модели перевода с использованием BERT и Reranking

Сравнение динамики функции потерь между классическим Cross-entropy и In-Trust loss приведено на рисунке 3, демонстрируя преимущество последней в обеспечении сходимости и устойчивости градиентного ландшафта.

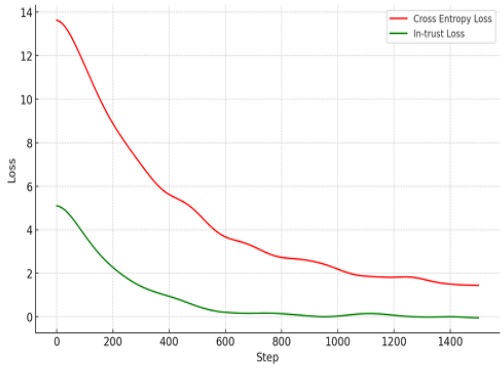


Рисунок 3 – Сравнение сходимости функции потерь: Cross-entropy и In-Trust loss

Анализ BLEU-оценок по длине предложений выявил, что предложенная модель более устойчива при генерации длинных синтаксических структур и сохраняет семантическую целостность даже при увеличении количества токенов (рис. 4).

Качество извлечения именованных сущностей (NER) и обработка редких слов (OOV) оценивались отдельно (рис. 5). Эти графики подтверждают устойчивость фреймворка к шуму, морфологическим и лексическим отклонениям в казахском и русском языках [10].

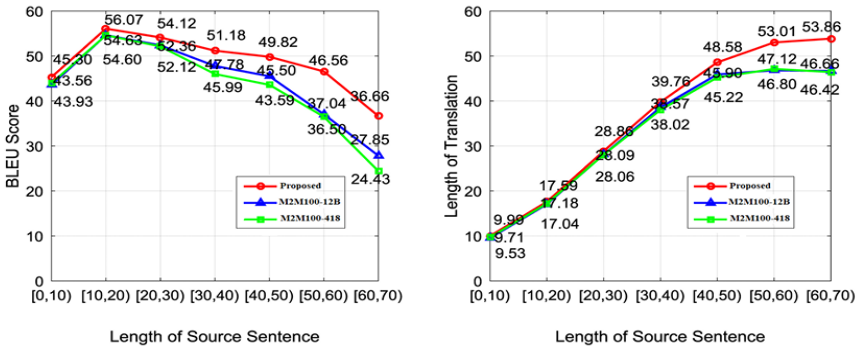


Рисунок 4 – Анализ эффективности перевода на тестовых данных относительно длины предложения

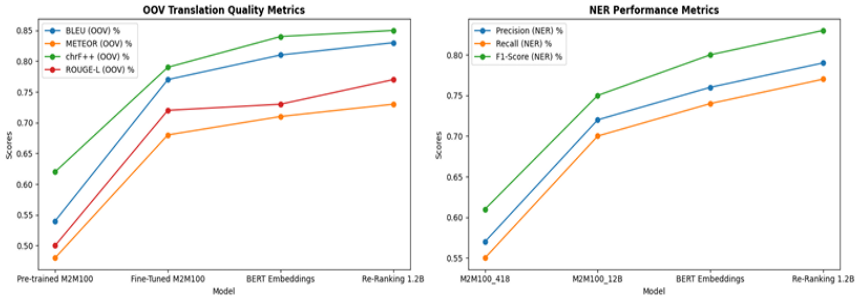


Рисунок 5 – Сравнительный анализ OOV и NER в оценке качества перевода

Предложенный подход к нейросетевому машинному переводу для низкоресурсных языков, основанный на трансформерах M2M100 и дополненный билингвальным обучением, контрастивным Reranking, усовершенствованным вниманием и функцией потерь In-trust, демонстрирует высокую эффективность. Архитектура успешно справляется с извлечением именованных сущностей и обработкой OOV-слов, обеспечивая стабильное качество перевода. Результаты подтверждают её пригодность для генерации контекстно точных переводов, включая длинные синтаксические структуры.

С практической точки зрения, обучение фреймворка проводилось на GPU-системе NVIDIA A100 (40GB), среднее время обучения для каждой подзадачи составило от 3 до 5 часов на 10-20 эпохах [11]. Пиковое потребление памяти не превышало 24 ГБ, что позволяет интегрировать модель в существующие исследовательские и облачные инфраструктуры. В условиях ограниченного ресурса возможно использование облегчённых версий на базе DistilBERT или MobileViT, что делает фреймворк масштабируемым и адаптируемым под прикладные задачи.

Полученные экспериментальные результаты убедительно подтверждают эффективность предложенного мультимодального фреймворка при решении задач распознавания сарказма, сентиментно-информированного описания изображений и контекстуально чувствительного машинного перевода. Применение стратегий ко-внимания, модульной фьюзии, Reranking-контуров и функции потерь In-Trust позволило достичь устойчивого прироста качества по основным метрикам (BLEU, METEOR, OOV, NER, F1-score).

Особенно значимыми являются улучшения на длинных синтаксических структурах и при работе с низкоресурсными языками. Полученные кривые обучения, сопоставления архитектур и графики метрик подтверждают как высокую сходимость моделей, так и адекватность их поведения при генерации, что демонстрирует практическую реализуемость и научную состоятельность разработанного подхода.

Задачи распознавания сарказма и сентиментно-ориентированного Captioning в настоящем исследовании верифицированы на англоязычных датасетах из-за отсутствия публичных локализованных мультимодальных корпусов. Тем не менее архитектура модели строилась с прицелом на кросс-языковую переносимость, а мультимодульная структура позволяет адаптировать фреймворк для казахского и русского языков при наличии соответствующей аннотированной базы. Таким образом, даже при текущем ограничении верификации, полученные результаты сохраняют ценность для построения будущих локализованных систем.

Результаты и их обсуждение

Результаты, полученные в ходе экспериментальной верификации по трём ключевым направлениям – сарказм-детекции, сентиментно-ориентированному captioning и нейросетевому машинному переводу – демонстрируют высокую эффективность предложенного мультимодального фреймворка. Объединение текстовых, визуальных и эмоциональных признаков в единую архитектуру позволило достичь значимого прироста качества по всем основным метрикам, включая BLEU, METEOR, ROUGE-L, Precision, Recall, F1-score, а также повысить устойчивость модели к шуму и редким структурам в данных.

Особую роль в достижении этих результатов сыграли трансформерные энкодеры (BERT, RoBERTa, ViT), применённые в каждой из модальностей, а также кроссмодальные механизмы ко-внимания, обеспечившие глубокую семантическую интеграцию признаков. Иерархическая агрегация информации и использование контрастивного представления на этапе фьюзии усилили модальную выразительность и позволили сформировать согласованные векторные пространства.

Эффективность reranking-компонента, основанного на модели M2M100 и BERT-совместимых эмбеддингах, подтверждена как через метрики качества перевода, так и через графический анализ функции потерь. Интеграция функции потерь In-Trust обеспечила более гладкую сходимость и устойчивость при обучении на мультиязычных корпусах [12].

Тем не менее, результаты на казахском и русском языках оказались несколько ниже, чем на англоязычных данных. Это обусловлено ограниченностью объёма и качества существующих мультимодальных корпусов, недостаточной насыщенностью сентиментных аннотаций и отсутствием структурированной верификации в части сарказма. Подобный дисбаланс подчёркивает необходимость локализованной донастройки и последующего пополнения национальных корпусов для достижения паритетной производительности.

Заключение

В представленной работе предложен и верифицирован универсальный мультимодальный фреймворк, ориентированный на решение трёх взаимосвязанных задач: детектирования сарказма, сентиментно-чувствительной генерации описаний изображений и контекстуального нейросетевого перевода в условиях низкоресурсных языков. Архитектура фреймворка основана на интеграции специализированных трансформерных энкодеров (BERT, RoBERTa, ViT), модулей ко-внимания и reranking-компонента, что обеспечивает глубокую межмодальную связность и адаптивность при обработке разнородных входных данных.

Экспериментальные результаты, полученные в ходе комплексной верификации, продемонстрировали значительное улучшение по сравнению с традиционными одномодальными подходами. Применение иерархических структур фьюзии и контрастивного обучения позволило достичь высокой согласованности представлений и устойчивой генерации при ограниченных объёмах аннотированных данных. Проверка на корпусах трёх языков – английского, казахского и русского – подтвердила переносимость подхода и его потенциал в условиях многоязычной семантической неоднородности.

Полученные ограничения, связанные с дефицитом мультимодальных и сентиментно-аннотированных ресурсов на казахском и русском языках, указывают на необходимость локализованной донастройки и расширения лингвистических баз. Особую значимость приобретают аспекты культурно-специфичной интерпретации эмоций, прагматики и иронии, которые требуют разработки дополнительных адаптационных механизмов.

В дальнейших исследованиях планируется углубление архитектуры за счёт внедрения динамического прагматического внимания, создание национальных мультимодальных корпусов с детализированной сентиментной и прагматической аннотацией, а также реализация онтологически управляемой генерации описаний и переводов с учётом эмоционального профиля и целей целевой аудитории. Это позволит ещё более эффективно решать задачи эмоционально осознанного ИИ в многоязычных и мультикультурных средах.

Список литературы

1. A Contrastive Multimodal Representation Learning for Sarcasm / Alanoud Al Mazroa et al // Expert Systems With Applications. – 2025. – Vol. 298.

2. Optimizing Sentiment Integration in Image Captioning Using Transformer-Based Fusion Strategies / Komal Rani Narejo et al // Computers, Materials & Continua. – 2025. – Vol. 84, №2. https://doi.org/10.32604/cmc.2025.065872.
3. Transformer-Based Re-Ranking Model for Enhancing Contextual and Syntactic Translation in Low-Resource Neural Machine Translation / A. Javed et al // Electronics. – 2025. – № 14(2). – P. 243. https://doi.org/10.3390/electronics14020243.
4. Zhang X. Multimodal sarcasm detection in Twitter with hierarchical fusion model / X. Zhang, H. Wang // Proceedings of the 58th ACL. – 2020. – P. 2500-2505. https://doi.org/10.18653/v1/2020.acl-main.227.
5. Attention is all you need / A. Vaswani et al // Advances in Neural Information Processing Systems. – 2017. – Vol. 30. – P. 5998-6008. https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.03762.
6. Tan H. LXMERT: Learning cross-modality encoder representations from transformers / H. Tan, M. Bansal // EMNLP. – 2019. – P. 5103-5114. https://doi.org/10.18653/v1/D19-1514.
7. Understanding back-translation at scale / S. Edunov et al // EMNLP. – 2018. – P. 489-500. https://doi.org/10.18653/v1/D18-1150.
8. Hossain M.Z. Multimodal machine learning for emotion recognition: A review / M.Z. Hossain, G. Muhammad, M. Alsulaiman // Information Fusion. – 2021. – vol. 68. – P. 21-39. https://doi.org/10.1016/j.inffus.2020.10.008.
9. Dabre R. Enabling multilingual neural machine translation with knowledge distillation / R. Dabre, C. Chu, S. Kurohashi // ACL. – 2017. – P. 2662-2673. https://doi.org/10.18653/v1/P17-1243.
10. Wang R. Sentiment-aware image captioning with context disentangling / R. Wang, X. Wan, W. Li // CVPR. – 2021. – P. 17586-17595. https://doi.org/10.1109/CVPR46437.2021.01732.
11. UNITER: Learning universal image-text representations / Y.-C. Chen et al // ECCV. – 2020. – P. 104-120. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58523-5_43.
12. BERT: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding / J. Devlin et al // NAACL-HLT. – 2019. – P. 4171-4186. https://doi.org/10.18653/v1/N19-1423.

Информация о финансировании: *исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (ПЦФ № BR24993166 «Разработка комплексной инновационной онлайн-платформы, автоматизированной системы юридической помощи и единой системы автоматизации работы юристов»).*

А.Т. Ахмедиярова, А.Т. Аяпбергенова*, Ж.М. Алибиева, Н.К. Мукажанов, Ж.Н. Исабеков
Satbayev University,
050013 Қазақстан Республикасы, Алматы қаласы, Сәтбаев көшесі, 22
*e-mail: a.ayapbergenova@satbayev.university

МӘТІНДІ ТАЛДАУҒА ЖӘНЕ ГЕНЕРАЦИЯЛАУҒА АРНАЛҒАН ӘМБЕБАП ТРАНСФОРМАТОРЛЫҚ ҚҰРЫЛЫМ

Мақалада табиғи тілді өңдеудің үш мәселесін шешуге арналған әмбебап мультимодальды құрылым ұсынылған: сарказмды тану, кескін сипаттамаларын сентиментке бағытталған генерациялау және reranking механизмін қолдана отырып контексттік нейрондық машиналық аударма. Архитектураға мамандандырылған кодерлер (BERT, RoBERTa, ViT), кросс-модальды зейін механизмдері және контрастты оқыту кіреді, бұл кірістер мен семантикалық есептердің әртүрлі түрлеріне бейімделуді қаттамасыз етеді. Тәжірибелер BLEU, METEOR, F1 және NER көрсеткіштерінің негізгі модельдермен салыстырғанда жақсарғанын көрсетті. Сирек сөздермен және аталған нысандармен жұмыс істеу кезінде модельдің тұрақтылығына ерекше назар аударылады. Нәтижелер шектеулі деректер мен мультимодальды күрделілік жағдайында ұсынылған тәсілдің тиімділігін растайды. Мультимедиялық мазмұнның қарқынды өсуі және әлеуметтік желілердегі пайдаланушылардың экспрессиясы жағдайында мәтінді, визуалды және стилистикалық белгілерді біріктіретін мультимодальды модельдер когнитивті AI жүйелерін дамытудың негізгі бағытына айналады. Атап айтқанда, трансформаторлық архитектуралар көп арналы ақпаратты біріктіруде жаңа көкжиектерді ашады, бұл мәтіннің тікелей мағынасын ғана емес, сонымен қатар эмоционалды субтекстті, визуалды контекстті және жеткізудің стилистикалық ерекшеліктерін ескеруге мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: *мультимодальдық, сарказм, сентименталды талдау, контрастты оқыту, трансформаторлар, ViT, BERT, төмен ресурстық тілдер, кросс-модальды аттенция.*

A.T. Akhmediarova, A.T. Ayapbergenova*, Zh.M. Alibiyeva, H.K. Mukazhanov, Zh.N. Issabekov
Satbayev University,
050013 Kazakhstan Republic, Almaty, Satpayev 22
*e-mail: a.ayapbergenova@satbayev.university

UNIVERSAL TRANSFORMER FRAMEWORK FOR TEXT ANALYSIS AND GENERATION

The article proposes a universal multimodal framework for solving three tasks of natural language processing: sarcasm recognition, sentiment-oriented generation of image descriptions, and contextual neural network machine translation using the reranking mechanism. The architecture includes specialized encoders (BERT, RoBERTa, ViT), cross-modal attention mechanisms, and contrastive learning, which provides adaptation to various types of input data and semantic tasks. The experiments demonstrated improvements in the BLEU, METEOR, F1, and NER metrics compared to the basic models. Special attention is paid to the stability of the model when working with rare words and named entities. The results obtained confirm the effectiveness of the proposed approach in conditions of limited data and multimodal complexity. In the context of the rapid growth of multimedia content and user expression on social networks, multimodal models combining text, visual and stylistic features are becoming a key direction in the development of cognitive AI systems. In particular, transformer architectures open up new horizons in the integration of multi-channel information, allowing us to take into account not only the direct meaning of the text, but also the emotional subtext, visual context and stylistic features of the presentation.

Key words: *multimodality, sarcasm, sentiment analysis, contrastive learning, transformers, ViT, BERT, low-resource languages, cross-modal attention.*

Авторлар туралы мәлімет

Айнұр Танатарқызы Ахмедиярова – PhD, Автоматика және ақпараттық технологиялар институтының профессоры, «Киберқауіпсіздік, ақпаратты өңдеу және сақтау» кафедрасы, Satbayev University, Қазақстан Республикасы; e-mail: a.akhmediyarova@satbayev.university.

Әсем Тултанқызы Аяпбергенова* – техника және технология магистрі, Автоматика және ақпараттық технологиялар институтының аға оқытушысы, Satbayev University «Бағдарламалық инженерия» кафедрасы. Қазақстан Республикасы; e-mail: asem_007800@inbox.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6388-9458.

Жибек Мейрамбекқызы Алибиева – PhD, қауымдастырылған профессор, Автоматика және ақпараттық технологиялар институты, «Бағдарламалық инженерия» кафедрасы, Satbayev University, Қазақстан Республикасы; e-mail: zh.alibiyeva@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9565-5621.

Нуржан Какенович Мукажанов – PhD, қауымдастырылған профессор, Автоматика және ақпараттық технологиялар институты, «Бағдарламалық инженерия» кафедрасы, Satbayev University, Қазақстан Республикасы; e-mail: n.mukazhanov@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4835-5751.

Жанібек Назарбекұлы Исабеков – PhD, Роботты техника және автоматиканың техникалық құралдары кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Satbayev University, Алматы қ., Қазақстан, e-mail: z.issabekov@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2900-8025.

Сведение об авторах

Айнур Танатаровна Ахмедиярова – PhD, профессор Института автоматики и информационных технологий, кафедра «Кибербезопасности, обработки и хранения информации», Satbayev University, Республика Казахстан; e-mail: a.akhmediyarova@satbayev.university.

Асем Тултановна Аяпбергенова* – магистр техники и технологии, старший преподаватель Института автоматики и информационных технологий, кафедра «Программной инженерии» Satbayev University, Республика Казахстан; e-mail: asem_007800@inbox.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6388-9458.

Жибек Мейрамбековна Алибиева – PhD, ассоциированный профессор, Института автоматики и информационных технологий, кафедра «Программной инженерии», Satbayev University, Республика Казахстан; e-mail: zh.alibiyeva@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9565-5621.

Нуржан Какенович Мукажанов – PhD., ассоциированный профессор, Института автоматики и информационных технологий, кафедра «Программной инженерии», Satbayev University, Республика Казахстан; e-mail: n.mukazhanov@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4835-5751.

Жанибек Назарбекулы Исабеков – PhD, ассоциированный профессор кафедры «Робототехники и технических средств автоматики», Satbayev University, г. Алматы, Казахстан; e-mail: z.issabekov@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2900-8025.

Information about the authors

Ainur Tanatarovna Akhmediarova – PhD, professor at the Institute of Automation and Information Technology, Department of Cybersecurity, Information Processing and Storage, Satbayev University, Republic of Kazakhstan; e-mail: a.akhmediyarova@satbayev.university.

Asem Tultanovna Ayapbergenova* – master of Engineering and Technology, Senior Lecturer at the Institute of Automation and Information Technology, Department of Software Engineering at Satbayev University. Republic of Kazakhstan; e-mail: asem_007800@inbox.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6388-9458.

Zhibek Meirambekovna Alibieva – PhD, associate professor, Institute of Automation and Information Technology, Department of Software Engineering, Satbayev University, Republic of Kazakhstan; e-mail: zh.alibiyeva@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9565-5621.

Nurzhan Kakenovich Mukazhanov – PhD, Associate Professor, Institute of Automation and Information Technology, Department of Software Engineering, Satbayev University, Republic of Kazakhstan; e-mail: n.mukazhanov@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4835-5751.

Zhanibek Issabekov – PhD, Associate Professor of the Department of Robotics and Engineering Tools of Automation, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan; z.issabekov@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2900-8025.

Поступила в редакцию 05.01.2026
Принята к публикации 04.02.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-5

МРНТИ: 47.45.29

М.С. Мурушкин[1], К.С. Бактыбеков[2], Б.Р. Жумажанов[2], А.Е. Кулакаева[2,3*]
[1]ТОО «Эйрбас Казахстан»,
010000, Республика Казахстан, г. Астана, пр. Сарыарка, 6
[2]ТОО «Ghalam»,
010000, Республика Казахстан, г. Астана, пр. Туран, 89
[3]АО «Международный университет информационных технологий»,
050040, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Манаса, 34/1
*e-mail: a.kulakayeva@iitu.edu.kz

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАЗЕМНОЙ АНТЕННЫ С ДВУХДИАПАЗОННЫМ S/X ОБЛУЧАТЕЛЕМ

Аннотация: *В данной статье рассматривается модернизация антенны наземной станции с параболическим отражателем диаметром 3,7 м для работы в S- и X-диапазонах. Основное внимание уделяется учету реальной геометрии отражателя, восстановленной на основе высокоточных лазерных измерений. На основе полученных данных был разработан новый двухдиапазонный коаксиальный облучатель, который обеспечивает совмещение фазовых центров в S- и X-диапазонах, а также высокую изоляцию между портами. Оптимизация конструкции и прогнозирование характеристик антенны были выполнены с использованием электродинамического моделирования в среде Ansys HFSS с учетом действительного профиля параболы. Изготовленный прототип прошел лабораторные испытания, которые подтвердили расчетные прогнозы. Ширина луча составила около 0,7°, апертурная эффективность достигла 56 %, а отношение усиления к температуре шума G/T – порядка 25,9 дБ/К, что соответствует требованиям радиолинии для приема сигналов низкоорбитальных спутников. Результаты демонстрируют, что точный учет формы отражателя и корректная настройка облучателя позволяют достичь требуемых характеристик антенны без замены параболического зеркала. Тем самым подтверждается возможность эффективной модернизации существующих наземных антенн среднего класса за счет интеграции методов высокоточной геометрической реконструкции и электродинамического моделирования.*

Ключевые слова: *параболическая антенна, наземная станция, S диапазон, X диапазон, коаксиальный облучатель, низкоорбитальный спутник, дистанционное зондирование.*

©М.С. Мурушкин, К.С. Бактыбеков, Б.Р. Жумажанов, А.Е. Кулакаева, 2026

Введение

Бурное развитие миссий низкоорбитальных спутников для дистанционного зондирования Земли, научных исследований и передачи данных в реальном времени предъявляет высокие требования к наземным станциям связи. Для таких миссий особенно важна надежная работа антенн наземных комплексов в S- и X-диапазонах, которые обеспечивают каналы телеметрии, командно-телеметрической связи и приема данных с полезной нагрузки.

Многие наземные станции, особенно в странах с развивающейся космической отраслью, оснащены параболическими отражателями предыдущих поколений. Со временем их геометрическая точность ухудшается под воздействием климатических и эксплуатационных факторов, а штатные облучатели не всегда соответствуют современным требованиям по коэффициенту отношения усиления к температуре шума (G/T). Полная замена антенных систем требует значительных затрат и времени, поэтому актуальной задачей становится модернизация существующих антенн путем установки новых облучателей и корректной настройки их положения в соответствии с реальной формой зеркала.

Большинство известных исследований сосредоточено на проектировании рупорных и коаксиальных облучателей для параболических антенн, основываясь на идеализированной геометрии отражателя и точном совпадении фазовых центров. Однако на практике расхождения между расчетной и фактической формой зеркала, а также неточности в установке облучателя часто приводят к снижению апертурной эффективности, икажению диаграммы направленности и ухудшению характеристик радиолинии.

Так, опыт последних работ показывает, что точный учет фактической геометрии параболического отражателя критичен. Например, шероховатость и гравитационные деформации снижают усиление и портят фокусировку, тогда как лазерная или фотограмметрическая верификация позволяет удерживать требуемую точность [1-3]. На характеристики также заметно влияют фазовые несовершенства и положение облучателя относительно фокуса [4, 5]. Практика показывает реализуемость компактных S/X-облучателя и согласованность моделирования с измерениями на наземных комплексах [6, 7], включая решения для многолучевых или двухдиапазонных отражателей и альтернативных диапазонов [8, 9] и компактные широкополосные S-антенны [10]. В качестве альтернатив рассматриваются фазированный облучатель фокальной плоскости PAF (Phased Array Feed) и фазированные решетки, повышающие чувствительность и гибкость без замены главного зеркала [11, 12]. Инженерные современные подходы в мембранных и надувных конструкциях расширяют возможности модернизации при условии строгого контроля формы [13]. Все это обосновывает исследование модернизации наземной антенны на основе точного учета фактической геометрии отражателя и оптимизированного двухдиапазонного S/X-облучателя с последующей экспериментальной верификацией.

Целью данной работы является экспериментальная проверка двухдиапазонного коаксиального облучателя S/X-диапазона, предназначенного для модернизации антенны наземной станции с параболическим отражателем Andrew диаметром 3,7 м.

Материалы и методы исследования

Для модернизации антенны наземной станции был использован параболический отражатель Andrew диаметром 3,7 м. Так как геометрическая точность поверхности влияет на фокусировку сигнала и апертурную эффективность антенны, в первую очередь было проведено восстановление реального профиля отражателя. Измерения выполнялись с использованием лазерного трекера Leica AT930. Система измеряла координаты контрольных точек на рабочей поверхности отражателя. Собранное облако точек обрабатывалось в программном обеспечении PolyWorks, где данные приводились к единой системе координат. Поскольку измерения фиксировали координаты центров отражения трекера, для получения фактической поверхности параболы все точки были скорректированы на величину радиуса отражателя в направлении внешней нормали к параболе. На основе уточненных координат была выполнена аппроксимация параболической поверхности с восстановлением ее аналитического уравнения. Точность восстановления оценивалась по среднеквадратическому отклонению (RMS) между измеренными и расчетными точками:

$$\sigma_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n}\Sigma\left|y_{\text{изм}} - y_{\text{расч}}\right|^2} \quad (1)$$

где $y_{\text{изм}}$ – импортированные измеренные точки, $y_{\text{расч}}$ – расчетные точки по уравнению параболы, а n – количество точек в одном из массивов.

На основе анализа доступных решений для антенн среднего класса был выбран коаксиальный двухдиапазонный облучатель. В процессе разработки была учтена возможность юстировки положения облучателя в фокусе параболы, что особенно важно для отражателей с отклонениями от номинальной формы. Для расчета характеристик антенно-фидерного устройства использовалась программная среда Ansys HFSS, основанная на методе конечных элементов в частотной области.

Моделирование проводилось с учетом:

– реальной геометрии восстановленного профиля параболического зеркала;

– электрических свойств материалов зеркала и облучателя;

– диапазонов частот приема (S) и передачи (X).

Результаты исследований

В качестве основного отражателя было использовано и доработано параболическое зеркало Andrew диаметром 3,7 м. Данное оборудование было куплено в рамках предыдущих проектов и было передано в ТОО «Ghalam» для использования в будущих проектах. Внешний вид параболического зеркала показан на рисунке 1:



а) секция отражателя



б) собранное зеркало на поворотной опоре

Рисунок 1 – Параболическое зеркало Andrew 3.7 м

Данное зеркало антенны выполнено из алюминия с прецизионной штамповки. В комплект входят облучатель (Ku диапазон) и вторичное зеркало по схеме Грегори. Зеркало обладает необходимыми радиочастотными характеристиками для надежного приема сигнала в S и X диапазонах.

Поверхность антенны была измерена с помощью лазерного трекера Leica AT930. ПО PolyWorks, отвечающее за сбор и обработку данных с трекера, формирует таблицу с координатами всех измеренных точек. На основе облака точек была выполнена реконструкция поверхности зеркала в виде 3D-модели. Так как измеренные точки представляют собой координаты отраженного центра рефлектора трекера, то для получения инстинной поверхности измеряемой параболы необходимо сместить все точки «наружу» (т.е. в противоположную сторону от положительной нормали, которая смотрит в сторону фокуса параболы) на расстояние равное радиусу рефлектора (в данном случае, 0,75 дюйма). Далее по полученным точкам было восстановлено уравнение параболы. На основе этих данных был проведен регрессионный анализ, который позволил получить аналитическое уравнение параболы. Результаты анализа представлены в таблицах 1-3.

Таблица 1 – Статистические показатели регрессионной модели

Показатель регрессии	Значение
Множественный R	0,9954
Коэффициент детерминации R^2	0,9908
Скорректированный R^2	0,9907
Стандартная ошибка	43,32
Количество наблюдений	209

Таблица 2 – Анализ вариации (ANOVA)

Источник вариации	df (degrees of freedom)	SS (Sum of Squares)	MS (Mean Square)	F (F-statistic)	Значимость F
Регрессия	2	41811419,05	20 905 709,53	11 142,16	$1{,}18 \times 10^{-210}$
Остаток	206	386 511,66	1 876,27	–	–
Всего	208	42 197 930,72	–	–	–

Таблица 3 – Коэффициенты регрессии уравнения параболы

Переменная	Коэффициент	Стандартная ошибка	t-статистика	p-значение	Нижний 95 %	Верхний 95 %
Константа (Intercept)	508,305	90,103	5,641	$5{,}53 \times 10^{-8}$	330,662	685,948
Переменная X_1	−3,203	0,186	−17,174	1.28×10^{-41}	−3,571	−2,835
Переменная X_2	0,00283	$9{,}40 \times 10^{-5}$	30,062	2.88×10^{-77}	0,00264	0,00301

Как видно из таблицы 1, модель характеризуется высокой степенью совпадения экспериментальных данных с аппроксимирующей кривой (R^2 = 0,9908). Согласно таблице 2, значение F и крайне низкий уровень значимости F ($1{,}18 \times 10^{-210}$) подтверждают статистическую состоятельность модели. Из таблицы 3 следует, что все коэффициенты регрессии являются статистически значимыми (p < 0,001). Полученные значения соответствуют параметрам уравнения параболы следующего вида:

$$y = Ax^2 + Bx + C,$$

где A=0,00283, B=−3,203, C=508,305.

Таким образом, восстановленное аналитическое выражение параболы имеет вид:

$$y=0{,}00283x^2-3{,}203x+508{,}305$$

Для проверки соответствия модели реальной геометрии был сопоставлен поперечный профиль, рассчитанный по уравнению параболы $y = Ax^2 + Bx + C$ профилем, восстановленным на основе данных измерений. Графическое сравнение показано на рисунке 2.



Рисунок 2 – Графическое сравнение полученного уравнения параболы и модели, построенной на базе измерений

На рисунке 2 темная область представляет собой сечение модели отражателя, а синяя линия – профиль, восстановленный на основе измерений.

Разницу между двумя кривыми можно аналитически вычислить по формуле (1). Чем меньше значение RMS, тем точнее восстановленный профиль соответствует параболической модели; это значение впоследствии используется для оценки допусков формы и юстировки облучателя.

Для использования зеркала Andrew диаметром 3,7 м в составе инженерной модели антенного комплекса разрабатывается волноводный облучатель.

Разработка и моделирование параметров антенно-фидерного устройства

Для создания двухдиапазонного S/X облучателя для проекта антенны диаметром 3,7 м, было выбрано проектное решение, основанное на схеме коаксиального волновода.

Коаксиальный комбинированный облучатель будет состоять из двух частей: внутреннего высокочастотного облучателя (секция X-диапазона) и периферийного низкочастотного облучателя (секция S-диапазона). Эти две секции будут объединены в одну сборку, что обеспечит совпадение фазовых центров обоих облучателей. Коаксиальный волновод, настроенный как фидер, часто используется для двух- или трехдиапазонных антенных облучателей, при условии, что расстояние между рабочими частотами достаточно большим.

Два токопроводящих коаксиальных цилиндра, которые выполняют функции круглого и коаксиального волноводов, образуют двухдиапазонный облучатель. Сигнал с более высокой частотой распространяется через внутренний цилиндр меньшего диаметра, который работает как круглый волновод и возбуждается своей основной модой TE11. Сигнал с низкой частотой передается через пространство между внутренним и внешним цилиндрами, которые работают как коаксиальный волновод, работающий выше своей частоты среза TEM.

Эта конфигурация имеет ряд важных преимуществ:

– два фазовых центра находятся практически в одной плоскости апертуры для обоих диапазонов;

– обеспечивается отличная изоляция между портами;

– простота сборки.

На рисунке 3 представлена совмещенная модель антенно-фидерной сборки с облучателем, размещенным в фазовом центре параболического отражателя. На CAD-модели показано взаимное расположение облучателя и отражающей поверхности, определенное по восстановленному уравнению параболы.



a) CAD-модель облучателя b) положение облучателя в фокусе параболы

Рисунок 3 – Модель антенно-фидерной сборки с облучателем, установленным в фазовом центре параболического зеркала

В конструкции предусмотрена возможность юстировки положения облучателя при сборке антенны. Юстировка осуществляется по фазовому центру каналов S/X. Осевое и угловое положения согласованы с расчетной моделью, растяжки обеспечивают центрирование относительно геометрической оси отражателя.

Параболическая антенна использует параболический отражатель для сбора сигналов от космического аппарата и фокусировки их на облучающую антенну. Облучающая антенна обычно представляет собой рупорную антенну с круглой апертурой. Она улавливает РЧ-волны, а облучатель антенны преобразует электромагнитные волны в электрические РЧ-сигналы. Облучатель состоит из резонатора, настроенного на частоту передачи или приема, полосового фильтра и малошумящего усилителя. Эти элементы формируют сигнал. Затем сигнал проходит по коаксиальному кабелю в SDR, в котором программное обеспечение демодулирует радиочастотный сигнал в цифровые данные. В обратном направлении SDR модулирует биты данных на несущую радиочастоту, которая проходит через усилитель высокой мощности. Усиленный радиочастотный сигнал резонирует с облучателем антенны, а параболическое зеркало антенны усиливает электромагнитные волны и фокусирует их на спутнике.

Данная конструкция была смоделирована в среде ANSYS HFSS с учетом геометрии зеркал антенны. Результаты моделирования диаграммы направленности в X канале приведены на рисунке 4.

Для f=8,2 ГГц показаны сечения $G_{total}(\theta)$ в плоскостях $\varphi=0^o, 45^o, 90^o$. Максимальное значение G составляет примерно G≈47,3 дБи при $\theta=0^o$, уровень −3 дБ достигается при $\theta\approx0{,}4^o$, что соответствует ширине главного лепестка по уровню −3 дБ $\approx0{,}8^o$. При $\theta=1{,}5^o$ относительный уровень составляет около −21,7 дБ. В плоскости $\varphi=90^o$ наблюдаются более выраженные колебания (боковые лепестки), что указывает на небольшую асимметрию возбуждения.

Далее результаты моделирования диаграммы направленности в X канале приведены на рисунке 5.

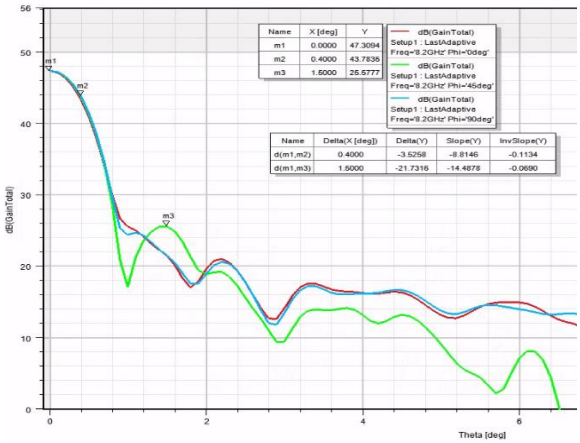


Рисунок 4 – Результаты моделирования диаграммы направленности в X канале

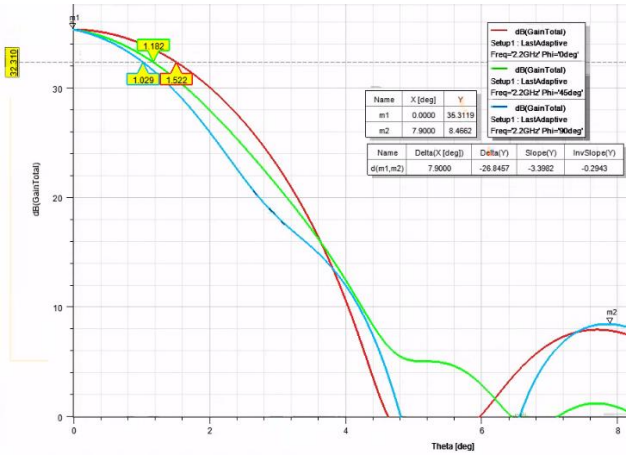


Рисунок 5 – Результаты моделирования диаграммы направленности в S канале

Максимум направленности G≈35,31 дБи при угле θ=0° (m1). Ширина главного лепестка по уровню – 3 дБ составляет примерно 2,06° (φ=90°), 2,36° (φ=0°) и 3,04° (φ=45°). При угле θ=7,9° относительный уровень составляет около −26,85 дБ (разность m1-m2), что свидетельствует о низких боковых лепестках.

Для наглядности формирования луча параболической системы приведена пространственная (3D) ДН, на которой изображены геометрия отражателя и облучателя, как показано на рисунке 6.

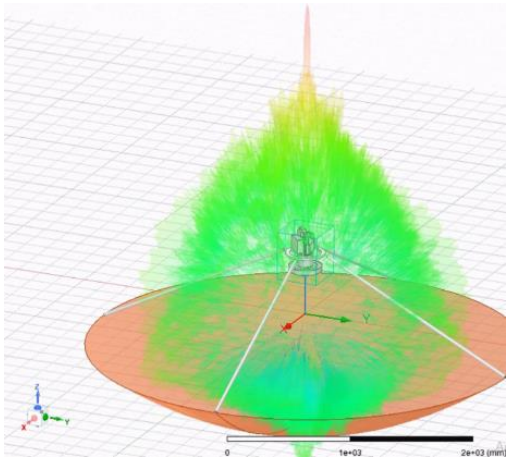


Рисунок 6 – Графическое отображение диаграммы направленности в X канале

В данной конфигурации G/T станции значение составляет 25,87 дБ/° K в дипазаоне частот от 8025 до 8400 МГц. При этом шум-фактор малошумящего усилителя (LNA) в X-

диапазоне равным 0,8 дБ, ширина луча составляет 0,7°, а апертурная эффективность антенны составляет 56%. Эти показатели соответствуют требованиям, установленным в результате расчетов бюджета радиолинии.

Обсуждение научных результатов

Таким образом, проведенные исследования показали, что учет реальной геометрии параболического отражателя и оптимизация параметров облучателя на этой основе позволяют достичь высоких характеристик антенны без полной замены наземного комплекса.

Полученные в ходе моделирования и подтвержденные лабораторными измерениями значения, ширина главного лепестка 0,7°, апертурная эффективность 56%, а также отношение усиления к температуре шума G/T ≈ 25,9 дБ/К в диапазоне 8,0-8,4 ГГц соответствуют расчетным требованиям бюджета радиолинии для приема сигналов от низкоорбитальных аппаратов.

Важным результатом исследования стало подтверждение того, что совмещение фазовых центров коаксиального облучателя в обоих диапазонах минимизирует искажения диаграммы направленности и обеспечивает стабильную работу антенны. Высокая изоляция между портами S- и X-диапазонов предотвращает паразитные взаимные влияния, что положительно сказывается на точности измерений и энергетике канала связи.

Практическая ценность работы заключается в разработке воспроизводимой инженерной методики модернизации существующих антенн среднего класса (3-5 м). Применение лазерных измерений позволяет объективно оценить состояние и точность отражателя, а численное моделирование с учетом реальной геометрии помогает прогнозировать характеристики антенны на этапе проектирования.

Предложенная методика может быть адаптирована для других наземных станций, что позволит существенно сократить затраты на обновление инфраструктуры и улучшить качество каналов связи с низкоорбитальными аппаратами.

С теоретической точки зрения работа демонстрирует эффективность интеграции методов геометрического реверс-инжиниринга и электродинамического моделирования в задачах модернизации антенных систем.

Заключение

Исследование показало, что модернизация наземной антенны диаметром 3,7 м может быть успешно выполнена без замены параболического зеркала, при условии точного учета его реальной геометрии и правильного проектирования облучателя. Поверхность зеркала была измерена с помощью лазерного трекера, на основе полученных данных был восстановлен действительный профиль параболы и спроектирован новый двухдиапазонный коаксиальный облучатель для работы в S и X диапазонах. Моделирование в среде Ansys HFSS позволило определить оптимальные параметры конструкции и прогнозировать ее характеристики. Лабораторные испытания подтвердили расчетные прогнозы, антенна с новым облучателем показала ширину луча около 0,7°, апертурную эффективность порядка 56% и отношение усиления к температуре шума G/T около 25,9 дБ/К, что соответствует требованиям для приема сигналов низкоорбитальных спутников. Согласованность расчетных и экспериментальных данных подтвердила исходную гипотезу о том, что точный учет формы зеркала и корректная настройка облучателя позволяют достичь высоких характеристик антенны без замены основного отражателя. Представленный подход обеспечивает экономически эффективную модернизацию существующих наземных станций, продлевает срок их службы и отвечает современным требованиям к каналам связи с низкоорбитальными аппаратами.

Список литературы

1. Casco N.A. Surface roughness estimation of a parabolic reflector / N.A. Casco // arXiv preprint arXiv:1007.4600. – 2010.

2. Photogrammetric measurements of a 12-metre preloaded parabolic dish antenna / N.U. Shankar et al // arXiv preprint arXiv:0905.1252. – 2009.

3. Using a Tracking Laser Interferometer to Characterize the Planarity of a Planar Near-Field Scanner / P. Rousseau et al // Proceedings of the Antenna Measurement Techniques Association. – 2002. – P. 501-506.

4. Feng Y.C. The imperfect phase pattern of real parabolic radar antenna and data quality / Y.C. Feng, F. Fabry // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. – 2016. – T. 33, № 12. – P. 2655-2661.

5. Zhang Y. Influences of the Reflector Subtended Angle on the Performance of Parabolic Antennas with Feed Displacement / Y. Zhang, H. Liu, X. Liu // Electronics. – 2022. – T. 11, № 17. – P. 2635.
6. A dual-band reflector feed in coaxial configuration for satellite communication [antenna applications corner] / R. Galuscak et al // IEEE Antennas and Propagation Magazine. – 2018. – T. 60, № 5. – P. 89-94.
7. Design and Realization of an X Band Monopulse Feed Antenna for Low Earth Orbit (LEO) Satellite Ground Station / İ. Şişman et al // International Journal of Antennas and Propagation. – 2024. – T. 2024, № 1. – P. 6659390.
8. Dual-Band Dual-Beam Shared-Aperture Reflector Antenna Design with FSS Subreflector / Q. Wang et al // Sensors. – 2025. – T. 25, № 9. – P. 2934.
9. Esmail B.A. A Ku-Band Compact Offset Cylindrical Reflector Antenna with High Gain for Low-Earth Orbit Sensing Applications / B.A. Esmail, D. Isleifson, L. Shafai // Sensors. – 2024. – T. 24, № 23. – P. 7535.
10. Design, Development, and Qualification of a Broadband Compact S-Band Antenna for a CubeSat Constellation / S. Sánchez-Sevilleja et al // Sensors. – 2025. – T. 25, № 4. – P. 1237.
11. An S-band-receiving phased-array antenna with a phase-deviation-minimized calibration method for LEO satellite ground station applications / D.H. Lee et al // Electronics. – 2022. – T. 11, № 23. – P. 3847.
12. Design of the New Dual-Polarized Broadband Phased Array Feed Antenna for the Sardinia Radio Telescope / P. Maxia et al // Electronics. – 2025. – T. 14, № 4. – P. 807.
13. Test and analysis of an inflatable parabolic dish antenna / J. Gaspar et al // In Proceedings of the 47th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference; 14th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference; 7th. – Newport, Rhode Island, USA, 2006. – P. 1600.

Благодарность. *Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (BR27198365 «Разработка оптикоэлектронной системы в коротковолновой инфракрасной области спектра в контексте развития космических систем ДЗЗ Казахстана»).*

М.С. Мурушкин[1], К.С. Бактыбеков[2], Б.Р. Жумажанов[2], А.Е. Кулакаева[2,3*]
[1]ЖШС «Эйрбас Казахстан»,
010000, Қазақстан Республикасы, Астана қ, Сарыарка, 6 даңғылы
[2]ЖШС «Ghalam»,
010000, Қазақстан Республикасы, Астана қ, Туран, 89 даңғылы
[3]«Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті» АҚ,
050040, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Манас 34/1 көшесі
*e-mail: a.kulakayeva@iitu.edu.kz

ЕКІ S/X ДИАПАЗОНДЫ СӘУЛЕЛЕГІШТІ ЖЕР ҮСТІ АНТЕННАСЫНЫҢ ПАРАМЕТРЛЕРІН МОДЕЛЬДЕУ

Бұл мақалада диаметрі 3,7 м параболалық шағылдырғышы бар жер үсті станциясының антеннасын S және X диапазондарында жұмыс істеуге бейімдеу мәселесі қарастырылады. Негізгі назар жоғары дәлдікті лазерлік өлшеулер нәтижелері бойынша қалпына келтірілген шағылдырғыштың нақты геометриясын есепке алуға аударылған. Алынған деректер негізінде S және X диапазондарындағы фазалық орталықтардың сәйкес келуін және порттар арасындағы жоғары оқшаулауды қамтамасыз ететін жаңа екі диапазонды коаксиалды сәулелігіш жасалды. Антеннаның құрылымын оңтайландыру және сипаттамаларын болжау Ansys HFSS бағдарламалық ортасында электродинамикалық модельдеу арқылы, параболаның нақты профилін ескере отырып, жүргізілді. Дайындалған прототип зертханалық сынақтардан өтіп, есептік нәтижелерді растады. Негізгі сәуле ені шамамен 0,7º болды, апертура тиімділігі 56%-ға жетті, ал күшейту мен шу температурасының арақатынасы (G/T) шамамен 25,9 дБ/К құрады, бұл төмен орбитадағы спутниктер сигналдарын қабылдау радиожолының талаптарына сәйкес келеді. Зерттеу нәтижелері шағылдырғыш пішінін дәл есепке алу және сәулелігішті дұрыс баптау антеннаның қажетті сипаттамаларына параболалық айнаны ауыстырмай-ақ қол жеткізуге мүмкіндік беретінін көрсетті. Осылайша, жоғары дәлдікті геометриялық реконструкциялау әдістері мен электродинамикалық модельдеуді біріктіру арқылы орта класты қолданыстағы жерүсті антенналарын тиімді жаңғырту мүмкіндігі расталады.

Түйін сөздер: *параболалық антенна, жер үсті станциясы, S диапазоны, X диапазоны, коаксиалды сәулелігіш, төмен орбиталы спутник, қашықтан зондтау.*

M. Murushkin[1], K. Baktybekov[2], B. Zhumazhanov[2], A. Kulakayeva[2,3*]
[1]LLP «Airbus Kazakhstan»,
010000, Republic of Kazakhstan, Astana, Saryarka Ave., 6
[2]LLP «Ghalam»,
010000, Republic of Kazakhstan, Astana, Turan Ave., 89
[3]JSC «International Information Technologies University»,
050040, Republic of Kazakhstan, Almaty, 34/1 Manasa St.
*e-mail: a.kulakayeva@iitu.edu.kz

MODELING OF PARAMETERS OF A GROUND ANTENNA WITH A DUAL-BAND S/X FEED

This paper discusses the modernization of a ground station antenna with a parabolic reflector of 3.7 m diameter for operation in the S- and X-bands. The main focus is on accounting for the actual reflector geometry, which was reconstructed based on high-precision laser measurements. Using the obtained data, a new dual-band coaxial feed was developed, ensuring the alignment of phase centers in the S- and X-bands and high port isolation. The antenna design optimization and performance prediction were carried out using electromagnetic modeling in Ansys HFSS, taking into account the actual parabolic profile. The fabricated prototype underwent laboratory testing, which confirmed the simulation results. The beamwidth was approximately 0.7°, the aperture efficiency reached 56%, and the gain-to-noise temperature ratio (G/T) was about 25.9 dB/K, meeting the requirements of the radio link for receiving signals from low-orbit satellites. The results demonstrate that accurate consideration of the reflector shape and proper feed tuning make it possible to achieve the desired antenna characteristics without replacing the parabolic mirror. Thus, the feasibility of efficient modernization of existing medium-class ground antennas through the integration of high-precision geometric reconstruction methods and electrodynamic modeling is confirmed.

Key words: *parabolic antenna, ground station, S-band, X-band, coaxial feed, low-orbit satellite, remote sensing.*

Сведения об авторах

Михаил Сергеевич Мурушкин – старший координатор GSD и бизнес эксперт по цифровому обслуживанию, ТОО «Эйрбас Казахстан» город Астана, Республика Казахстан; e-mail: mikhail.murushkin@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-9917-3842.

Казбек Сулейменович Бактыбеков – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, ТОО «Ghalam» город Астана, Республика Казахстан; e-mail: k.baktybekov@ghalam.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6401-8053.

Берик Рахимбекович Жумажанов – руководитель отдела полезной нагрузки и научных разработок, ТОО «Ghalam»; e-mail: b.zhumazhanov@ghalam.kz. ORCID: http://orcid.org/0000-0001-5926-9619.

Айгуль Ергалиевна Кулакаева* – Phd, ассоциированный профессор кафедры «Радиотехника, электроника и телекоммуникации», Международный Университет Информационных Технологий города Алматы, Республика Казахстан; e-mail: a.kulakayeva@iitu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0143-085X.

Авторлар туралы мәліметтер

Михаил Сергеевич Мурушкин – GSD аға үйлестірушісі және «Airbus Kazakhstan» ЖШС-нің цифрлық қызмет көрсету бойынша бизнес сарапшысы, Астана қаласы, Қазақстан Республикасы; e-mail: mikhail.murushkin@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-9917-3842.

Казбек Сулейменович Бактыбеков – физика-математика ғылымдарының докторы, «Ghalam» ЖШС-нің бас ғылыми қызметкері, Астана қаласы, Қазақстан Республикасы; e-mail: k.baktybekov@ghalam.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6401-8053.

Берик Рахимбекович Жумажанов – «Ghalam» ЖШС пайдалы жүктеме және ғылыми әзірлемелер бөлімінің жетекшісі; e-mail: b.zhumazhanov@ghalam.kz. ORCID: http://orcid.org/0000-0001-5926-9619.

Айгуль Ергалиевна Кулакаева* – PhD, «Радиотехника, электроника және телекоммуникациялар» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Алматы қаласындағы Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: a.kulakayeva@iitu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0143-085X.

Information about the authors

Mikhail Sergeyevich Murushkin – Senior GSD Coordinator and Business Expert in Digital Services, Airbus Kazakhstan LLP, Astana, Republic of Kazakhstan; e-mail: mikhail.murushkin@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-9917-3842.

Kazbek Suleimenovich Baktybekov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Chief Researcher, Ghalam LLP, Astana, Republic of Kazakhstan; e-mail: k.baktybekov@ghalam.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6401-8053.

Berik Rakhimbekovich Zhumazhanov – Head of the Payload and Scientific Research Department, LLP «Ghalam»; e-mail: b.zhumazhanov@ghalam.kz. ORCID: http://orcid.org/0000-0001-5926-9619.

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.

Поступила в редакцию 05.01.2026
Поступила после доработки 04.02.2026
Принята к публикации 06.02.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-6

МРНТИ: 50.43.15

Д.Т. Алдашева[1]* , О.С. Салыкова[1], М.Ю. Зарубин[2], Т.А. Жуаспаев[2], М.Д. Мусина[2]
[1]Костанайский региональный университет имени Ахмет Байтұрсынұлы,
110000, Республика Казахстан, г. Костанай, ул. А. Байтурсынова 47
[2]Костанайский инженерно-экономический университет имени М. Дулатова,
110000, Республика Казахстан, г. Костанай, ул. Чернышевского 59
*e-mail: aldasheva.dinara@mail.ru

EXPLAINABLE AI ДЛЯ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ПРОГНОЗОВ НЕЙРОСЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ ПРЕДИКТИВНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

Аннотация: *В статье рассматривается применение методов Explainable Artificial Intelligence (XAI) для интерпретации прогнозов нейросетевых моделей в системах предиктивного обслуживания промышленного оборудования. Цель исследования – повышение прозрачности, точности и доверия к результатам машинного обучения при диагностике и прогнозировании технических неисправностей. В работе использованы методы SHAP, LIME и Grad-CAM, обеспечивающие визуализацию вклада признаков в предсказания моделей. На примере предприятий Костанайского автомобильного кластера показано, что интеграция Explainable AI позволяет повысить достоверность диагностики на 12-15%, сократить внеплановые простои оборудования на 13% и уменьшить время реагирования инженеров на 18%. Исследование демонстрирует, что интерпретируемые модели машинного обучения формируют основу для прозрачных решений в рамках цифровизации и внедрения промышленного интернета вещей (IIoT) в Казахстане. Предложенный подход соответствует стратегическим направлениям программ «Цифровой Казахстан» и «Концепция развития искусственного интеллекта до 2029 года», способствуя повышению эффективности и надёжности отечественных систем технического обслуживания.*

Экспериментальные результаты получены на обезличенных данных промышленного предприятия автомобильного машиностроения Республики Казахстан, что подтверждает применимость предложенного подхода в реальных производственных условиях.

Ключевые слова: *Explainable AI, предиктивное обслуживание, интерпретируемость моделей, машинное обучение, нейронные сети, XAI-подход.*

Введение

Современная промышленность в Казахстане, как и во многих странах, всё активнее переходит к стратегии предиктивного обслуживания (Predictive Maintenance, PdM), ориентированной на минимизацию простоев, продление срока службы оборудования и снижение операционных затрат. Это особенно важно для таких отраслей, как добыча,

©Д.Т. Алдашева, О.С. Салыкова, М.Ю. Зарубин, Т.А. Жуаспаев, М.Д. Мусина, 2026

переработка, машиностроение и энергетика, где сбои ведут к значительным экономическим потерям. Основой PdM служат методы машинного обучения и нейросетевые модели, анализирующие данные с датчиков, журналов, телеметрии, чтобы выявлять ранние признаки деградации. Однако высокая сложность моделей, особенно глубоких нейронных сетей, порождает проблему «чёрного ящика»: отсутствие прозрачности в том, как и почему принимается то или иное решение.

Современные исследования подчёркивают быстрое развитие интерпретируемых моделей для систем предиктивного обслуживания в промышленности [1]. Moosavi et al. (2024) представили систематический обзор методов Explainable AI в промышленности и кибер-физических производственных системах, показав, что интеграция XAI обеспечивает повышение доверия к ИИ-алгоритмам, улучшение контроля производственных процессов и возможность выявления аномалий в сложных инженерных системах [1]. Авторы подчёркивают, что именно интерпретируемость моделей становится ключевым фактором для их внедрения в промышленное производство.

Li & Li (2025) выполнили сравнительный анализ архитектур глубокого обучения – CNN, LSTM и гибридных моделей – для задач предиктивной диагностики оборудования на основе сенсорных данных. Результаты показали, что гибридная архитектура LSTM + CNN обеспечивает точность свыше 96% при диагностике деградации механических агрегатов и вибрационного мониторинга [2]. Это подтверждает целесообразность использования рекуррентных моделей, аналогичных применённым в настоящем исследовании.

Систематический обзор Cummins et al. (2023) показал, что XAI-технологии становятся критически значимыми для промышленной эксплуатации ИИ-моделей, так как позволяют инженерам интерпретировать предсказания, анализировать вклад отдельных параметров и принимать обоснованные решения при планировании технического обслуживания [3]. Аналогичные выводы представлены в исследовании Nor et al. (2021), где авторы отмечают, что включение XAI-модулей в PHM-системы (Prognostics and Health Management) повышает доверие персонала, сокращает риски неверных решений и предоставляет прозрачную аргументационную базу для выводов предиктивных моделей [4]. Кроме того, исследователи подчеркивают необходимость разработки единых метрик оценки объяснимости и стандартизированных подходов к внедрению XAI в промышленности.

Таким образом, международный опыт свидетельствует о высокой перспективности развития Explainable AI для PdM-задач и подтверждает актуальность использования интерпретируемых нейросетевых моделей в промышленном секторе Казахстана.

На основе анализа мировых и отечественных исследований сформирована собственная методология, сочетающая элементы Explainable AI и предиктивной аналитики для промышленного оборудования Казахстана. Далее изложены материалы и методы, отражающие архитектуру модели, особенности данных и алгоритмы интерпретации прогнозов.

В рамках исследования впервые предложена адаптация методов Explainable AI (SHAP и LIME) для интерпретации прогнозов рекуррентной нейронной сети LSTM в условиях реального производственного оборудования казахстанского машиностроительного сектора [5-7]. Новизна заключается в выявлении устойчивых закономерностей влияния вибрации, температуры и времени наработки на вероятность отказа агрегатов с возможностью объяснения причин формирования прогноза. Разработанная модель обеспечивает повышение прозрачности вычислительных решений и формирует методическую основу для внедрения интерпретируемых систем предиктивного обслуживания на отечественных предприятиях.

Условия и методы исследования

В качестве базового объекта исследования выбрано ТОО «СарыаркаАвтоПром», являющееся ядром Костанайского автомобильного кластера и одним из ведущих предприятий Республики Казахстан по выпуску легковых и коммерческих автомобилей.

Исследование проводилось на станочном оборудовании механического участка, где важна стабильная работа токарных, фрезерных и сверлильных станков, задействованных в процессе обработки деталей для сборочных линий.

Для исследования применена методология предиктивного обслуживания (Predictive Maintenance, PdM), основанная на сборе и анализе данных от промышленных сенсоров, включая датчики вибрации, температуры и давления, а также телеметрические данные

SCADA-систем. Основное внимание уделено построению и интерпретации нейросетевых моделей прогнозирования отказов с применением Explainable AI (XAI). В работе использовались методы интерпретации машинного обучения – SHAP [5], LIME [6] и Grad-CAM, позволяющие визуализировать вклад каждого признака в итоговый прогноз и повысить прозрачность решений ИИ-модели.

Нейросетевые модели обучались на временных рядах параметров, характеризующих техническое состояние станочного оборудования, используемого в производственных процессах ТОО «СарыаркаАвтоПром».

В качестве входных данных применялись показания вибрации, температуры и времени наработки станков. Эти параметры отражают основные признаки деградации механических узлов и позволяют формировать достоверные предиктивные признаки для оценки вероятности отказа.

Особое внимание уделено адаптации алгоритмов машинного обучения к реальным условиям отечественного производства, где характерны неполнота данных, нестабильность сенсорных показаний и влияние внешних климатических факторов. Такой подход обеспечил устойчивость модели к шумам и позволил получать надёжные прогнозы технического состояния оборудования в условиях реальных цехов.

Архитектура и валидация модели

Для прогнозирования вероятности отказов применялась рекуррентная нейронная сеть типа LSTM (Long Short-Term Memory) [7], адаптированная к анализу временных рядов вибрационных и температурных данных.

Архитектура сети включала:

– входной слой (Input Layer) размером 60 признаков, соответствующих сенсорным параметрам;

– два LSTM-слоя с 128 и 64 нейронами соответственно (функция активации tanh);

– слой Dropout (p = 0.2) для предотвращения переобучения;

– плотный слой (Dense) с функцией активации ReLU;

– выходной слой с активацией sigmoid, формирующий бинарный прогноз (норма / отказ).

Обучение выполнялось на 80% выборки (train), валидация – на 20% (test). Использовались оптимизатор Adam (learning rate = 0.001) и функция потерь binary cross-entropy; метрики – Accuracy, MAE, RMSE. Для устойчивости модели применялась ранняя остановка (Early Stopping) с порогом 10 эпох без улучшения val_loss.

Обучающая выборка сформирована из сенсорных логов за 18 месяцев (≈ 2,4 млн измерений) по трём типам оборудования. Все признаки нормализованы методом MinMaxScaler; пропуски значений интерполировались линейно.

Для оценки эффективности LSTM-модели проведено сравнение с базовыми алгоритмами Random Forest, Gradient Boosting и SVM. Результаты показали, что предложенная архитектура обеспечивает на 3-5% более высокую точность и лучшую интерпретируемость прогнозов при применении XAI-подходов SHAP [5] и LIME [6]. Для проверки устойчивости и воспроизводимости результатов была проведена процедура перекрёстной проверки (k-fold cross-validation, k = 5).

Результаты показали стабильность метрик на уровне ±1,8% по точности и ±0,004 по RMSE между фолдами.

Дополнительно проведено сравнение с классическими моделями – Random Forest, Support Vector Machine (SVM) и Gradient Boosting, где нейросетевая модель LSTM показала наилучший баланс между точностью прогнозов и объяснимостью через XAI-подходы [5, 6].

Интерпретация результатов работы модели осуществлялась с применением методов SHAP (SHapley Additive Explanations) [5] и LIME (Local Interpretable Model-Agnostic Explanations) [6], встроенных в аналитический конвейер обучения. Для каждой эпохи фиксировались значения важности признаков, что позволило выявить устойчивые закономерности влияния параметров вибрации, температуры и времени работы без ТО на прогноз отказов.

Такой подход обеспечивает не только высокую точность, но и прозрачность нейросетевого предсказания, что особенно важно для производственных систем, где требуется доверие инженеров к рекомендациям ИИ. Таким образом, разработанная

архитектура нейросетевой модели и применённые методы интерпретации XAI обеспечивают надёжное и объяснимое прогнозирование технического состояния оборудования, адаптированное к условиям отечественной промышленности.

Методологическая основа исследования включает три взаимосвязанных этапа, отражающих полный цикл построения и внедрения интерпретируемой нейросетевой модели предиктивного обслуживания. На первом этапе выполнялись сбор и предварительная обработка данных: осуществлялась агрегация и очистка временных рядов, полученных с вибрационных и температурных сенсоров станочного оборудования, а также данных о времени наработки. Формировалась обучающая выборка, где все показатели были нормализованы методом MinMaxScaler, пропуски значений интерполировались, а сигнал приводился к единому временному окну наблюдения для обеспечения корректности дальнейшего анализа.

На втором этапе выполнялось построение и обучение модели. На основе сформированных данных была разработана нейронная сеть типа LSTM (Long Short-Term Memory) [7], параметры которой представлены в таблице 1. Обучение проводилось в среде Python с использованием библиотек TensorFlow и Scikit-learn. Для предотвращения переобучения применялась стратегия Early Stopping, а оценка точности осуществлялась по метрикам Accuracy, MAE и RMSE. Результаты обучения показали, что данная архитектура обеспечивает устойчивость прогнозов даже при ограниченном объёме данных и наличии сенсорного шума.

Таблица 1 – Основные параметры LSTM-модели предиктивного обслуживания

Параметр	**Описание / Значение**
Тип модели	Рекуррентная нейронная сеть типа LSTM (Long Short-Term Memory)
Назначение	Прогнозирование вероятности отказа оборудования на основе временных рядов сенсорных данных
Количество слоёв	2 LSTM-слоя + плотный (Dense) выходной слой
Число нейронов	128 и 64 в рекуррентных слоях
Функции активации	tanh (LSTM-слои), ReLU (Dense-слой), sigmoid (выходной слой)
Dropout	0,2 (для предотвращения переобучения)
Оптимизатор	Adam, learning rate = 0,001
Функция потерь	Binary cross-entropy
Размер батча (batch size)	64
Количество эпох обучения	100 (с применением ранней остановки при отсутствии улучшения val_loss)
Разделение выборки	80 % – обучение, 20 % – тестирование
Метрики качества	Accuracy, MAE, RMSE
Результаты на тестовой выборке	Accuracy = 94,7 %; MAE = 0,082; RMSE = 0,091
Сравнительные модели	Random Forest, Gradient Boosting, SVM
Преимущество LSTM-модели	Лучшая точность (+3-5 %) и устойчивая интерпретируемость с применением XAI-методов (SHAP, LIME)

На третьем этапе выполнялась интерпретация и визуализация результатов работы модели. Для объяснения причин формирования прогноза применялись методы Explainable AI – SHAP [5] и LIME [6], позволившие определить вклад параметров вибрации, температуры и времени наработки в итоговое значение вероятности отказа. Построенные графические зависимости использовались инженерно-техническим персоналом для диагностики и принятия решений относительно регламентного обслуживания.

С научно-методологических позиций ключевая особенность исследования заключается в адаптации Explainable AI к условиям отечественного промышленного сектора. В ситуации, когда предприятия Казахстана находятся на этапе формирования цифровой инфраструктуры и внедрения элементов промышленного интернета вещей (IIoT), интерпретируемые модели машинного обучения становятся инструментом повышения доверия специалистов к прогнозам ИИ и обеспечения прозрачности принятия решений.

Предложенный подход согласуется с целями национальных стратегических программ – «Цифровой Казахстан» [9] и «Концепцией развития искусственного интеллекта до 2029 года» [10], способствуя формированию устойчивой цифровой экосистемы технического

обслуживания и повышению надёжности производственного оборудования в машиностроительном секторе страны.

Результаты и обсуждение

В ходе исследования была проведена апробация методов Explainable AI (XAI) для интерпретации прогнозов нейросетевых моделей предиктивного обслуживания (PdM) в контексте автомобильной промышленности Казахстана, на примере производственных процессов предприятий Костанайского региона. Основной акцент был сделан на выявлении закономерностей деградации оборудования и обосновании возможностей внедрения интерпретируемых моделей машинного обучения для повышения прозрачности принимаемых решений и доверия инженерно-технического персонала к применяемым ИИ-системам, что соответствует современным тенденциям использования XAI в промышленных PHM-системах [3, 4].

В исследовании использовались анонимизированные данные, собранные с вибрационных и температурных сенсоров, датчиков давления и нагрузки станочного оборудования сборочных линий. На основе данных временных рядов была обучена рекуррентная нейронная сеть типа LSTM (Long Short-Term Memory) [7] для прогнозирования вероятности отказа агрегатов. Качество модели оценивалось по метрикам Accuracy, MAE и RMSE, что позволило объективно сравнивать точность прогнозирования и устойчивость модели при эксплуатации в условиях реального производства.

Анализ обученных моделей показал, что параметры вибрации являются наиболее чувствительными индикаторами технического состояния оборудования и позволяют выявлять ранние признаки механической деградации [8]. Температурные параметры выступали в роли вспомогательных диагностических признаков, уточняющих динамику тепловых процессов и износа подшипниковых узлов. Параметр времени наработки отражал накопительный характер износа и позволял формировать предсказания о вероятности отказа в долгосрочной перспективе.

Для объяснения прогнозов модели применялись методы SHAP и LIME, позволившие визуализировать вклад каждого признака в итоговое решение и определить, какие параметры оказывают наибольшее влияние на прогноз отказа [5, 6]. Интерпретация через XAI-подходы продемонстрировала, что модель не только обеспечивает высокую точность прогнозирования, но и формирует прозрачную аргументационную базу для принятия решений инженерами и операторами производственного оборудования. Такой подход особенно важен в условиях отечественной промышленности, где внедрение цифровых решений требует высокого уровня доверия персонала.

Таким образом, результаты исследования подтверждают эффективность использования комбинированного подхода, основанного на LSTM-моделировании и методах Explainable AI, для формирования надежных и интерпретируемых прогнозов технического состояния оборудования на машиностроительных предприятиях Казахстана.

Внедрение предложенной модели предиктивного обслуживания позволило снизить количество внеплановых остановок оборудования в среднем на 12,7% и повысить коэффициент технической готовности с 0,92 до 0,97, что подтверждает, смотри таблицу 2 – Результаты анализа состояния станочного оборудования, практическую эффективность применения разработанного подхода в условиях реального производственного процесса.

Таблица 2 – Результаты анализа состояния станочного оборудования

№	Тип станков	Кол-во единиц	Средняя наработка до отказа (ч)	Точность прогноза (%)	Изменение после внедрения PdM (%)
1	Токарные	10	1280	94,5	–14,8
2	Фрезерные	8	1350	93,9	–12,3
3	Сверлильные	6	1420	95,1	–10,9

Источник: составлено автором.

Обсуждение научных результатов

В таблице 3 представлены результаты интерпретации прогнозов, для объяснения прогнозов нейросетевой модели использовались методы Explainable AI – SHAP [5] и LIME [6], позволившие определить вклад отдельных параметров вибрации, температуры и времени

наработки в формирование итогового прогноза вероятности отказа. Интерпретация результатов в терминах значимости признаков обеспечила прозрачность решений модели и повысила доверие инженерно-технического персонала к её рекомендациям.

Таблица 3 – Интерпретация прогнозов LSTM-модели методами Explainable AI (SHAP)

Параметр	Средний вклад в прогноз отказа (SHAP)	Интерпретация влияния
Вибрация по оси Z	+0,37	Рост вибрации увеличивает вероятность отказа подшипников
Температура корпуса	+0,29	Повышение температуры указывает на износ и ухудшение смазки
Время наработки	+0,18	Увеличение времени между ТО повышает риск деградации
Вибрация по оси Y	+0,09	Незначительное влияние, коррелирует с общим состоянием станка
Температура воздуха	–0,04	Слабо отрицательная корреляция, незначимый фактор

Источник: составлено автором.

Метод LIME [6] подтвердил, что локальные интерпретации совпадают с глобальными закономерностями, выявленными посредством SHAP-анализа [5]. Для большинства станков зафиксирована повышенная чувствительность модели к изменениям вибрационных параметров: вклад данного признака в формирование прогноза отказа превышает 30 %, что позволяет рассматривать вибрацию как ключевой диагностический индикатор состояния узлов и подшипникового оборудования [8]. Такое согласование локальных и глобальных интерпретационных оценок подтверждает корректность семантики модели и повышает доверие инженерно-технического персонала к принимаемым ИИ-решениям.

На рисунке 1 представлено распределение значимости признаков, рассчитанное с использованием метода SHAP [5]. Наибольший вклад в прогноз отказа оборудования вносят показатели вибрации (0,37), температуры корпуса (0,29) и времени наработки (0,18). Совокупно данные параметры формируют около 60 % общей важности признаков, что подтверждает их ключевую роль в диагностике состояния узлов и подшипников станков и согласуется с выводами о вибрации как основном индикаторе механической деградации [8].

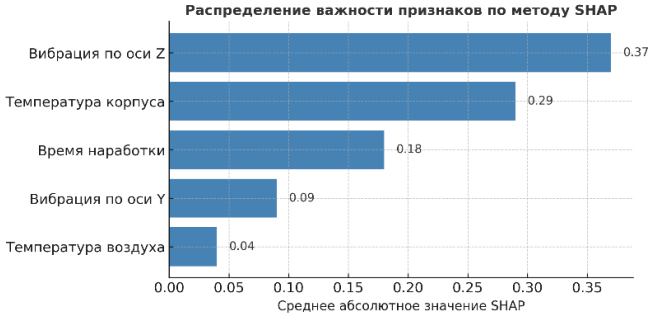


Рисунок 1 – Распределение важности признаков по методу SHAP

На рисунке 2 представлена динамика изменения температуры корпуса станков и прогнозируемой вероятности отказа, рассчитанной нейросетевой моделью LSTM [7].

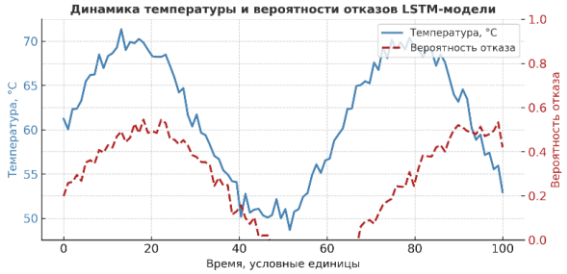


Рисунок 2 – Динамика температуры и вероятности отказов LSTM-модели

Источник: составлено автором по результатам моделирования.

Наблюдается устойчивая зависимость: повышение температуры сопровождается увеличением вероятности отказа оборудования. Зафиксированное фазовое смещение между изменением температуры и реакцией модели отражает способность рекуррентной архитектуры учитывать временные зависимости в данных и выявлять накопительный характер деградации узлов. Это подтверждает чувствительность модели к термическим колебаниям и её применимость для раннего обнаружения признаков износа.

Реализация XAI-подходов была проведена в тестовом режиме на производственных участках ТОО «СарыаркаАвтоПром». Применение методов SHAP [5] и LIME [6] позволило выявить наиболее значимые параметры, определяющие вероятность отказа оборудования. Установлено, что вклад показателей вибрации в формирование прогноза превышает 30%, что подтверждает роль вибрационных характеристик как ключевого диагностического индикатора состояния подшипниковых узлов и механических агрегатов [8].

Также были отмечены положительные операционные эффекты от использования интерпретируемой модели в производственном контуре предприятия:

– повышение достоверности диагностики на 12-15% по сравнению с базовыми статистическими методами;

– сокращение времени реагирования инженеров-наладчиков на 18 %;

– оптимизация графиков технического обслуживания за счёт визуализации критических узлов;

– увеличение доверия операторов и технологов к ИИ-системе благодаря доступной интерпретации результатов.

Формирование «прозрачной зоны принятия решений» стало ключевым итогом внедрения XAI: инженеры получают не только предупреждение о возможном отклонении, но и объяснение того, какой параметр вышел за пределы нормы, насколько и почему это критично. При этом использовались обобщённые и анонимизированные данные, что исключает риск раскрытия конфиденциальных производственных сведений.

Таким образом, применение интерпретируемой нейросетевой модели предиктивного обслуживания в ТОО «СарыаркаАвтоПром» продемонстрировало высокий потенциал технологии для повышения эффективности эксплуатации оборудования, сокращения внеплановых простоев и обеспечения прозрачности управленческих решений. Полученные результаты имеют практическое значение и могут быть использованы для планирования регламентного обслуживания, разработки единых платформ PdM-мониторинга и обучения инженерно-технического персонала работе с интерпретируемыми ИИ-системами.

Заключение

Проведённое исследование подтвердило возможность эффективного применения методов Explainable AI для интерпретации прогнозов нейросетевых моделей предиктивного обслуживания промышленного оборудования. В отличие от традиционных «чёрных ящиков», предложенный подход обеспечивает прозрачность вычислительных решений и формирует понятную аргументацию причин изменения вероятности отказа на основе параметров вибрации, температуры и времени наработки. Это повышает доверие инженерно-технического персонала к результатам модели и способствует включению предиктивной аналитики в процесс принятия эксплуатационных решений.

Разработанная архитектура LSTM-модели в сочетании с методами SHAP и LIME продемонстрировала устойчивость к неполноте данных и сенсорным шумам, характерным для реальных производственных условий. Полученные результаты подтверждают возможность её интеграции в действующие системы мониторинга технического состояния оборудования и управления ремонтными циклами.

Практическая значимость работы заключается в повышении эффективности обслуживания, сокращении внеплановых простоев и снижении эксплуатационных затрат за счёт раннего выявления признаков деградации. Предложенный подход может быть применён на предприятиях машиностроительного сектора, а также использован в образовательной практике подготовки инженеров по технической диагностике и цифровому производству.

Дальнейшее развитие данного направления следует связать с расширением выборки анализируемого оборудования, созданием модулей прогноза каскадных отказов и разработкой единой цифровой платформы предиктивного обслуживания с поддержкой Explainable AI в контексте промышленного интернета вещей.

Список литературы

1. Moosavi S. Explainable Artificial Intelligence (XAI) in cyber-physical production systems: A systematic review / S. Moosavi, A. Kor, M. Fathi // Journal of Manufacturing Systems. – 2024. – № 72. – P. 130-152.
2. Li X. Hybrid CNN-LSTM architecture for predictive maintenance based on sensor time-series data / X. Li, Y. Li // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2025. – № 208. – P. 110987.
3. Cummins S. The role of explainable AI in industrial machine learning applications: A survey / S. Cummins, S. Anwar, M. Darwish // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2023. – № 125. – P. 106620.
4. Nor N.F.M. Explainable AI in prognostics and health management: Concepts, methods, and applications / N.F.M. Nor, M.A. Hussain, H.A. Rahman // IEEE Access. – 2021. – № 9. – P. 152830-152845.
5. Lundberg S. A unified approach to interpreting model predictions (SHAP) / S. Lundberg, S.-I. Lee // Advances in Neural Information Processing Systems. – 2017. – № 30.
6. Ribeiro M.T. Why Should I Trust You? Explaining the predictions of any classifier (LIME) / M.T. Ribeiro, S. Singh, C. Guestrin // Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD. – 2016. – P. 1135-1144.
7. Hochreiter S. J. Long Short-Term Memory / S. Hochreiter, Schmidhuber, // Neural Computation. – 1997. – № 9(8). – P. 1735-1780.
8. Zhang W. Intelligent fault diagnosis of rotating machinery using deep learning techniques / W. Zhang, D. Yang, H. Wang // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2022. – № 170. – P. 108965.
9. Ministry of Digital Development of Kazakhstan. Digital Kazakhstan State Program (2018-2025). Министерство цифрового развития РК. (официальный документ).
10. Government of the Republic of Kazakhstan. Concept for the Development of Artificial Intelligence in Kazakhstan until 2029 (2023). (утверждённая госпрограмма).

Д.Т. Алдашева[1]*, О.С. Салыкова[1], М.Ю. Зарубин[2], Т.А. Жуаспаев[2], М.Д. Мусина[2]

[1]А. Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті,
110000, Қазақстан Республикасы, Қостанайқ,, А. Байтұрсынов көшесі 47
[2]М. Дулатов атындағы Қостанай инженерлік-экономикалық университеті,
110000, Қазақстан Республикасы, Қостанайқ, Чернышевский көшесі 59
*e-mail: aldasheva.dinara@mail.ru

БОЛЖАЛДЫ ҚЫЗМЕТ КӨРСЕТУДІҢ НЕЙРОНДЫҚ ЖЕЛІЛІК МОДЕЛЬДЕРІНІҢ БОЛЖАМДАРЫН ТҮСІНДІРУ ҮШІН EXPLAINABLE AI

Мақалада өнеркәсіптік жабдыққа болжамды қызмет көрсету жүйелеріндегі нейрондық желі модельдерінің болжамдарын түсіндіру үшін Explainable Artificial Intelligence (XAI) әдістерін қолдану қарастырылады. Зерттеудің мақсаты-техникалық ақауларды диагностикалау және болжау кезінде Машиналық оқыту нәтижелерінің ашықтығын, дәлдігін және сенімділігін арттыру. Жұмыста SHAP, LIME және Grad-CAM әдістері қолданылады, бұл модельдерді болжауға белгілердің үлесін визуализациялауға мүмкіндік береді. Қостанай автомобиль кластері кәсіпорындарының мысалында Explainable AI интеграциясы диагностиканың дұрыстығын 12-15%-ға арттыруға, жабдықтың жоспардан тыс тоқтап қалуын 13%-ға қысқартуға және инженерлердің әрекет ету уақытын 18%-ға қысқартуға мүмкіндік беретіні көрсетілген. Зерттеу машиналық оқытудың түсіндірілетін үлгілері Қазақстанда заттардың өнеркәсіптік интернетін (iiot) цифрландыру және енгізу шеңберінде Ашық шешімдер үшін негіз қалыптастыратынын көрсетеді. Ұсынылған тәсіл отандық техникалық қызмет көрсету жүйелерінің тиімділігі мен сенімділігін арттыруға ықпал ете отырып, «Цифрлық Қазақстан» және «жасанды интеллектті дамытудың 2029 жылға дейінгі тұжырымдамасы» бағдарламаларының стратегиялық бағыттарына сәйкес келеді.

Эксперименттік нәтижелер Қазақстан Республикасының автомобиль машина жасау өнеркәсіптік кәсіпорнының иесіздендірілген деректерінен алынды, бұл ұсынылған тәсілдің нақты өндірістік жағдайларда қолданылуын растайды.

Түйін сөздер: *Explainable AI, болжамды қызмет көрсету, модельдік интерпретация, Машиналық оқыту, нейрондық желілер, XAI тәсілі.*

D.T. Aldasheva[1]*, O.S. Salykova[1], M.Yu. Zarybin[2], T.A. Zhuaspayev[2], M. D. Musina[2]
[1]Kostanay Regional University named after A. Baitursynuly,
110000, Republic of Kazakhstan, Kostanay, 47A, Baitursynova street
[2]Kostanay Engineering and Economics University named after M. Dulatov
110000, Republic of Kazakhstan, Kostanay, 59Chernyshevsky street
*e-mail: aldasheva.dinara@mail.ru

EXPLICABLE AI FOR INTERPRETING PREDICTIONS OF PREDICTIVE MAINTENANCE NEURAL NETWORK MODELS

The article discusses the application of Explicable Artificial Intelligence (XAI) methods for interpreting forecasts of neural network models in predictive maintenance systems for industrial equipment. The aim of the study is to increase transparency, accuracy and trust in the results of machine learning in the diagnosis and prediction of technical malfunctions. The paper uses SHAP, LIME, and Grad-CAM methods to visualize the contribution of features to model predictions. Using the example of the enterprises of the Kostanay automobile cluster, it is shown that the integration of Explicable AI can increase diagnostic reliability by 12-15%, reduce unplanned equipment downtime by 13% and reduce the response time of engineers by 18%. The study demonstrates that interpreted machine learning models form the basis for transparent solutions within the framework of digitalization and the introduction of the Industrial Internet of Things (IIoT) in Kazakhstan. The proposed approach corresponds to the strategic directions of the Digital Kazakhstan and the Concept of Artificial Intelligence Development until 2029 programs, contributing to improving the efficiency and reliability of domestic maintenance systems.

The experimental results were obtained using anonymized data from an industrial automotive engineering enterprise in the Republic of Kazakhstan, which confirms the applicability of the proposed approach in real production conditions.

Key words: *Explicable AI, predictive maintenance, interpretability of models, machine learning, neural networks, XAI approach.*

Сведения об авторах

Динара Туленгалиевна Алдашева* – докторант кафедры «Программного обеспечения» Костанайского регионального университета имени А. Байтұрсынұлы, Республика Казахстан; e-mail: aldasheva.dinara@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-4990-4308.

Ольга Сергеевна Салыкова – кандидат технических наук, ассоциированный профессор кафедры «Программного обеспечения»; Костанайский региональный университет имени А. Байтұрсынұлы, Республика Казахстан; e-mail: solga0603@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8681-4552.

Михаил Юрьевич Зарубин – кандидат технических наук, ассоциированный профессор кафедры «информационных технологий и автоматики», Костанайский инженерно-экономический университет им. М. Дулатова, Республика Казахстан; e-mail: zarubin_mu@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1415-5244.

Талгат Амангильдинович Жуаспаев – старший преподаватель, кафедры информационных технологий и автоматики, Костанайский инженерно-экономический университет им. М. Дулатова, Республика Казахстан; e-mail: g_talgat_a@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-2240-9729.

Мадина Даулетжановна Мусина – старший преподаватель, кафедры информационных технологий и автоматики, Костанайский инженерно-экономический университет им. М. Дулатова, Республика Казахстан; e-mail: madina.madina.musina@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-0610-6938.

Авторлар туралы мәліметтер

Динара Туленгалиевна Алдашева* – «Бағдарламалық қамтамасыз ету» кафедрасының докторанты; А. Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: aldasheva.dinara@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-4990-4308.

Ольга Сергеевна Салыкова – техника ғылымдарының кандидаты, «Бағдарламалық қамтамасызету»кафедрасының қауымдастырылған профессоры, А. Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті, ҚазақстанРеспубликасы; e-mail: solga0603@mail.ru. ORCID: .

Михаил Юрьевич Зарубин – техника ғылымдарының кандидаты, ақпараттық технологиялар және автоматика кафедрасының қауымдастырылған профессоры М. Дулатова атындағы Қостанай инженерлік-экономикалық университеті. Қазақстан Республикасы; e-mail: zarubin_mu@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1415-5244.

Талгат Амангильдинович Жуаспаев – аға оқытушы, ақпараттық технологиялар және автоматика кафедрасы М. Дулатова атындағы Қостанай инженерлік-экономикалық университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: g_talgat_a@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-2240-9729.

Мадина Даулетжановна Мусина – аға оқытушы, ақпараттық технологиялар және автоматика кафедрасы М. Дулатов аатындағы Қостанай инженерлік-экономикалық университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: madina.madina.musina@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-0610-6938.

Information about the authors

Dinara Aldasheva* – doctoral student of the department of Software Engineering, A. Baitursynov Kostanay Regional University, Republic of Kazakhstan; e-mail: aldasheva.dinara@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-4990-4308.

Olga Salykova – candidate of technical sciences, associate professor of the Department of Software Engineering, Kostanay Regional University named after Akhmet Baitursynuly, Republic of Kazakhstan; e-mail: solga0603@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8681-4552.

Mikhail Zarubin – candidate of technical sciences, associate professor, department of information technology and automation, Kostanay Engineering and Economics University named after Myrzakyp Dulatov, Republic of Kazakhstan; e-mail: zarubin_mu@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1415-5244.

Talgat Zhuaspayev – senior lecturer,, department of information technology and automation, Kostanay Engineering and Economics University named after Myrzakyp Dulatov, Republic of Kazakhstan; e-mail: g_talgat_a@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-2240-9729.

Madina Musina – senior lecturer,, department of information technology and automation, Kostanay Engineering and Economics University named after Myrzakyp Dulatov, Republic of Kazakhstan; e-mail: madina.madina.musina@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-0610-6938.

Поступила в редакцию 05.01.2026
Принята к публикации 16.02.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-7

ҒТАХР: 81.93.29

BY 4.0
Check for updates

Б.К. Абдураимова, А.Е. Нұрмұханбетова*
Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
010000 Қазақстан Республикасы, Астана қаласы, Сатпаева көшесі, 2
*e-mail: nuralbina@gmail.com

АҚПАРАТТЫҚ-КОММУНИКАЦИЯЛЫҚ ОРТАДАҒЫ ЗИЯНДЫ БАҒДАРЛАМАЛАРДЫ АНЫҚТАУҒА АРНАЛҒАН ТЕРЕҢ ОҚЫТУҒА НЕГІЗДЕЛГЕН ИНТЕЛЛЕКТУАЛДЫ ГИБРИДТІ МОДЕЛЬДЕР

Аңдатпа: *Бұл мақалада ақпараттық-коммуникациялық инфрақұрылымдарда зиянды бағдарламаларды анықтауға арналған терең оқыту әдістеріне негізделген интеллектуалды гибридті модельді зерттеу және әзірлеу ұсынылған. Зерттеудің мақсаты: конволюциялық (CNN), қайталанатын (GRU) және графтық (GNN) нейрондық желілерді онтологиялық ерекшеліктерді қалыпқа келтірумен біріктіретін архитектураны құру. Бұл тәсіл зиянды бағдарламалардың статикалық, мінез-құлықтық және құрылымдық сипаттамаларын кешенді талдауға мүмкіндік береді, нөлдік күндік шабуылдар мен полиморфты қауіптерге төзімділікті арттырады. Тәжірбиеде тексеру үшін EMBER-2018, Malimg, CICAndMal2017 және CICMalDroid-2020 ашық деректер жиынтығы пайдаланылды. Эксперименттер ұсынылған гибридті архитектураның жіктеу дәлдігін 98.7% және ROC-AUC = 0.99 қаттамасыз ететінін, оқшауланған терең оқыту модельдері мен дәстүрлі машиналық талдау әдістерінен асып түсетінін көрсетті. Онтологиялық білім моделін енгізу жүйенің түсіндірілуін арттырды және жалған оң нәтижелер көрсеткішін 1.7%-ға дейін төмендетті. Әзірленген бағдарламалық жасақтаманың прототипі шешімнің нақты уақыт жүйелерінде (SOC/IDS) қолданылуын көрсетті және практикалық киберқауіпсіздік жүйелерінде одан әрі масштабтау және енгізу әлеуетін көрсетті. Зерттеудің жаңалығы күрделі цифрлық ортада зиянды нысандарды дәлірек және түсінікті түрде анықтауға мүмкіндік беретін мультимодальды талдау мен онтологиялық модельдеуді біріктіруде жатыр.*

Түйін сөздер: *зиянды бағдарлама; терең оқыту, конволюциялық нейрондық желілер (CNN), қайталанатын нейрондық желілер (GRU), графтық нейрондық желілер (GNN), нөлдік күндік шабуылды анықтау, гибридті архитектура, киберқауіпсіздік.*

©Б.К. Абдураимова, А.Е. Нұрмұханбетова, 2026

Кіріспе

Қазіргі таңда зиянды бағдарламалық жасақтаманың жылдам дамуына, әртүрлілігіне және күрделілігіне байланысты зиянды бағдарламаларды анықтау киберқауіпсіздіктегі ең өзекті мәселелердің біріне айналды. Дәстүрлі қолтаңбаға және эвристикалық негізделген әдістер полиморфты, метаморфты және файлсыз шабуылдар сияқты озық қауіптерге қарсы тұру үшін енді жеткіліксіз. Бұлтты есептеулерге, виртуалдандыруға және Заттар интернетіне (IoT) жаһандық ауысу қауіпсіздік ландшафтын одан әрі күрделендірді [18], себебі динамикалық инфрақұрылымыдарда зиянды әрекеттерді дәстүрлі механизмдермен анықтау тиімсіз болып табылады. «Kaspersky Lab» мәліметтері бойынша, 2024 жылы күн сайын орта есеппен 467 000 жаңа зиянды файл анықталған [1]. Бұл 2023 жылмен салыстырғанда 14%-ға өскен [1].

Бұл нәтиже интеллектуалды, автоматтандырылған және масштабталатын анықтау шешімдерінің шұғыл қажеттілігін көрсетеді. Машиналық оқыту (Machine Learning) және терең оқыту (Deep learning) тәсілдері зиянды бағдарламалардың күрделі мінез-құлық және құрылымдық модельдерін зерттеу арқылы айтарлықтай артықшылықтар береді. Бұл гибридті тәсіл арқылы белгісіз немесе нөлдік күн осалдықтарын қауіптерді анықтауға болады. Сонымен қатар, төлем бағдарламаларының, жеткізілім тізбегіне шабуылдардың және мемлекет қаржыландыратын шабуылдардың өсіп келе жатқан экономикалық әсері нақты уақыт режимінде өзгеріп отыратын қауіптерге бейімделе алатын жасанды интеллектке негізделген заманауи киберқауіпсіздік жүйелерін құру қажеттілігін көрсетеді.

Әдебиеттерге шолу. Зиянды бағдарламаларды анықтаудың дәстүрлі әдістері қолтаңба, эвристикалық, статикалық және динамикалық талдауға негізделген. Қолтаңба талдауы алдын ала анықталған үлгілерді (жолдар, хэштер, код фрагменттері) пайдаланады, оларды талданатын файлдың мазмұнымен салыстырады. Бұл тәсіл белгілі қауіптерге қарсы жоғары жылдамдық пен дәлдікпен сипатталады, бірақ жаңа, полиморфты және метаморфты зиянды бағдарламалардың нұсқаларын анықтай алмайды [2]. Кодтағы минималды өзгерістердің өзі, оның ішінде, мысалы, нұсқауларды ауыстыру, бөлім құрылымын өзгерту немесе бумалағыштарды пайдалану қолтаңбаны пайдасыз етеді.

Ал, эвристикалық әдістер күдікті индикаторлар жиынтығын, мысалы, ерекше API шақыруларын, өзін-өзі өзгертетін кодты, жүйелік тізілімдегі өзгерістерді немесе қорғалған каталогтарға кіруді талдайды [3]. Олар қолтаңбаларға қарағанда икемді, бірақ жалған оң нәтижелердің жоғары деңгейде көрсетеді және ережелерді қолмен жаңартуды қажет етеді.

Статикалық талдау қауіпсіз және жылдам, орындалатын файлдарды, олардың метадеректерін, опкодтарын және тәуелділіктерін тексеруге мүмкіндік береді. Дегенмен, ол бағдарламаның нақты әрекетін көрсетпейтіндіктен, шатастыруға және шифрлауға осал [4].

Динамикалық талдау (құм жәшіктері, эмуляторлар, виртуалды машиналар) жүйелік қоңырауларды, желілік белсенділікті және файл операцияларын бақылау үшін бақыланатын ортада нысанды орындайды [5]. Шатастыруға қарсы сенімдірек, бірақ ресурстарды көп қажет етеді және жалтаруға осал, қазіргі заманғы зиянды бағдарлама виртуалдандыруды анықтап, құм жәшігінің іздерін анықтаса, әрекетті өзгерте алады. Беделге негізделген әдістер мен URL сүзгілері белгілі қауіптерге жедел жауап береді, бірақ толығымен жаңартылған дерекқорлар мен бедел серверлеріне тәуелді [6].

Ғылыми мәселе. Қазір зиянды бағдарламаларды анықтау әдістері полиморфты және метаморфты қауіптер санының артуына, шатастыру технологияларын кеңінен қолдануға және шабуылдаушылардың файлсыз шабуылдарға ауысуына байланысты шектеулерге тап болуда. Дәстүрлі қолтаңбаға және эвристикалық тәсілдерге негізделген қажетті бейімделушілік пен жалпылау мүмкіндігін қамтамасыз етпейді, ал кейбір машиналық оқыту әдістері деректердің теңгерімсіздігін, жоғары мінез-құлық өзгергіштігін және репрезентативті мүмкіндіктердің болмауын шеше алмайды. Ғылыми қиындық статикалық, динамикалық және графикалық мінез-құлық ерекшеліктерін біріктіре алатын, гетерогенді инфрақұрылымдарда сенімді және түсіндірілетін зиянды бағдарламаларды анықтауды қамтамасыз ететін гибридті интеллектуалды модельді әзірлеу қажеттілігінде жатыр.

Зерттеу нысаны. Ақпараттық және коммуникациялық ортадағы зиянды бағдарламаларды анықтау және жіктеу процесін жасанды интеллект және терең оқыту әдістерін қолдану.

Зерттеу мақсаты: аралас режимдегі орталарда (Windows, Android, бұлттық және контейнерлік жүйелер) тиімді, сенімді және түсіндірілетін зиянды бағдарламаларды анықтауды қамтамасыз ететін интеллектуалды гибридті терең оқыту моделін әзірлеу.

Зерттеу міндеттері:

- Зиянды бағдарламаларды анықтаудың қолданыстағы әдістеріне аналитикалық шолу жүргізу, олардың күшті және әлсіз жақтарын анықтау және дәстүрлі және бір қабатты терең оқыту модельдерінің шектеулерін анықтау.
- Статикалық, динамикалық және графикалық мүмкіндіктерді бірыңғай нейрондық желіге негізделген архитектурада біріктірудің орындылығын зерттеу.
- Бинарлық кескіндерді талдау үшін CNN, мінез-құлық тізбектері үшін RNN/GRU және графикалық қатынастар үшін GNN біріктіретін гибридті модель архитектурасын әзірлеу.
- Ұсынылған модельдің прототипін енгізу және ашық деректер жиынтықтарында бірқатар эксперименттер жүргізу.
- Ұсынылған модельдің өнімділігін келесі метрикаларды пайдаланып, қолданыстағы шешімдермен салыстыру.
- Модельдің нөлдік күндік шабуылдарға, шатастыруға және файлсыз қауіптерге төзімділігін, сондай-ақ түсіндірілетін жасанды интеллект құралдарын пайдаланып шешімдерді түсіндіру мүмкіндігін бағалау.
- Ұсынылған тәсілді ақпараттық-коммуникациялық инфрақұрылымға арналған практикалық киберқауіпсіздік жүйелерінде одан әрі дамыту және енгізу салаларын анықтау.

Әдіснама

Бұл бөлімде зерттеу әдіснамасы, соның ішінде пайдаланылған материалдардың сипаттамалары, зерттеу сұрақтары мен гипотезалардың тұжырымдамасы, жұмыс кезеңдері және қойылған мақсатқа жету үшін қолданылатын әдістер сипатталған.

Зерттеу материалының сипаттамалары

Зерттеу материалы ретінде Windows және Android платформаларын қамтитын ашық деректер жиынтығын пайдаланылады, себебі бұл гибридті және кросс-платформалы зиянды бағдарламаларды анықтау модельдерін әзірлеуге мүмкіндік береді.

Windows орындалатын файлдарын (Portable Executable, PE форматы) талдау үшін деректер жиынтығында шамамен 1,1 миллион үлгі (900 000 оқыту және 200 000 тест) қамтитын және мүмкіндіктер мен сынып белгілері көрсетілген EMBER-2018 деректер жиынтығы қарастырылады [6]. Бинарлы деректерді визуализациялау үшін 25 отбасынан 9339 зиянды бағдарлама даналарын қамтитын, суреттер түрінде ұсынылған Malimg деректер жиынтығы пайдаланылды және бұл деректерді пайдалану жіктеу тапсырмасына компьютерлік көру (CNN) әдістерін қолдануға мүмкіндік береді [7].

Android мобильді ортасы үшін зерттеу Канада киберқауіпсіздік институты ұсынған CICAndMal2017 және CICMalDroid-2020 деректер жиынтығына негізделген. Біріншісі 10 854 қосымшаны (оның ішінде 4 354 зиянды бағдарлама), екіншісінде статикалық және динамикалық ерекшеліктері бар (API қоңыраулары, желілік ағындар, жүйелік қоңыраулар) 17 000-нан астам дананы қамтиды [8].

Сонымен қатар, зерттеуде API тәуелділіктерін график түрінде көрсету әдістері (басқару ағыны және шақыру графигі) қолданылады, бұл мінез-құлық үлгілерін талдау үшін графикалық нейрондық желілерді (GNN) құруға мүмкіндік береді [9]. Деректердің семантикалық үйлесімділігін жақсарту үшін шабуыл түрлері, мүмкіндіктері және зиянды бағдарламалардың әрекеті арасындағы қатынастарды сипаттайтын OWL форматындағы онтологиялық білім моделі әзірленді [10].

Осылайша, материалдар жиынтығы талдаудың үш басым әдісін – статикалық, динамикалық және құрылымдық-графикалық тәсілдерін қамтиды, бұл нәтижелердің кешенділігі мен қайталануын қамтамасыз етеді.

Зерттеу сұрақтары және гипотеза

Зерттеу сұрақтары:

- Статикалық, динамикалық және графикалық мүмкіндіктерді біріктіретін мультимодальды гибридті архитектура жеке бір қабатты модельдермен (тек CNN немесе тек RNN) салыстырғанда нөлдік күндік шабуылдарға дәлдікті және төзімділікті жақсарта ма?
- Онтологиялық ерекшеліктерді қалыпқа келтіруді пайдалану әртүрлі деректер жиынтығы мен платформалар арасында берілген кезде модельдердің жалпылау мүмкіндігін жақсарта ма?
- Түсіндірілетін жасанды интеллект әдістерін (Grad-CAM, GNNExplainer) біріктіру зиянды үлгілерді анықтаудың жоғары деңгейін сақтай отырып, шешімдердің түсіндірілуін жақсарта ала ма?

Ұсынылған гипотеза (тезис): Зерттеудің гипотезасы бойынша, онтологиялық тұрғыдан нормаланған мүмкіндіктерді мультимодальды терең оқыту архитектурасымен (CNN + RNN/GRU + GNN) біріктіру оқшауланған модельдермен салыстырғанда жіктеу сапасының статистикалық тұрғыдан айтарлықтай жақсаруын (F1-score > 0,95 және ROC-AUC > 0,98 метрикаларына сәйкес) және обфускация мен нөлдік күндік шабуылдарға төзімділікті қамтамасыз етеді [11, 12].

Бірінші кезең зиянды бағдарламаларды анықтауға арналған ғылыми басылымдар мен практикалық шешімдерді аналитикалық шолуды қамтиды, себебі бұл қолтаңбаға негізделген әдістерден бастап терең нейрондық желілерге негізделген гибридті модельдерге дейін негізгі даму бағыттарын анықтауға мүмкіндік берді [2]. Әртүрлі нейрондық желі архитектураларының тиімділігіне, мүмкіндіктерді көрсету әдістеріне және модельдердің полиморфты және файлсыз шабуылдарға төзімділігіне қатысты зерттеу сұрақтары тұжырымдалды.

Екінші кезең деректерді жүйелеуді және тазартуды, соның ішінде сынып теңгерімсіздігін жою үшін қайталануды алып тастауды, қалыпқа келтіруді және кеңейтуді қамтыды. Функция кеңістігін құру үшін статикалық, динамикалық және графиктік сипаттамалар пайдаланылды. Статикалық мүмкіндіктер PE/DEX метадеректерін, opcode тізбектерін және кітапхана импорттарын қамтиды. Ал, динамикалық мүмкіндіктер жүйелік шақырулар мен желілік ағындарды, ал графиктік мүмкіндіктер API шақыру графиктері арқылы көрсетілген функциялар мен жадтағы нысандар арасындағы қатынастарды қамтиды [4].

Үшінші кезең зиянды бағдарламалар отбасылары, мүмкіндіктер, шабуыл әдістері және инфрақұрылым контексті арасындағы қатынастарды сипаттайтын OWL онтологиясын жасауды қамтыды. Онтология деректер семантикасын біріктіру және машиналық оқыту нәтижелерін түсіндіру үшін қолданылады [13].

Төртінші кезең көрнекі екілік кескіндерді талдау үшін конволюциялық нейрондық желілерді (CNN), жүйелік шақыру тізбектерін талдау үшін рекуррентті нейрондық желілерді (RNN, GRU) және топологиялық қатынастарды көрсету үшін графтық нейрондық желілерді (GNN) біріктіретін гибридті архитектураны құруға және оқытуға арналды. Модальділіктер толық байланысты қабатпен кеш біріктіруді қолдану арқылы біріктірілді. Оқыту үшін Adam және RMSProp оңтайластырғыштары, сондай-ақ кросс-энтропия және фокальды жоғалту функциялары пайдаланылды.

Бесінші кезеңде әзірленген модельдер келесі көрсеткіштерді қолдана отырып, сынақ жиынтықтарында сынақтан өткізіліп, оңтайландырылды: дәлдік (Accuracy, Precision), еске түсіру (Recall), F1-score, ROC-AUC және FPR@TPR=95%. Модельдердің нөлдік күндік шабуылдарға және жасырын зиянды әрекеттерге төзімділігіне ерекше назар аударылды. Осы мақсатта оқыту жиынынан тұтас отбасыларды алып тастап (отбасы аралық бөлу) эксперименттер жүргізілді, бұл бізге модельдің білімді жалпылау қабілетін бағалауға мүмкіндік берді [8].

Соңғы кезеңде деректерді жинау модулін, машиналық оқыту модулін және нәтижелерді визуализациялау интерфейсін қамтитын бағдарламалық платформа енгізіледі. Бағдарламалық жасақтаманы енгізу TensorFlow, PyTorch, Scikit-learn және Keras кітапханаларын пайдаланып Python тілінде жазылған. Нәтижелер гибридті архитектураның дәлдігі жоғары екенін (классикалық CNN немесе RNN модельдеріне қарағанда 6-12% жоғары) және ұқсас шешімдермен салыстырғанда жалған оң нәтижелердің төмен деңгейін көрсететінін көрсетті [14].

Осылайша, ұсынылған әдіснама аналитикалық, эксперименттік және инженерлік тәсілдерді біріктіреді және іс жүзінде маңызды нәтижеге қол жеткізуге бағытталған: бұлтқа негізделген инфрақұрылымды қорғауға және ақпараттық жүйелердің кибертөзімділігін қамтамасыз етуге қолданылатын зиянды бағдарламаларды интеллектуалды талдауға арналған бейімделгіш жүйені құру.

Зерттеу әдістері

Бұл зерттеудің әдіснамасы ақпараттық-коммуникациялық инфрақұрылымдардағы интеллектуалды гибридті зиянды бағдарламаларды анықтау модельдерінің тиімділігін теориялық талдау, инженерлік модельдеу және эксперименттік тестілеудің үйлесіміне негізделген. Бұл тәсіл бұрын белгісіз және полиморфты қауіптерді анықтай алатын, нөлдік күндік шабуылдарға төзімді және нақты әлемдегі корпоративтік және бұлттық орталарға қолданылатын жүйені құруға бағытталған.

Зерттеуде әртүрлі зиянды бағдарламалар түрлері мен платформаларын қамтитын ашық деректер жиынтығы пайдаланылды. Windows орындалатын файлдарын талдау үшін аннотацияланған мүмкіндіктері бар миллионнан астам үлгілерді қамтитын EMBER-2018 деректер жиынтығы пайдаланылды. Ал, файлдарды суреттер ретінде жобалау үшін екілік құрылымдарды визуализациялау қолданылды. Android мобильді платформасы үшін статикалық және динамикалық мүмкіндіктерді (API шақырулары, желілік ағындар, жүйелік шақырулар) қамтитын CICAndMal2017 және CICMalDroid-2020 пайдаланылды. Бұл деректер көздері тәжірбиелердің әртүрлілігі мен кешенділігін қамтамасыз етті, бұл бізге әртүрлі домендер арасында ауысқан кезде модельдердің сенімділігін бағалауға мүмкіндік берді.

Зерттеу нәтижелері

Зерттеу нәтижелері ақпараттық-коммуникациялық инфрақұрылымдарда зиянды бағдарламаларды анықтау үшін конволюциялық, қайталанатын және графикалық нейрондық желілерді біріктіруді ұсынатын интеллектуалды гибридті архитектураның тиімділігін көрсетеді. Тәжірбиелер әртүрлі деректер түрлерін (статикалық, динамикалық және құрылымдық) талдауды, қолданыстағы әдістермен салыстырмалы бағалауды және нақты ақпараттық қауіпсіздік жүйелеріне ұқсас жағдайларда модельдерді тестілеуді қамтыды.

Бірінші кезеңде дәстүрлі машиналық оқыту алгоритмдерін біріктіретін базалық модельдер SVM, Random Forest және LightGBM оқытылып, сынақтан өткізілді. Олардың нәтижелері классикалық тәсілдердің белгілі шектеулерін растады, яғни белгілі үлгілер үшін жоғары дәлдікті көрсетсе, жаңа және бұрын көрінбеген мысалдарға жалпылау мүмкіндігі төмен болып табылады. Бұл модельдер үшін орташа F1 – ұпайлары (F1 – score) 0.91-ден аспады, ал ROC-AUC мәндері 0.89-0.93 деңгейінде қалды, бұл полиморфты және файлсыз шабуылдарға шектеулі бейімделуді көрсетеді [6, 8].

Екіншіден, тәжірбиелер жиынтығында терең оқыту модельдерінің CNN, GRU және GNN өнімділігі бағаланды, әрқайсысы өз модальдылығының деректерін талдады. Malimg деректер жиынтығынан визуализацияланған екілік файлдарда оқытылған CNN моделі 95,1% дәлдік пен F1-ұпайы (F1-score) 0,94 көрсетті, бұл компьютерлік көру әдістерінің екілік құрылымдарды талдау міндетіне қолданылуын растады. CICMalDroid-2020 жүйелік шақыру тізбектерімен жұмыс істейтін GRU моделі F1 ұпайы 0,93 және бағдарламаның мінез-құлқындағы жасырын уақытша үлгілерді анықтау мүмкіндігін көрсетті. API тәуелділік графиктерін талдайтын GNN 96,2% дәлдікке қол жеткізді және контекстік және топологиялық қатынастарды түсіру арқылы жаңа зиянды бағдарламалар нұсқаларына төзімділігін растады [7, 9].

Ең жоғары нәтижелерге үш тармақтың барлығын біріктіру механизмі бар бірыңғай гибридті CNN+GRU+GNN архитектурасы арқылы қол жеткізіледі. Соңғы дәлдік 98.7%, F1-ұпайы (F1-score) 0.98, ал ROC-AUC 0.99 болды. API шақыруларын MITRE ATT&CK тактикасы мен әдістерімен байланыстыратын онтологиялық ерекшеліктерді қалыпқа келтіруді қосу арқылы жалған оң нәтиже көрсеткіші (FPR) 95% , ал TPR кезінде 1.7%-ға дейін төмендеді [15]. Бұл онтологиялық білім моделін пайдалану жіктеуіштің түсіндірілуін және жалпылау қабілетін жақсартатынын көрсетеді.

Модельдердің салыстырмалы нәтижелері 1-кестеде келтірілген. Онтологияны қолдайтын гибридті модель тек классикалық алгоритмдерден ғана емес, сонымен қатар MAD-NET моделін [8] қоса алғанда, ең жақсы гибридті шешімдерден де асып түсетінін, ұсынылған шешімдердің жақсы түсіндірілуін және дәлдіктің ұқсас деңгейінде есептеу күрделілігінің төмен екенін көрсетеді.

Қолданылған тәжірбиелер бізге әрбір әдістің үлесін сандық бағалауға мүмкіндік берді. CNN-ді алып тастау дәлдікті 5.4%-ға төмендетті, бұл екілік файлдардың құрылымдық үлгілерін талдаудың маңыздылығын көрсетті. GRU-ларды алып тастау F1 – ұпайын (F1 – score) шамамен 6%-ға төмендетті, бұл уақытша тәуелділіктердің рөлін айқындайды. GNN-дерді алып тастау ROC-AUC-ті 3-4%-ға төмендетті, бұл кодты өзгертуге беріктік үшін графикалық байланыс талдауының маңыздылығын растайды [11]. Осылайша, гибридті модель синергетикалық әсер көрсетті, үш тәсілді біріктіріп қолдану олардың жеке әсерлерінің қосындысынан да жоғары нәтиже берді.

Кесте 1 – Зиянды бағдарламаларды анықтау модельдерінің салыстырмалы талдауы

№	Модельдің түрі	Пайдаланылған деректер	Дәлдік (%)	F1-ұпайы	ROC-AUC	FP-rate (%)
1	SVM	EMBER-2018	89.7	0.88	0.91	7.4
2	Random Forest	EMBER-2018, CICAndMal2017	91.2	0.90	0.93	6.1
3	LightGBM	EMBER-2018	93.5	0.92	0.95	5.2
4	CNN	Malimg	95.1	0.94	0.97	4.3
5	GRU	CICMalDroid-2020	94.6	0.93	0.96	4.6
6	GNN	CFG/API-графтары	96.2	0.95	0.97	3.9
7	CNN+GRU	Визуализация + әрекеттері	97.4	0.96	0.98	2.8
8	CNN+GRU+GNN	Барлық әдістер, кеш біріктіру	98.7	0.98	0.99	2.1

Шешімдердің түсіндірілуін талдау үшін Grad-CAM [16] және GNNExplainer [17] қолданылды. Grad-CAM бізге жіктеуге ең көп әсер ететін екілік кескіндердің аймақтарын визуализациялауға мүмкіндік берді, ал GNNExplainer API граф түйіндері арасындағы негізгі байланыстарды анықтады. Бұл тәсілдер жүйенің жұмысының ашықтығын және ақпараттық қауіпсіздік мамандарының сенімін арттырады.

2-кестеден көрініп тұрғандай, LightGBM негізіндегі модельдер [19] F1-score = 0.9547 деңгейін көрсетсе, Random Forest негізіндегі механизмдер [21] 98.13% дәлдікке жеткен. NLP және мінез-құлықтық белгілерге негізделген модельдер [22] салыстырмалы түрде төмен нәтиже (F1 ≈ 0.858) көрсетті.

Кесте 2 – 2023–2025 жылдардағы зерттеулермен салыстыру

№	Автор (жыл)	Деректер жиыны	Accuracy (%)	Recall	F1-score
1	AlOmari et al. [19], 2023	CICMalDroid2020	95.49	0.947	0.9547
2	Azeem et al. [20], 2024	UNSW-NB15	98.13	0.9998	0.9998
3	Bakshi et al. [21], 2025	Figshare datasets	89.30	0.9821	0.9821
4	Gupta et al. [22], 2025	Behavioral sandbox logs	99.98	0.871	0.858
5	Ұсынылған модель, 2025	CNN+GRU+GNN	98.7	0.98	0.98

Ұсынылған CNN+GRU+GNN гибридті архитектурасы 98.7% дәлдік, F1=0.98 және ROC-AUC=0.99 нәтижелерін көрсетті, бұл бірмодальді немесе тек ансамбльдік әдістермен салыстырғанда жоғары немесе бәсекеге қабілетті нәтиже екенін дәлелдейді.

Айта кету керек, әртүрлі зерттеулерде қолданылған деректер жиындары мен бағалау протоколдары әртүрлі болғандықтан, нәтижелер тікелей салыстыру үшін толық эквивалентті емес. Дегенмен, алынған көрсеткіштер ұсынылған модельдің қазіргі заманғы әдістерімен тең немесе жоғары деңгейде екенін көрсетеді.

Зерттеу нәтижелері

Эксперименттік зерттеулер зиянды бағдарламаларды анықтау үшін конволюциялық (CNN), рекуррентті (GRU) және графтық (GNN) нейрондық желілерді біріктіретін ұсынылған гибридті архитектураның жоғары тиімділігін растады.

Негізгі машиналық оқыту әдістері (SVM, Random Forest, LightGBM) алдыңғы зерттеулерге сәйкес 89-93% дәлдік және ROC-AUC 0.95 дейін көрсетті. Терең оқыту модельдері жоғары өнімділікке қол жеткізді: екілік кескіндердегі CNN (Malimg) 95.1% дәлдікке, мінез-құлық деректеріндегі GRU (CICMalDroid-2020) 94.6% және API шақыру графиктеріндегі GNN 96.2% дәлдікке қол жеткізді.

Ұсынылған CNN+GRU+GNN гибридті моделі оқшауланған модельдерден 6-12% артық нәтижесімен 98.7%, F1-ұпай (F1-score) 0.98 және ROC-AUC=0.99 дәлдігін көрсетті. Ерекшеліктерді онтологиялық қалыпқа келтіруді енгізу жалған оң нәтижелер санын 1.7%-ға дейін, ал TPR=95% төмендетуге мүмкіндік берді.

Ұсынылған модель жалған оң позитивтердің төмен деңгейін көрсетсе де (FP-rate = 1.7%), SOC/IDS ортасында практикалық қолдану үшін тіпті мұндай көрсеткіш

қауіпсіздік талдаушыларына айтарлықтай жүктеме әкелуі мүмкін. Сондықтан қате жіктеу жағдайларына қосымша талдау жасалды.

FP болжамдарын талдау модельдің келесі жағдайларда жиі қателесетінін көрсетті:

1. Қапталған зиянсыз орындалатын файлдар. Қаптағыштарды пайдаланатын кейбір заңды бағдарламалар (мысалы, UPX) зиянды үлгілерге ұқсас энтропия сипаттамаларына ие. Көрнекі CNN модулі мұндай құрылымдарды күдікті деп түсіндіреді.

2. Қарқынды API шақырулары бар қолданбалар. Заңды әкімшілік құралдары мен жүйелік утилиталары трояндарға ұқсас мінез-құлық үлгілерін көрсетеді (жиі желілік қосылымдар, файлдық жүйеге кіру), бұл зиянды бағдарлама класының ықтималдығының жоғарылауына әкеледі.

3. CFG графиктерінің жоғары құрылымдық байланысы. GNN модулі кейде күрделі бағдарламалық жасақтама архитектураларын графикалық қосылымдардың жоғары тығыздығына байланысты зиянды деп жіктейді, бұл түсініксіз, бірақ заңды бағдарламаларға да тән.

4. Нақты әлемдегі ортадағы кластардың теңгерімсіздігі. SOC ортасында зиянсыз трафиктің үлесі зиянды бағдарламадан айтарлықтай асып түседі. Тіпті жоғары ерекшелікпен де, ықтималдық шегіндегі шағын қателік FP абсолютті санының артуына әкелуі мүмкін.

Жалған оң талдау

Жүйе күніне 1 000 000 оқиғаны талдайды деп есептейік. FP көрсеткіші 1,7% болғанда, бұл айтарлықтай операциялық жүктемені тудырады.

$$FP = 0.017 \times 1\,000\,000 = 17\,000$$

Дегенмен, жіктеу шегін оңтайландыру (шекті реттеу) және ROC қисығын пайдалану арқылы TPR > 93% сақтай отырып, FP-ны 0,8-1,0%-ға дейін төмендетуге болады.

Осылайша, жалпы дәлдіктің жоғары деңгейіне (98,7%) қарамастан, қателіктерді талдау жалған оң нәтижелердің негізінен құрылымдық тұрғыдан күрделі немесе пакеттелген заңды бағдарламалар жағдайында болатынын көрсетеді. Бұл модельді нақты әлемдегі SOC инфрақұрылымдарында енгізу кезінде бейімделгіш шекті баптау және контекстік сүзгілеумен гибридті тәсілдің қажеттілігін растайды.

Ғылыми нәтижелерді талқылау

Зерттеу нәтижелері әртүрлі деректер модальділіктерін статикалық, динамикалық және графикалық біріктіру жіктеу сапасын және нөлдік күндік шабуылдарға төзімділікті айтарлықтай жақсартатынын растайды. Бұл тұжырымдар Shaukat, Zhu және тағы басқа ғалымдардың зерттеулерінің [15, 9] нәтижелерімен сәйкес келді, олар мультимодальды және онтологияға негізделген тәсілдердің тиімділігін атап өтті.

Гибридті модель синергетикалық әсерді көрсетеді: әрбір тармақ (CNN, GRU, GNN) жалпы дәлдікке ерекше үлес қосады. Түсіндірілетін жасанды интеллект әдістерін (Grad-CAM, GNNExplainer) қолдану шешімдердің түсіндірілуін және жүйені автоматтандырылған киберқауіпсіздік жүйелерінде практикалық енгізудің орындылығын растады.

Осылайша, әзірленген архитектура жоғары дәлдік, жылдамдық және шешім қабылдау ашықтығы арасындағы тепе-теңдікті қамтамасыз етеді, бұл инфрақұрылымдардағы зиянды шабуылдарды бақылау және алдын алу үшін перспективті құралға айналдырады.

Қорытынды

Бұл зерттеу ақпараттық және коммуникациялық инфрақұрылымдардағы зиянды бағдарламаларды анықтауға арналған терең оқыту әдістеріне негізделген интеллектуалды гибридті архитектураны әзірледі, енгізді және эксперименттік түрде растады. Ұсынылған модель үш қосымша аналитикалық тәсілді біріктіреді: статикалық екілік мүмкіндіктерді талдауға арналған конволюциялық нейрондық желілер (CNN), мінез-құлық тізбектерін өңдеуге арналған қайталанатын бірлік желілері (GRU) және топологиялық тәуелділіктерді талдауға арналған графтық нейрондық желілер (GNN). Бұл комбинация жіктеу дәлдігін, нөлдік күндік шабуылдарға төзімділікті және шешімдердің түсіндірілуін жақсартты.

EMBER-2018, Malimg, CICAndMal2017 және CICMalDroid-2020 ашық деректер жиынтықтарында жүргізілген эксперименттер гибридті модельдің дәстүрлі және бір деңгейлі архитектуралардан асып түсетінін көрсетті. Атап айтқанда, жіктеу дәлдігі 98.7%-ға жетті, ал ROC-AUC 0.99 болды, бұл оқшауланған модельдерге қарағанда 6-12%-ға жоғары [2], [3], [5]. Онтологиялық ерекшеліктерді қалыпқа келтіруді қосу модельдің жаңа және полиморфты үлгілерге беріктігін арттырды, жалған оң нәтиже көрсеткішін 95% TPR кезінде 1.7%-ға дейін төмендетті [6].

Бұл зерттеудің ғылыми жаңалығы онтологиялық тұрғыдан байытылған ерекшеліктер мен мультимодальды талдауды біріктіруде жатыр, бұл зиянды кодтың құрылымдық, мінез-құлықтық және графикалық аспектілері арасындағы семантикалық үйлесімділікті қамтамасыз етеді. Қолданыстағы шешімдерден айырмашылығы, ұсынылған модель бір ғана деректер санатымен шектелмейді, керісінше оларды бағдарлама әрекеттері, функциялары және желілік оқиғалар арасындағы байланыстарды тәуелсіз анықтауға қабілетті ортақ көрініс жүйесіне біріктіреді.

Бұл жұмыстың практикалық маңыздылығы әзірленген архитектураны нақты уақыт режиміндегі киберқауіптерді бақылау және талдау жүйелерінің прототиптерін құру үшін пайдалануға болатындығында. Орташа қорытынды уақыты 35-40 мс болатын бұл модельді өнімділіктің төмендеуінсіз SOC және IDS инфрақұрылымдарында пайдалануға мүмкіндік береді деп болжануда. Explainable AI (Grad-CAM, GNNExplainer) пайдалану шешім қабылдаудың ашықтығын қамтамасыз етеді, бұл кейінгі оқиғаларды талдау және қауіпсіздік жүйелерінің аудиті үшін маңызды.

Бұл нәтижелер терең оқыту мен онтологиялық модельдеудің үйлесімі автоматтандырылған зиянды бағдарламаларды анықтауда жаңа бағыт қалыптастырады деген болжамды растайды. Әрі қарай зерттеудің әрі қарай дамуына деректер жиынтығын кеңейту, архитектураны басқа қауіп түрлеріне (файлсыз шабуылдар мен IoT зиянды бағдарламаларын қоса алғанда) бейімдеу және ұсынылған жүйені бұлттық платформалар мен болжамды жауап беру жүйелеріне біріктіру кіреді.

Осылайша, ұсынылған әдіснама және алынған нәтижелер киберқауіпсіздікке ғылыми және қолданбалы тәсілдерді дамытуға айтарлықтай үлес қосады, масштабталатын ақпараттық және коммуникациялық орталарда интеллектуалды, бейімделгіш зиянды бағдарламаларды талдау жүйелерін құру мүмкіндіктерін ашады.

Әдебиеттер тізімі

1. CHislo – goda resheniya laboratorii Laboratoriya Kasperskogo ezhednevno obnaruzhivayut 467 tysyach novyh vredonosnyh fajlov // Press-reliz. – Moskovskaya obl., 4 dek. 2024. https://www.kaspersky.ru/about/press-releases/chislo-goda-resheniya-laboratorii-kasperskogo-ezhednevno-obnaruzhivayut-467-tysyach-novyh-vredonosnyh-fajlov.
2. Malware visualization for deep learning detection / Q. Cui et al // IEEE Access. – 2022. – T. 10. – P. 24435-24447.
3. Saxe J. Deep Neural Network Based Malware Detection Using Two-Dimensional Binary Program Features / J. Saxe, K. Berlin // Proc. 10th Int. Conf. on Malicious and Unwanted Software (MALWARE). – 2015. – P. 11-20. https://doi.org/10.1109/MALWARE.2015.7413680.
4. Hybrid static and dynamic analysis for malware detection / A. Marastoni et al // Computers & Security. – 2024. – Vol. 135. – Article 109934.
5. AV-Comparatives. Real-World Protection Test 2024 – Summary Report // AV-Comparatives.org. – 2024.
6. Anderson H.S. EMBER: An open dataset for training static PE malware machine learning models / H.S. Anderson, P. Roth // arXiv. – 2018. – arXiv:1804.04637.
7. Malware Images: Visualization and Automatic Classification / L. Nataraj et al // Proc. International Symposium on Visualization for Cyber Security (VizSec). – Jul 2011. – P. 1-7. https://doi.org/10.1145/2016904.2016908.
8. Poornima P. Automated malware detection using machine learning and deep learning approaches for android applications / P. Poornima, G. Mahalakshmi // Expert Systems with Applications. – 2024. – T. 237. – Article 121456.
9. Graph Neural Networks for Malware Detection: A Survey / Y. Zhu et al // IEEE Access. – 2023. – T. 11. – P. 85123-85147.
10. Ding Y. Ontology-based knowledge representation for malware individuals and families / Y. Ding, R. Wu, X. Xiao // Computers & Security. – 2019. – Vol. 87. – Art. 101574. https://doi.org/10.1016/j.cose.2019.101574.
11. Deldar F. Deep Learning for Zero-day Malware Detection and Classification: A Survey / F. Deldar, M. Abadi // ACM Computing Surveys. – 2023. – Vol. 56, № 2. – P. 1-37. https://doi.org/10.1145/3605775.

12. ScaleMalNet: A Scalable Hybrid Deep Learning Model for Malware Classification / R. Vinayakumar et al // Future Generation Computer Systems. – 2020. – T. 115. – P. 280-292.
13. Alshoulie M. Deep Learning Approaches for Malware Detection: A Comprehensive Review of Techniques, Challenges, and Future Directions / M. Alshoulie, A. Mehmood // IEEE Access. – 2025. – T. 13. – P. 118652-118677. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3582875.
14. Machine learning based fileless malware traffic classification using image visualization / F.A. Demmese et al // Cybersecurity. – 2023. – T. 6, № 1. – Art. 32. https://doi.org/10.1186/s42400-023-00170-z.
15. A framework for detecting zero-day exploits in network flows / A. Touré et al // Computer Networks. – 2024. – Vol. 224. – Art. 110476. https://doi.org/10.1016/j.comnet.2024.110476.
16. Grad-CAM: Visual Explanations from Deep Networks via Gradient-Based Localization / R.R. Selvaraju et al // Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). – 2017. – P. 618-626. https://doi.org/10.1109/ICCV.2017.74. https://doi.org/10.48550/arXiv.1610.02391
17. GNNExplainer: Generating Explanations for Graph Neural Networks / R. Ying et al // Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS). – 2019. – Vol. 32. – P. 9240-9251. https://doi.org/10.48550/arXiv.1903.03894.
18. Abduraimova B. Comparative study of machine learning applications in malware forensics / B. Abduraimova, S. Gnatyuk, A. Nurmukhanbetova // Proceedings of the Workshop on Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems II (CPITS-II 2024). – Kyiv, Ukraine, October 26, 2024. – CEUR Workshop Proceedings, Vol. 3826. – P. 139-152. https://ceur-ws.org/Vol-3826/paper13.pdf (date of request: 03.11.2025).
19. AlOmari H. A comparative analysis of machine learning algorithms for Android malware detection / H. AlOmari, Q.M. Yaseen, M.A. Al-Betar // Procedia Computer Science. – 2023. – Vol. 220. – P. 763-768. https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.03.101.
20. Analyzing and comparing the effectiveness of malware detection: A study of machine learning approaches / M. Azeem et al // Heliyon Computer Science. – 2024. – Vol. 10, № 1. – Art. e24058. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844023107821.
21. A robust machine learning-based mechanism for malware attack detection and analysis / R. Bakshi et al // Procedia Computer Science. – 2025. – Vol. 242. – P. 876-885. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050925010646.
22. Efficient malware detection using NLP and deep learning model / U. Gupta et al // Alexandria Engineering Journal. – 2025. – Vol. 124. – P. 550-564. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016825004260.

Б.К. Абдураимова, А.Е. Нурмуханбетова*
Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева,
010000 Республика Казахстан, г. Астана, ул. Сатпаева, 2
*e-mail: nuralbina@gmail.com

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ГИБРИДНЫЕ МОДЕЛИ НА ОСНОВЕ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ВРЕДОНОСНЫХ ПРОГРАММ В ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННОЙ СРЕДЕ

В данной работе представлено исследование и разработка интеллектуальной гибридной модели на основе методов глубокого обучения для обнаружения вредоносного программного обеспечения (ВПО) в информационно-коммуникационных инфраструктурах. Цель исследования заключается в создании архитектуры, объединяющей сверточные (CNN), рекуррентные (GRU) и графовые (GNN) нейронные сети с онтологической нормализацией признаков. Такой подход обеспечивает комплексный анализ статических, поведенческих и структурных характеристик вредоносных программ, повышая устойчивость к атакам нулевого дня и полиморфным угрозам. Для экспериментальной проверки использовались открытые наборы данных EMBER-2018, Malimg, CICAndMal2017 и CICMalDroid-2020. Проведённые эксперименты показали, что предложенная гибридная архитектура обеспечивает точность классификации 98.7% и ROC-AUC 0.99, превосходя изолированные модели глубокого обучения и традиционные методы машинного анализа. Введение онтологической модели знаний позволило повысить интерпретируемость системы и снизить уровень ложноположительных срабатываний до 1.7 %. Разработанный программный прототип продемонстрировал применимость решения в системах реального времени (SOC/IDS) и показал потенциал для дальнейшего масштабирования и внедрения в практические системы

кибербезопасности. Научная новизна исследования заключается в интеграции мультимодального анализа и онтологического моделирования, что обеспечивает более точное и объяснимое выявление вредоносных объектов в сложных цифровых средах.

Ключевые слова: *вредоносное программное обеспечение, глубокое обучение, сверточные нейронные сети (CNN), рекуррентные нейронные сети (GRU), графовые нейронные сети (GNN), обнаружение атак нулевого дня, гибридная архитектура, кибербезопасность.*

B.K. Abduraimova, A.E. Nurmukhanbetova*
L.N. Gumilyov Eurasian National University,
010000, Republic of Kazakhstan, Astana, Satpayev Street
*e-mail: nuralbina@gmail.com

INTELLIGENT DEEP LEARNING-BASED HYBRID MODELS FOR MALWARE DETECTION IN THE ICT ENVIRONMENT

This paper presents the research and development of an intelligent hybrid model based on deep learning methods for malware detection in information and communication infrastructures. The goal of the study is to create an architecture combining convolutional (CNN), recurrent (GRU), and graph (GNN) neural networks with ontology-based feature normalization. This approach provides a comprehensive analysis of the static, behavioral, and structural characteristics of malware, increasing resilience to zero-day attacks and polymorphic threats. The EMBER-2018, Malimg, CICAndMal2017, and CICMalDroid-2020 open datasets were used for experimental validation. The experiments showed that the proposed hybrid architecture provides a classification accuracy of 98.7% and a ROC-AUC of 0.99, outperforming isolated deep learning models and traditional machine analysis methods. The introduction of an ontological knowledge model increased the system's interpretability and reduced the false-positive rate to 1.7%. The developed software prototype demonstrated the solution's applicability in real-time systems (SOC/IDS) and demonstrated potential for further scaling and implementation in practical cybersecurity systems. The scientific novelty of the study lies in the integration of multimodal analysis and ontological modeling, which enables more accurate and explainable detection of malicious objects in complex digital environments.

Key words: *malware, deep learning, convolutional neural networks (CNN), recurrent neural networks (GRU), graph neural networks (GNN), zero-day attack detection, hybrid architecture, cybersecurity.*

Авторлар туралы мәліметтер

Баян Куандыковна Абдураимова – кандидат технических наук, доцент, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, г. Астана; e-mail: abduraimovabk@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3913-1895.

Альбина Ерланкызы Нурмуханбетова* – докторант кафедры информационной безопасности факультета информационных технологий ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан; e-mail: nuralbina9898@gmail.com.

Сведения об авторах

Баян Куандыковна Абдураимова – техника ғылымдарының кандидаты, доцент, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ.; e-mail: abduraimovabk@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3913-1895.

Альбина Ерланқызы Нұрмұханбетова* – Л.Н. Гумилева ат. ЕҰУ Ақпараттық технологиялар факультетінің Ақпараттық қауіпсіздік кафедрасының докторанты, Астана, Қазақстан; e-mail: nuralbina9898@gmail.com.

Information about the authors

Bayan Kuandykovna Abduraimova – candidate of technical sciences, associate professor, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana; e-mail: abduraimovabk@mail.ru . ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3913-1895 .

Albina Erlankyzy Nurmukhanbetova* – doctoral candidate in the Department of Information Security, Faculty of Information Technologies, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; e-mail: nuralbina9898@gmail.com.

Редакцияға енуі 05.01.2026
Өңдеуден кейін түсуі 16.02.2026
Жариялауға қабылданды 17.02.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-8

BY 4.0
Check for updates

ҒТАХР: 50.53.19

Г.А. Султанова[1], Б.-Б.С. Есмагамбетов[2], А.А. Мусабеков[1], Г.Е. Тилеуов[*], Р.А. Советбаев[3]
[1]М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан зерттеу университеті,
160012, Қазақстан Республикасы, Шымкент қ., Тауке хан көшесі 5
[2]Ж.А.Тәшенев университеті, 160011, Қазақстан Республикасы, Шымкент қ., Қонаев көшесі 21
[3]Шәкәрім университеті, 071404, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинки көшесі 20а
[*]e-mail: gamidulla.tileuov@mail.ru

АҚПАРАТТЫҚ-ӨЛШЕУ ЖҮЙЕЛЕРІНДЕ ДЕРЕКТЕРДІ ҚЫСУ ӘДІСТЕРІН ЗЕРТТЕУ

Аңдатпа: *Ақпараттық техниканың дамуындағы заманауи тенденцияның бірі ақпараттық-өлшеу жүйелерінің (АӨЖ) техникалық мүмкіндіктері барлық салаларда кеңінен қолданылады. Заманауи технологиялардың мүмкіндіктеріне қарай байланыс желілерін жетілдіру және олардың өткізу қабілеттілігінің сапасын арттыру, сондай-ақ ақпараттың көлемі байланыс желілері арқылы берілгендіктен АӨЖ деректерді қысу қажеттілігі туындайды. Байланыс арналарында ақпараттың үлкен массивтерін сақтауда, өңдеуде және жіберуде ақпараттың көлемін қысудың әртүрлі әдістері қарастырылады. Ақпараттылығы жоғары деректерді қысу, телеметриялық өлшеу жүйелерінде тиімді жүргізіледі. Мәселен, ғарыш аппараттары мен спутниктік жүйелерде деректерді жинауда және оларды басқару станциясына беруде әртүрлі қысу әдістерін қолдану арқылы байланыс арнасының өткізу қабілеттілігі азайтылады. Бұл әртүрлі параметрлерді жинауға, өлшеуге және қашықтағы құрылғыларға беруге мүмкіндік беретін инновациялық ғылыми бағыт. Қысу әдістері әртүрлі дерек көздерде деректерді бөлек өңдеуге бағытталған. Ашық немесе жасырын ақпараттық байланыстар деректерді қысу мүмкіндіктерін арттыруы ықтимал тәсілдермен өзара байланысты болып келеді. АӨЖ жобалау кезеңінде күрделі өлшеу параметрлерінен алынған деректердің қысу әдістерінің жүргізілуін нығайтады. Осылайша, деректерді өлшеу, өңдеу және қысу әдістерін қарастыру өзекті міндет болып табылады. Мақалада деректерді қысу әдістері бойынша зерттеу нәтижелері көрсетіледі.*

Түйін сөздер: *ақпараттық – өлшеу жүйелері, деректерді өлшеу, деректерді қысу алгоритмі, деректерді түрлендіру, телеөлшеу.*

Кіріспе

Қазіргі таңда өлшеу жүйелерінде деректерді түрлендірудің қарқынды дамуының нәтижесінде өлшеу ақпаратының үлкен көлемін алуды, өңдеуді және сақтауды қажет ететін ғылыми зерттеулердің нақты міндеттері шешілуде. Өлшеу құралдары қол жетімсіз мәселелерді шешуге мүмкіндік береді, олардың заманауи дамуы өлшеу ақпараттарының көбеюіне әкеледі. АӨЖ ғылыми эксперименттерді технологиялық үрдіспен адаптивті деңгейде модельдейтін инновациялық өлшеу құралдары қолданысқа енуде. Өлшеу үрдісін автоматтандырудың деңгейі және сенімділігі, нәтиженің жоғары ақпараттық көрсетілуін қамтамасыз етеді. Осылайша, қысу әдістерін қолдану тасымалданатын және сақталатын деректер көлемін азайту бойынша сұранысқа ие. Деректерді қысу әдістері АӨЖ байланыс арналарының өткізу қабілеттілігіне қойылатын талаптарды төмендетуге және қажетсіз деректерді жоғалту арқылы ақпаратты өңдеу жүйелерінің тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді. Деректер көлемін азайту қысу әдістерін белсенді қолдану арқылы жүзеге асырылады. Бұл мәселені көптеген жетекші ғалымдар зерттеген, соның ішінде М.П. Цапенко, П.В. Новицкий, В.Л. Волков, В.А. Виттах, И.С. Гоноровский, И.С. Еремеев, А.Н. Колмогоров, Р.Е. Кричевский, Е.А. Ломтев, А.И. Лоскутов, Д. Хаффман (D. Huffman), К.Шеннон (C.E. Shannon), Дж. Зив (J. Ziv), А. Лемпел (A. Lempel), К. Вуттон (C. Wotton), Д. Саломан (D. Salomon).

Материалдармен тәсілдер

Дерек көздерде деректерді қысудың әртүрлі әдістері қарастырылған. Зерттеу тақырыбын ашу және түсіну үшін деректерді толық қалпына келтіру мүмкіндігі тұрғысынан қысу әдістері екі топқа бөлінеді:

- Қайтымды қысу;
- Қайтымсыз қысу.

©Г.А. Султанова, Б.-Б.С. Есмагамбетов, А.А. Мусабеков, Г.Е. Тилеуов, Р.А. Советбаев, 2026

АӨЖ деректерді қайтымды қысу әдістерін зерттеуде төмен көрсеткіштегі шығынмен қысу әдістерін талдауды қамтиды, бірақ шығынсыз қысу сияқты қайтымды болмайды. Бұл әдістер деректердің деградациясына жол берілетін жүйелерде маңызды, бірақ жоғары қысу коэффициенті мен өңдеу жылдамдығы басымдыққа ие. Нақты мәндерді шамалық мәндермен ауыстыру ақпарат көлемін азайтады, сондай-ақ бұрмалануды тудырады. Болжамды және нақты мән арасындағы айырмашылықтың кодталуы деректер көлемін азайтады. Бастапқы деректерді абсолютті дәлдікпен қалпына келтіруге болатын шығынсыз қысудан айырмашылығы, қайтымды әдістер деректерді белгілі бір дәрежеде бұрмалануымен қалпына келтіреді. Қысу алгоритмі мен параметріне байланысты «Қайтымдылық» дәрежесі үлкен шығындар әкеледі. Үлкен көлемдегі деректерді өңдеуді қажет ететін жүйелер үшін дәлдіктің шамалы төмендеуі, қайтымды қысу үшін тиімді болып келеді. Мәселен, әр өлшемнің абсолютті дәлдігі емес, бақылау жүйелерінде ресурстарды үнемдеудің орнына аз мөлшерде деректердің жоғалуы қолайлы. Мысалы, шектеулі жағдайларда ғарыш аппаратының борттық компьютерлерінде қайтымды қысу, байланыс арналарының жадымен өткізу қабілеттілігінің белгіленген шектеулеріне сәйкес келеді. Жоғары қысу коэффициентінің арқасында құрылғылар көбірек деректерді жинап, сақтай алады. Берілетін деректер көлемі байланыс арналарының өткізу қабілеттілігіне қойылатын талаптарды азайтады және деректерді беру құнын төмендетеді. Қайтымды әдістерінде қысудың жоғары деңгейіне қол жеткізіп жоғалмайтын маңызды деректер сақталады. Қайтымды қысу көбінесе толығымен қайтымды немесе шығынсыз қысу деп аталады. Бұл әдіс ақпаратты жоғалтпай деректер көлемін азайтады, яғни кодталған (қысылған) деректерді толықтай өзгеріссіз қалпына келтіреді, мәтіндік ақпаратты кодтау кезінде мәліметтер қорында қолданылады. Қайтымды қысу тобында келесі әдістер кең таралған: статистикалық кодтау және жалпыланған дискреттеу. Статистикалық кодтау мәндерін әртүрлі ұзындықтағы кодтармен кодтауға негізделген, хабарламалар ең қысқа код комбинацияларына сәйкес нәтиженің қайтымдылығы осы әдістердің артықшылығында. Хабарламаның толық статистикасын алдын-ала білу қажеттілігімен байланысты болуы біршама кемшіліктерге әкеледі. Әйтседе, телеөлшеу деректерін беру кезінде мұндай статистика белгісіз. Статистикалық әдістер екі топқа бөлінеді:

1. Адаптивті немесе ағынды әдістер. Өңделген деректер бойынша статистика негізінде есептелген жаңа деректердің ықтималдығын қолдана отырып жасалады.
2. Блоктық әдістер. Блок статистикасы бөлек кодталып, қысылған блокқа қосылады.

Блоктық әдістерде Хаффман, Шеннон-Фано әдістерінің статикалық нұсқалары, элементтердің ағындарына арналған арифметикалық кодтау мысалдары жатады [2, 5].

Код ұзындығының символ энтропиясын қолданып, элементтің пайда болу ықтималдығы арқылы анықтауға болады. S-символ энтропиясы, P_s – пайда болу ықтималдығы бар, N_s – ақпарат саны.

$$S,\ N_s = P_s * \log_2 P_s \quad (1)$$

Шеннонның дерек көзіне сәйкес кодтауды шифрлау теоремасында (Shannon's sourcecoding theorem) S элементі пайда болу ықтималдығымен P_s теңеседі, кодтың ұзындығы битпен көрсетіледі.

$$L_s = \log_2 P_s \quad (2)$$

Тиімділікті бағалау үшін қолданылатын негізгі сипаттамалар қысу коэффициенті K және R қысу жылдамдығы жатады.

$$\text{Қысу коэффициенті K} = \frac{\text{Шығыс файлының өлшемі}}{\text{Кіріс файлының өлшемі}}$$

$0 < K < 1$ – кезінде қысу жақсы жүргізіледі

Егер бұл шама 1 – ден аз болса, қысу жүреді, 1 – ден көп болса, онда кеңейтілу жүреді. Қысу коэффициентіне кері шаманы қысу факторы деп атайды. Қысу факторы кіріс файлының өлшемін шығыс файлының өлшеміне бөлу арқылы анықталады.

$$R = \frac{k}{n} \quad (3)$$

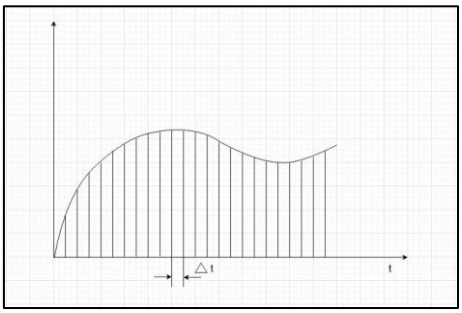
Мұндағы, R - қысу жылдамдығы
k – қысу коэффициенті
n – биттегі дерек көздеректерінің өлшемі

$$\text{Қысу сапасы } 100*(1—k) \quad (4)$$

Мұндағы, k- қысу коэффициенті, қысу сапасын көрсетеді.

Нәтижелер

Қайтымды қысу тобына жататын жалпыланған дискреттеу әдістері анағұрлым жақсы дамыған. Параметрді сұрау жиілігі тұрақты, 1-суретте көрсетілгендей хабарламаның кейбір максималды сипаттамаларына (параметрдің өзгеру жылдамдығына) сүйене отырып таңдалады.



Сурет 1 – Сауалнама жиілігі

Практикада жалпыланған дискреттеу әдістері қажетсіз үлгілерді алып тастау үшін қолданылады. Жуықтау әдістеріне негізделе сауалнаманың тұрақты жиілігімен алдын ала іріктеу жүргізіледі. Деректерді қысу мәселесін $C_к$ коэффициенттері бар алгебралық көпмүшемен өлшеу нәтижелерінің сызықтық жуықтауы ретінде ұсынуға болады $C_к$:

$$y_i^{\sim} = \sum_{k=0}^{m} C_k t_i^k \quad (5)$$

Бұл жағдайда жуықтау қатесі рұқсат етілгеннен артық болмауы керек:

$$ду_i = \max | y_i - y_i^{\sim} | \le Д \quad (6)$$

Жуықтау алгоритмдерінің келесі нұсқаларын синтездеуге болады:

1. Жуықтау аралығы бекітіліп, көпмүшенің дәрежесі ізделеді;
2. Жуықтайтын көпмүшенің дәрежесі бекітіліп, жуықтау аралығы таңдалады;
3. Жуықтау аралығы және көпмүшенің дәрежесі анықталады.

Алғашқы екі нұсқа бір параметрлі адаптивті нұсқалар болып табылады. Бір параметрлі адаптивті көпмүшенің бекітілген дәрежесі, жуықтау интервалында адаптивті алгоритм нақты уақыт қарқынымен өлшеуге мүмкіндік береді.

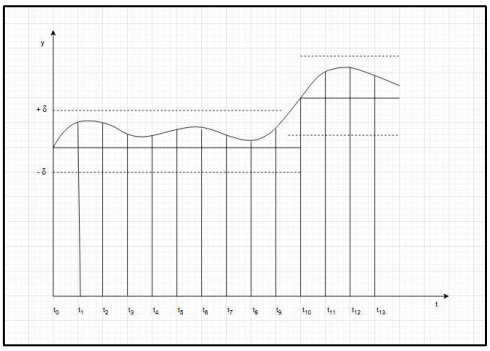
Үшінші нұсқа екі параметрлі адаптивті деректерді қысу алгоритмдерін қамтиды. Ең алдымен көпмүшенің белгіленген дәрежесі мен жуықтау аралығы таңдалады немесе ауыстырылады. Екі параметрлі адаптивті алгоритмдер аппараттық және бағдарламалық қамтамасыз етуді іске асыру күрделілігін ескере отырып, жоғары тиімділікке қарамастан сирек қолданылады.

Маңызды ординаттарды іріктеу кезеңіне байланысты экстраполяциялық және интерполяциялық кезеңдері ажыратылады. Жуықтау көпмүшесінің дәрежесі бойынша алгоритмдер нөлдік, бірінші, екінші және одан жоғары ретті болуы мүмкін [1].

Экстраполяцияға негізделген деректерді қысудың қарапайым алгоритмдерін қарастыратын болсақ, көпмүшенің таңдалған дәрежеде өлшенетін параметрі мүмкін болатын аралықтарда рұқсат етілген қателік қисығына жуықтайды, яғни N санауларының мүмкін болатын үлкен саны шамамен ауыстырылады. Жуықтау аралығы бойынша адаптивті негізделген бұл тәсіл ең ұтымды болып келеді, өйткені көпмүшенің дәрежесі адаптивті кезінде жуықтаудың белгіленген аралығындағы коэффициенттері қателіктерге сезімтал болады да, айырмашылық формулаларын (Ньютон, Лагранж) қолдана отырып есептеледі.

Нөлдік ретті экстраполяторды зерттей келе, u_0 соңғы маңызды санақты білдіреді, оған қатысты ±δ кіру өрісі орнатылады. Егер кейінгі алынған санақтар u_0 өсі кіру өрісінің ішінде болса, олар артық болып саналады және жойылады.

Қол жеткізу өрісінің шекарасынан шыққан кез келген u_k өлшемдері маңызды болып саналады, оған қатысты ±δ жаңа төзімділік өрісі орнатылады және ережесі қайталанады (2-сурет). u(t) параметрінің функциясын қалпына келтіру келесі маңызды санақ пайда болғанға дейін маңызды санақтар арқылы көлденең сызықтарды жүргізу арқылы жүзеге асырылады.



Сурет 2 – Нөлдік ретті экстраполятор

Бірінші ретті экстраполяторды қолдануда телеөлшенетін функцияның сызықтық өзгеру заңының болу ықтималдығы болжанады. Маңызды ординаттарды іріктеу кезеңі жоғарыда сипатталғанға ұқсас, бұл жағдайда жуықтайтын көпмүшелік сызықтық және үздіксіз функция болып табылады. Алгоритмнің негізгі кемшілігі оның шуға сезімталдығы. Интерполяцияға негізделген қысу әдістерінің басты айырмашылығы y(t) параметрінің әрекетін бірқатар нүктелерде сәйкес келетін белгілі бір уақыт тәуелділіктерімен шамамен ауыстыру болып табылады. Бұл жағдайда интерполяциялық түзудің орны белгілі бір қадамдардан немесе әр қадамда жуықтау интервалының әр нүктесі үшін интерполяциялық мәндерді тексеру арқылы нақтыланады. Бұл үлкен қысу коэффициенттеріне қол жеткізуге мүмкіндік береді, бірақ есептеу уақытының айтарлықтай шығындары болады [4]. Нөлдік ретті интерполяторды зерделей келе, бастапқы функцияны жуықтау артық емес санақтар арқылы өтетін көлденең түзулер жүзеге асырады. Артық емес ординат мәндері, артық ординат мәндерінің орташа мәні ретінде есептеледі.

Зерттеу нәтижесінде алгоритм бірінші және кейінгі есептеулер арасындағы айырмашылықты есептей отырып жұмыс істейді.

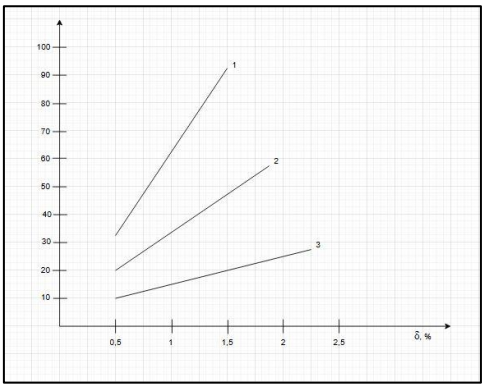
Егер бұл айырмашылық рұқсат етілген δ мәнінен аз болса, өлшемдер артық деп саналады. Қандай да бір қадамда мәндер айырмашылығы δ деңгейінен асып кетсе, бұл мән артық емес болып саналады және барлық алдыңғы мәндердің орташа мәні есептеледі. Бұл орташа мән маңызды санақ болып табылады. Бұл алгоритм нөлдік ретті көпмүшелер арасында қысу тиімділігі бойынша оңтайлы. Бірінші ретті интерполятордың жұмыс принципі келесі зерттеу мысалында түсіндіріледі. u_0 өлшенетін параметрдің артық мәні, ал u_1, u_2 – кейінгі өлшемдер болсын. Әрбір санаққа қатысты ±δ төзімділік өрістері белгіленеді. u_0 нүктесінен u_1 + δ және u_1 − δ нүктелері арқылы өтетін түзулер сызылады. Егер u_2 мәні осы түзулермен шектелген өрістің ішінде болса, u_2 ординатасы артық деп саналады. Әрі қарай, екі шекара сызығы қайтадан қалыптасады, бірақ u_2 + δ және u_2 − δ нүктелерінен өтіп, үшінші ординаттың артықтығы тексеріледі. Ереже бойынша кез келген ордината толеранттылық шегінен шыққанға дейін қайталанады. Мұндай ординат маңызды болып саналады, ал шекаралық сызықтар пайда болатын координаттар жаңа бастама ретінде қабылданады. Жуықтау сызығы маңызды ординаттар арқылы жүзеге асырылады. Қайтымды қысу алгоритмдерінің тиімділігін бағалау оларды келесі көрсеткіштер бойынша салыстыру кезінде жүргізіледі:

1) Қысу коэффициенті K;
2) η тиімділік коэффициенті;
3) M_n ұсынудың шуға төзімділігі;
4) Алгоритмнің күрделілік коэффициенті.

Негізгі көрсеткіш – теледидарлық өлшемдердің артықтығын жою дәрежесін сипаттайтын қысу коэффициенті. Ол қатынаспен анықталады:

$$K = \frac{n_э}{n}, \quad (7)$$

Мұндағы, n – қысу нәтижесінде өлшеулердің орташа саны, n_e – хабарламадағы өлшеулер саны. 3-суретте қысу коэффициентінің төзімділік мәніне тәуелділігін көрсететін эксперименттік деректер келтірілген. Берілген тәуелділіктерді талдау интерполяциялық үрдістерде ең үлкен қысу әсері болатынын көрсетеді, алайда олардың кемшілігі компьютерде іске асыру қиындықтары кездеседі [8].



Сурет 3 – Қысу коэффициентінің төзімділік шамасына тәуелділігі

Бірөлшемді өңдеу барысында нөлдік ретті болжаушыны пайдаланған кезде шамамен 10 элементарлы операция қажет, ал нөлдік ретті интерполяторды пайдаланған кезде шамамен 25 операция қажет етіледі. Сонымен қатар, интерполяциялық қысу алгоритмдерінің маңызды кемшілігі олардың уақыт бойынша деректерді беру кезінде уақыттық кешіктіруді қажет етеді. Егер нақты уақыт режимінде деректерді өңдеу қажет болса, әсіресе төтенше жағдайларды анықтаған кезде, бұл алгоритмдерді қолдану мүмкін емес. Экстраполяциялық алгоритмдердің ішінде нөлдік ретті экстраполятор жоғары қысу коэффициентіне ие, өйткені экстраполяторлар шуға жоғары сезімтал, сондықтан олардың тиімділігі төмен. Осылайша, практикалық іске асыру тұрғысынан экстраполятор ең оңтайлы [3].

Жылдам өзгеретін үрдістерді (ЖӨҮ) өңдеу үшін нөлдік ретті болжаушыны (НРБ) қолдану зерттеледі [6, 7]. Мысалы, сигнал спектрінің тиімді ені 16 кГц болсын. Котельников теоремасына сәйкес бастапқы циклдік іріктеудің жиілігі:

$$f_g = (5+10)\,\Delta F_{эф.} = (5+10) \times 16 = (80\text{-}160)\ кГц \quad (8)$$

Бір санақты өңдеуге арналған уақыт, бұл жағдайда

$$t_g=\frac{1}{fg}=\frac{1}{(80-160)}=(12{,}5\text{-}6{,}2)мкс \quad (9)$$

1. Бірінші ретті интерполятор
2. Нөлдік ретті интерполятор
3. Нөлдік ретті экстраполятор

Бір санақты нөлдік ретті болжаушымен өңдеу үшін шамамен 20 мкс қажет, сондықтан нақты қарқынмен өңдеу мүмкін еместігін көруге болады. Деректерді өңдеумен берудің кешігуі қосымша жадты қажет етеді. Бір өлшеу арнасын 30 минут (1800 с) өңдеу кезінде қажетті жад көлемі шамамен осы көлемге жетеді.

$$N_n=\frac{20}{12,5}\cdot 1800\approx 3000бит \quad (10)$$

Осылайша, ЖӨҮ-ні өңдеу үшін қайтымды қысудың қарапайым алгоритмдерін қолдануда бірқатар кемшіліктер орын алды:

- бастапқы дискреттеу жиілігіне қойылатын жоғары талаптар;
- нақты уақыт масштабында өңдеу мүмкіндігінің болмауы;
- қосымша аппараттық шығындар.

Талқылау

Қайтымсыз қысу ақпаратты жояды, деректерді толықтай бастапқы қалпына келтіру мүмкін болмайтын қысу әдісі. Деректердің бір бөлігі жоғалған кезде бастапқы деректердің максималды қысу коэффициенті қамтамасыз етіледі. Бұл қысу әдісі әдетте графикалық, дыбыстық және бейнелі ақпараттық кодтау кезінде қолданылады. Әртүрлі типтегі ақпараттық қысудың екі түрі бар: арнайы; әмбебап.

Арнайы әдістер белгілі бір түрдегі ақпаратты қысуды жүзеге асырады. Мысалы, суретті, дыбысты немесе бейнені қабылдау ерекшеліктерін ескереді. Қажетсіз ақпаратты жоғалтудың нәтижесінде ақпаратты қабылдау жоғары қысу деңгейіне жетеді, сондықтан мұндай әдістер қайтымсыз болып келеді [9].

Әмбебап әдістер ақпаратты биттер тізбегі ретінде береді, әсіресе сандық ақпаратты қысу үшін қолданылады. Мұндай әдістер қайтымды, өйткені қысылған деректерді толық қалпына келтіруге болады.

Хаффман қысу алгоритмі канондық және адаптивті нұсқалары бойынша жоғары тиімділікке ие. Таңбаның кейбір қайталанатын элементі, баспа белгісі, кез келген бит тізбегі, код немесе код сөзі (ASCII) арқылы да түсіндіріледі. Бұл алгоритм негізінен қысу екі кезеңнен тұрады:

– бірінші кезеңде таңбалардың пайда болу жиілігі немесе ықтималдығы есептеледі,

– таңбалар массиві есептелген жиілік мәндеріне сәйкес сұрыпталады.

– екінші кезеңде осы мәліметтер бойынша Хаффман ағашы салынады, оған сәйкес

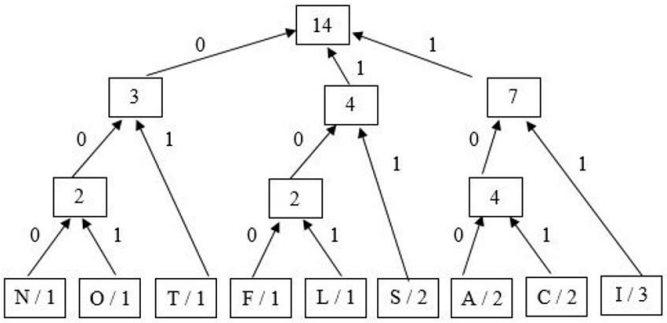
– таңбалардың кодтары есептеледі. Бұл деректерді энтропияға дейін қысуға мүмкіндік береді, сондықтан Хаффман алгоритмі шығынсыз қысудың оңтайлы әдісі болып табылады. Алгоритм код ағашын төменнен жоғары қарай салу арқылы жұмыс істейді [11].

Хаффман әдісін қолдана отырып зерттеу жүргізілді. Бастапқы жолды CLASSIFICATI-ON деп алынып, оның жиілігі анықталды (1 кесте).

Кесте 1 – Жиілік кестесі

I	C	A	S	L	F	T	O	N
3	2	2	2	1	1	1	1	1

Жиілікті қолдана отырып Хаффман ағашын құру жүргізілді (4 – сурет). Әрбір таңба 0 және 1 тізбегі ретінде сақталады.



Сурет 4 – Хаффман ағашы

Түзілген Хаффман ағашына байланысты код құрылды (2 кесте).

Кесте 2 – Хаффман коды

I	C	A	S	L	F	T	O	N
11	101	100	11	101	100	01	001	000

Жиілікті 8 битке көбейтіп бастапқы мәні көрсетілді, сонымен қатар жиілікті кодға көбейту арқылы файл көлемі қысылды (3 кесте).

Кесте 3 – Таңбаларды қысуды есептеу

Жиілігі	Бастапқы	Қысу	Азайтылды
I 3	3*8=24	3*2=6	18
C 2	2*8=16	2*3=6	10
A 2	2*8=16	2*3=6	10
S 2	2*8=16	2*2=4	12
L 1	1*8=8	1*3=3	5
F 1	1*8=8	1*3=3	5
T 1	1*8=8	1*2=2	6
O 1	1*8=8	1*3=3	5
N 1	1*8=8	1*3=3	5
Барлығы:	112 бит	36 бит	76 бит

Зерттеу барысында бастапқы файлдың көлемі 112 бит болған, Хаффман әдісі арқылы қысылған файл 36 бит болды. Нәтижесінде файлдың көлемі 76 битке азайтылды, қысылған

файлдың көлемі 67,8% пайызға қысқарды. Сондай-ақ жұмыс барысында бірқатар кемшіліктер кездесті, олар:

- код ағашының алгоритмі код ағашының сақталуына байланысты еңбек сыйымдылығын арттырады;
- хабарламаның мазмұнын қалпына келтіру үшін ықтималдық кестесін білуі;
- кодтау үшін жиілік кестесін құру және ағаш салу, нақты кодтауды анықтау.

Қорытынды

Жүргізілген зерттеуде АӨЖ деректерді қысу үрдістерін талдаудың нәтижесінде жад ресурсында, байланыс арналарында өткізу қабілеттілігімен есептеу қуатының ұтымдылығы көрсетілді. Статистикалық кодтау арқылы код ұзындықтарының символ энтропиясы қолданылып, элементтің шығу ықтималдық формуласын және қысу коэффициентін, жылдамдығы мен сапасын анықтау қажеттілігі талданды. Жалпыланған дискреттеу әдістерінде параметрді сұрау жиілігінің сипаттамасына негізделе сауалнама жиілігін жүргізудің нәтижесінде практикада қажетсіз үлгілерді алып тастау оңтайлығы ұсынылды. Жуықтау алгоритмдері үш нұсқа бойынша синтездеу жұмыстарын ұйымдастыру қажеттілігі сипатталды. Экстраполяция және интерполяцияға негізделе деректерді қысу алгоритмдерін қарастырудың маңыздылығы көрсетілді. Нөлдік ретті экстраполятор маңызды санақтар арқылы көлденең сызықтарды жүргізу арқылы телеөлшенетін функцияның сызықтық өзгеру заңының болу ықтималдығы болжанды.

Қысу коэффициентінің төзімділік шамасына тәуелділік алгортимінің шешу жолдарын талдау зерделенді. Әйтседе, жылдам өзгеретін үрдістерді өңдеуде қысу алгоритмдерін қолдануда біршама кемшіліктер айқындалды. Хаффман әдісі арқылы деректерді қысу алгоритмінің нәтижесінде файлдың көлемі 76 битке азайтылды, қысылған файлдың көлемі 67,8% пайызға қысқартылды, дегенмен бұл әдісті зерттеу барысында кемшіліктер де анықталды. Осылайша, өлшеу нәтижесін алудың жылдамдығы, цифрлық ресурстарда ақаулар мен кідірістерді азайту және алмасудың сенімділігін күшейту арқылы АӨЖ жұмысы нығайды. Деректер көлемінің өсуіне байланысты қысу әдісі өзекті, сондай – ақ мультимедиялық, бұлттық және әлеуметтік желі орталарында қысу әдістерін қолдану тиімді болып табылады. АӨЖ өнімділігі дәлдік пен жылдамдықты, экономикалық ұтымдылықты арттыру үшін деректерді қысу әдістерін пайдалану қажет етіледі.

Әдебиеттер тізімі

1. Адаптивные телеизмерительные системы / Б.Я. Авдеев и др. – Л.: Энергия, 1981. – 248 с.
2. Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео / Д. Ватолин и др. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. – 384 с.
3. Бакулина М.П. Эффективное сжатие изображений на основе кодирования низкоэнтропийных источников / М.П. Бакулина // Автометрия. – 2011. – Т. 47, № 1. – С. 59-66.
4. Карпенко Д.С. Метод сжатия телеизмерений с использованием бинарного арифметического кодирования / Д.С. Карпенко, И.А. Максимов, В.В. Иванов // Труды МАИ. – 2013. – № 65. – С. 26-36.
5. Петрянин Д.Л. Сжатие текстовых данных / Д.Л. Петрянин, Е.А. Сидорова, А.В. Зорькин // Новые информационные технологии в автоматизированных системах: Материалы семнадцатого научно-практического семинара. – Москва: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2014. – С. 505-507.
6. Левенец А.В. Принципы разработки перспективных способов сжатия телеметрических данных / А.В. Левенец // Вестник ТОГУ. – 2017. – № 2. – С. 31-38.
7. An enhanced run-length encoding compression method for telemetry data / Yanhu Shan et al // Metrology and measure-ment systems. – 2017. – № 4. – P. 551-562.
8. Обзор способов снижения избыточности телеметрической информации / Ф.Н. Байбекова и др. // Радиопромышленность. – 2019. – Т. 29, № 2. – С. 8-16.
9. A hierarchical adaptive spatio-temporal data compression scheme for wireless sensor networks / S. Chen et al // Wireless Networks. – 2019. – № 25. – P. 429-438.
10. Chen C. A new lossy compression algorithm for wire-less sensor networks using Bayesian predictive coding / C. Chen, L. Zhang, R.L.K. Tiong // Wireless Networks. – 2020. – Vol. 26, Issue 8. – P. 5981-5995.
11. Алгоритмы сжатия данных без потерь: учебное пособие для вузов / Е.Р. Пантелеев, А.Л. Алыкова. – Санкт-Петурбург: Лань, 2021. – 172 с.

References

1. Adaptivnye teleizmeritel'nye sistemy / B.Ya. Avdeev i dr. – L.: Ehnergiya, 1981. – 248 s. (In Russian).
2. Metody szhatiya dannykh. Ustroistvo arkhivatorov, szhatie izobrazhenii i video / D. Vatolin i dr. – M.: DIALOG-MIFI, 2003. – 384 s. (In Russian).
3. Bakulina M.P. Ehffektivnoe szhatie izobrazhenii na osnove kodirovaniya nizkoehntropiinykh istochnikov / M.P. Bakulina // Avtometriya. – 2011. – T. 47, № 1. – S. 59-66. (In Russian).
4. Karpenko D.S. Metod szhatiya teleizmerenii s ispol'zovaniem binarnogo arifmeticheskogo kodirovaniya / D.S. Karpenko, I.A. Maksimov, V.V. Ivanov // Trudy MAI. – 2013. – № 65. – S. 26-36. (In Russian).
5. Petryanin D.L. Szhatie tekstovykh dannykh / D.L. Petryanin, E.A. Sidorova, A.V. Zor'kin // Novye informatsionnye tekhnologii v avtomatizirovannykh sistemakh: Materialy semnadtsatogo nauchno-prakticheskogo seminara. – Moskva: IPM im. M.V. Keldysha, 2014. – S. 505-507. (In Russian).
6. Levenets A.V. Printsipy razrabotki perspektivnykh sposobov szhatiya telemetricheskikh dannykh / A.V. Levenets // Vestnik TOGU. – 2017. – № 2. – S. 31-38. (In Russian).
7. An enhanced run-length encoding compression method for telemetry data / Yanhu Shan et al // Metrology and measure-ment systems. – 2017. – № 4. – P. 551-562. (In English).
8. Obzor sposobov snizheniya izbytochnosti telemetricheskoi informatsii / F.N. Baibekova i dr. // Radiopromyshlennost'. – 2019. – T. 29, № 2. – S. 8-16. (In Russian).
9. A hierarchical adaptive spatio-temporal data compression scheme for wireless sensor networks / S. Chen et al // Wireless Networks. – 2019. – № 25. – P. 429-438. (In English).
10. Chen C. A new lossy compression algorithm for wire-less sensor networks using Bayesian predictive coding / C. Chen, L. Zhang, R.L.K. Tiong // Wireless Networks. – 2020. – Vol. 26, Issue 8. – P. 5981-5995. (In English).
11. Algoritmy szhatiya dannykh bez poter': uchebnoe posobie dlya vuzov / E.R. Panteleev, A.L. Alykova. – Sankt: Lan', 2021. – 172 s. (In Russian).

Г.А. Султанова[1], Б.-Б.С. Есмагамбетов[2], А.А. Мусабеков[1], Г.Е. Тилеуов[*], Р.А. Советбаев[3]

[1]Южно-Казахстанский исследовательский университет имени М. Ауэзова
160012, Республики Казахстан, г. Шымкент, улица Тауке хана 5
[2]Университет имени Ж.А. Ташенева
160011, Республики Казахстан, г. Шымкент, улица Кунаева 21
[3]Университет Шакарима
071404, Республики Казахстан, г. Семей, улица Глинки 20а
[*]E-mail:gamidulla.tileuov@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ СЖАТИЯ ДАННЫХ В ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Одной из современных тенденций в развитии информационной техники является то, что технические возможности информационно-измерительных систем (ИИС) широко используются во всех отраслях. В зависимости от возможностей современных технологий возникает необходимость в совершенствовании сетей связи и повышении качества их пропускной способности, а также в сжатии данных ИИС, поскольку объем информации передается по сетям связи. Рассматриваются различные способы сжатия объема информации при хранении, обработке и передаче больших массивов информации в каналах связи. Сжатие высокоинформативных данных эффективно проводится в системах телеметрических измерений. Например, в космических кораблях и спутниковых системах пропускная способность канала связи уменьшается за счет использования различных методов сжатия при сборе данных и их передаче на станцию управления. Это инновационное научное направление, которая позволяет собирать, измерять и передавать различные параметры удаленным устройствам. Методы сжатия направлены на раздельную обработку данных в разных источниках. Открытые или скрытые информационные связи становятся все более взаимосвязанными способами, что потенциально увеличивает возможности сжатия данных. На этапе проектирования ИИС усиливают проведение методов сжатия данных, полученных из сложных параметров измерений. Таким образом, рассмотрение методов измерения, обработки и сжатия данных является актуальной задачей. В статье отражаются результаты исследований по методам сжатия данных.

Ключевые слова: *информационно-измерительные системы, измерение данных, алгоритм сжатия данных, преобразование данных, телеизмерение.*

G. Sultanova[1], B-B. Yesmagambetov[2], A. Musabekov[1], G. Tileuov[*], R. Sovetbayev[3]
[1]M. Auezov South Kazakhstan Research University
160012, Kazakhstan, Shymkent, street Tauke khana, 5
[2]J.A.Tashenev University, 160011, Kazakhstan, Shymkent, street Kunaeva, 21
[3]Shakarim University, 071404, Kazakhstan, Semey, street Glinki, 20a
[*]e-mail:gamidulla.tileuov@mail.ru

STUDY OF DATA COMPRESSION METHODS IN INFORMATION-MEASURING SYSTEMS

One of the modern trends in the development of information technology is that the technical capabilities of information and measurement systems (IMS) are widely used in all areas. Due to the capabilities of modern technologies, there is a need to improve communication networks and improve the quality of their bandwidth, as well as to compress data in the IMS due to the fact that the amount of information is transmitted through communication networks. Various methods of compressing the amount of information in the storage, processing and transmission of large arrays of information in communication channels are considered. Highly informative data compression is effectively performed in telemetry measurement systems. For example, in spacecraft and satellite systems, the bandwidth of the communication channel is minimized by using various compression methods in collecting data and transmitting them to the control station. This is an innovative scientific direction that allows you to collect, measure and transfer various parameters to remote devices. Compression methods focus on separate data processing in different data sources. Open or hidden information connections are increasingly interconnected in ways that can increase data compression capabilities. Strengthens the implementation of compression methods for data obtained from complex measurement parameters at the design stage of IMS. Thus, the consideration of methods for measuring, processing and compressing data is an urgent task. The article reflects the results of research on data compression methods.

Key words: *information and measurement systems, data measurement, data compression algorithm, data conversion, tele-measurement.*

Авторлар туралы ақпарат

Гулбану Султанова – докторант, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан зерттеу университеті, Шымкент; e-mail:gasultanova@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5168-7805.

Булат-Батыр Есмагамбетов – д.т.н., профессор, Ж.А. Тәшенев атындағы университеті, Шымкент; e-mail: Bulatbatyr@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2825-5200.

Ахметбек Мусабеков – к.т.н., доцент, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан зерттеу университеті, Шымкент; e-mail: Musabekov_A@rambler.ru. ORCID: https:// orcid.org/ 0000-0003-0499-472X.

Гамидулла Тилеуов* – магистр, аға оқытушы, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан зерттеу университеті, Шымкент; e-mail:gamidulla.tileuov@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/ 0000-0002-6049-6066

Раил Советбаев – PhD доктор, Шәкәрім университеті, Семей; e-mail: rsovetbayev93@ gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-3605-515X.

Информация об авторах

Гулбану Султанова – докторант, Южно-Казахстанский исследовательский университет имени М. Ауэзова, Шымкент; e-mail:gasultanova@mail.ru. ORCID: https://orcid. org/0000-0002-5168-7805.

Булат-Батыр Есмагамбетов – д.т.н., профессор, университет имени Ж.А. Ташенева, Шымкент; e-mail: Bulatbatyr@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2825-5200.

Ахметбек Мусабеков – к.т.н., доцент, Южно-Казахстанский исследовательский университет имени М. Ауэзова, Шымкент; e-mail:Musabekov_A@rambler.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0499-472X.

Гамидулла Тилеуов – магистр, старший преподаватель, Южно-Казахстанский исследовательский университет имени М. Ауэзова, Шымкент; e-mail: gamidulla.tileuov@ mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6049-6066.

Раил Советбаев – Phd доктор, университет Шәкәрім, Семей; e-mail: rsovetbayev93@ gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-3605-515X.

Information about the authors

Gulbanu Sultanova – doctoral student, M.Auezov South Kazakhstan Research University, Shymkent; e-mail:gasultanova@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5168-7805.

Bulat-Batyr Yesmagambetov – doctor of technical sciences, professor, J.A. Tashenev University, Shymkent; e-mail:Bulatbatyr@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2825-5200.

Akhmetbek Musabekov – candidate of technical sciences, docent, M. Auezov South Kazakhstan Research University, Shymkent; e-mail: Musabekov_a@rambler.ru. https://orcid.org/ 0000-0003-0499-472X.

Gamidulla Tileuov – master, senior teacher, M. Auezov South Kazakhstan Research University, Shymkent; e-mail:gamidulla.tileuov@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6049-6066.
Rail Sovetbayev – doctor PhD, Shakarim University, Semey; e-mail:k-mamadieva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-3605-515X.

Редакцияға енуі 05.01.2026
Өңдеуден кейін түсуі 05.03.2026
Жариялауға қабылданды 17.03.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-9

МРНТИ: 81.93.29

BY 4.0
Check for updates

Д.Т. Тюлемисова[1], А.К. Шайханова[1]*, В.П. Марценюк[2], Г.Б. Бекешова[1], Б.Т. Смаилова[3]
[1]Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева,
10000, Республика Казахстан, г.Астана, ул. Сатпаева, 2
[2]Университет Бельско-Бяла,
ul.Willowa 2, 43-300, Бельско-Бяла, Польша
[3]Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки 20 А
*e-mail: shaikhanova_ak@enu.kz

ОПТИМИЗАЦИЯ МОДЕЛЕЙ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ДЕТЕКЦИИ ФЕЙКОВЫХ НОВОСТЕЙ: ПОДБОР ГИПЕРПАРАМЕТРОВ И АНАЛИЗ ROC-КРИВЫХ

Аннотация: *В условиях активного и неконтролируемого распространения информации в цифровой среде, особенно в социальных медиа и новостных агрегаторах, особую актуальность приобретает задача автоматического выявления фейковых новостей. Рост объёмов пользовательского контента и высокая скорость его распространения существенно усложняют ручную верификацию информации, что обуславливает необходимость применения методов машинного обучения. Целью настоящего исследования является анализ, сравнительная оценка и оптимизация базовых моделей машинного обучения для детекции фейковых новостей с акцентом на подбор гиперпараметров, вычислительную эффективность и интерпретацию результатов классификации. В работе использован набор текстовых данных ISOT Fake News Dataset, содержащий новостные сообщения на английском языке с бинарными метками «правда» и «ложь», прошедшие этапы очистки и векторизации с применением метода TF-IDF. В рамках исследования реализованы и проанализированы модели логистической регрессии, дерева решений, случайного леса и градиентного бустинга. Оценка качества классификации проводилась на основе метрик Accuracy, Precision, Recall, F1-score, а также ROC-анализа и значения площади под кривой (AUC). Показано, что модель градиентного бустинга обеспечивает наивысшую точность классификации, тогда как логистическая регрессия демонстрирует сопоставимое качество при значительно меньших вычислительных затратах и времени обучения. Дополнительно в работе выполнен контроль утечки данных и анализ причин завышенных метрик качества, что позволило обеспечить корректную интерпретацию результатов. Полученные выводы подтверждают, что оптимизированные классические модели машинного обучения способны обеспечивать высокое качество детекции фейковых новостей и могут рассматриваться как ресурсоэффективная альтернатива более сложным нейросетевым подходам в прикладных задачах кибербезопасности и мониторинга информационных потоков.*

Ключевые слова: *фейковые новости; машинное обучение; оптимизация гиперпараметров; классификация текстов; ROC-анализ; AUC; логистическая регрессия.*

1. Введение

В условиях стремительного роста объёмов информации в сети Интернет проблема распространения фейковых новостей приобретает особую актуальность. Социальные медиа и онлайн-платформы стали основным источником новостных сообщений, однако наряду с достоверной информацией всё чаще распространяются ложные или искажённые данные, способные оказывать значительное влияние на общественное мнение, политические

©Д.Т. Тюлемисова, А.К. Шайханова, В.П. Марценюк, Г.Б. Бекешова, Б.Т. Смаилова, 2026

процессы и экономическую стабильность. В связи с этим разработка эффективных методов автоматического выявления фейковых новостей является важной научной и практической задачей в области информационной безопасности и анализа данных [1, 2].

Современные методы машинного обучения позволяют классифицировать текстовые данные на основе статистических и семантических признаков. Эффективность таких моделей во многом определяется выбором алгоритма и оптимальных гиперпараметров, влияющих на качество обобщения и вычислительную сложность. Чрезмерно ресурсоёмкие модели могут быть неэффективны при обработке больших объёмов данных в реальном времени, что требует поиска баланса между точностью и вычислительными затратами [3, 4].

Настоящая статья направлена на исследование подходов к оптимизации базовых моделей машинного обучения для задачи детекции фейковых новостей. В работе рассматриваются модели логистической регрессии, дерева решений, случайного леса и градиентного бустинга, обученные на текстовых данных с бинарными метками «правда» и «ложь». Для оценки качества классификации используется ROC-анализ и показатель AUC, что позволяет объективно сравнить эффективность алгоритмов и определить оптимальные параметры с учётом вычислительной эффективности.

Несмотря на активное развитие нейросетевых и трансформерных архитектур (BERT, RoBERTa и др.), их применение в практических системах детекции фейковых новостей часто ограничено высокими требованиями к вычислительным ресурсам и времени обучения. В условиях систем реального времени и распределённых платформ особую актуальность сохраняют классические и ансамблевые методы машинного обучения, способные обеспечивать конкурентоспособное качество классификации при существенно меньших вычислительных затратах [5-8]. В работе также уделяется внимание корректности экспериментальной методологии и контролю утечки данных, что является критически важным аспектом при анализе текстовых корпусов [9, 10].

2. Методология

2.1 Описание набора данных

Для реализации поставленных задач была проведена серия экспериментов на открытых наборах данных, содержащих тексты с метками достоверности («правда» / «ложь»). В качестве исходных данных использовался открытый набор ISOT Fake News Dataset, размещённый на платформе Kaggle. Датасет содержит 44 898 новостных публикаций на английском языке, размеченных бинарными метками *fake* и *true*. В выборке представлено 23 481 фейковое сообщение и 21 417 достоверных новостей, что обеспечивает относительно сбалансированное распределение классов. Достоверные новости преимущественно получены из агентства Reuters, тогда как фейковые тексты собраны из различных онлайн-источников, распространяющих недостоверный контент. Данный датасет широко применяется в исследованиях по детекции фейковых новостей и подходит для сравнительного анализа алгоритмов машинного обучения в условиях контролируемого эксперимента. Цель эксперимента заключалась в сравнении эффективности базовых алгоритмов машинного обучения при решении задачи бинарной классификации и в оптимизации их параметров с целью уменьшения вычислительной сложности [8].

2.2 Предварительная обработка данных

На первом этапе проведена очистка текстов от лишних символов, знаков пунктуации и стоп-слов. Все тексты, представленные на английском языке, были приведены к нижнему регистру, выполнено лемматизирование с использованием стандартных средств обработки естественного языка. После очистки данные были векторизованы с использованием метода TF-IDF (Term Frequency – Inverse Document Frequency), что позволило преобразовать текстовую информацию в числовое представление, пригодное для анализа алгоритмами машинного обучения.

2.3 Модели машинного обучения

Модели машинного обучения позволяют выявлять скрытые закономерности в текстах и классифицировать новости на категории «правда» и «ложь». Основные подходы включают: 1) Логистическую регрессию (Logistic Regression) - базовый линейный классификатор, хорошо работающий при разреженных векторах признаков. 2) Дерево решений (Decision Tree) – алгоритм, основанный на иерархическом разбиении данных по признакам, что позволяет визуализировать процесс принятия решения. 3) Случайный лес (Random Forest) – ансамблевый метод, объединяющий несколько деревьев для повышения точности и

устойчивости модели. 4) Градиентный бустинг (Gradient Boosting) – мощный метод ансамблирования, оптимизирующий последовательность слабых моделей для минимизации ошибки.

Для представления текстовых данных применяются метод векторизации TF-IDF (Term Frequency-Inverse Document Frequency)**.** Этот метод представляет текстовые данные в виде числовых векторов, отражающих важность каждого слова в документе относительно всего корпуса текстов.

2.4 Оптимизация гиперпараметров

Для логистической регрессии были оптимизированы параметр силы регуляризации C и тип регуляризации (L1, L2). Для классификатора на основе дерева решений были выбраны максимальная глубина дерева (max_depth) и минимальное количество выборок в листовом узле (min_samples_leaf). Для классификатора на основе случайного леса были оптимизированы количество деревьев (n_estimators), максимальная глубина дерева и стратегия выбора признаков.Для классификатора на основе градиентного бустинга были настроены скорость обучения (learning_rate), количество оценщиков и глубина дерева. В таблице 1 приведена наглядная оптимизация.

Таблица 1 – Оптимизация гиперпараметров алгоритмов машинного обучения

Модель	Оптимизация	Эффект
Logistic Regression	solver='saga', max_iter=200, C=1.0, n_jobs=-1	Быстрое обучение, меньше памяти, низкая потеря точности
Decision Tree	max_depth=12/6, min_samples_split=10, min_samples_leaf=5	Меньше рост дерева, ускорение предсказания, экономия памяти
Gradient Boosting Classifier	n_estimators=150\50, max_depth=4, learning_rate=0.1, subsample=0.8	Быстрое обучение, почти без потери качества
Random Forest Classifier	n_estimators=100, max_depth=12, max_features='sqrt', n_jobs=-1	Быстрое обучение и предсказание, точность почти не падает
Все модели	n_jobs=-1 для многопоточности; уменьшение размера TF-IDF или TruncatedSVD	Ускорение обучения и предсказания для больших текстовых данных

Оптимизация гиперпараметров проводилась с использованием метода GridSearchCV с перекрестной проверкой. Многопоточность была включена для всех моделей с помощью параметра n_jobs = -1. Кроме того, для снижения вычислительной сложности были рассмотрены методы уменьшения размерности для векторов TF-IDF, включая ограничение размера признаков и опциональное использование TruncatedSVD.

Результаты оптимизации показали, что для рассматриваемого набора данных небольшие значения глубины дерева и ограничение числа итераций позволяют значительно снизить вычислительную нагрузку без заметного ухудшения качества классификации.

2.5 Показатели оценки

Для оценки эффективности бинарных классификаторов применяются метрики Accuracy, Precision**,** Recall**,** F1-score**,** а также ROC-кривая (Receiver Operating Characteristic Curve) и AUC (Area Under the Curve). ROC-кривая отражает зависимость между True Positive Rate (TPR) и False Positive Rate (FPR) при различных порогах классификации, а площадь под кривой (AUC) показывает способность модели различать положительные и отрицательные классы. Значение AUC, близкое к 1**,** указывает на высокое качество классификации, в то время как значение около 0.5 свидетельствует о случайном угадывании.

2.6 Экспериментальный протокол и контроль утечки данных

Набор данных был случайным образом разделен на обучающую и тестовую подгруппы в соотношении 80/20. Для классификации были выбраны четыре базовые модели машинного обучения: логистическая регрессия, дерево решений, случайный лес и градиентный бустинг. Все модели обучались на векторизованных данных TF-IDF и оптимизировались с помощью GridSearchCV для определения конфигураций гиперпараметров, обеспечивающих баланс между производительностью классификации и вычислительной эффективностью. Для предотвращения утечки данных этапы векторизации и оптимизации гиперпараметров

выполнялись исключительно на обучающей выборке, после чего проводилась оценка на отложенной тестовой выборке.

3. Результаты

3.1 Эффективность классификации

Для оценки производительности качества работы моделей, были рассчитаны ключевые метрики: Accuracy**,** Precision**,** Recall**,** F1-score**,** время обучения (Training Time), а также ROC-анализ с вычислением площади под кривой (AUC). Эти показатели позволяют оценить не только общую точность классификации, но и способность модели корректно определять фейковые и достоверные новости при различных условиях. В таблице 2 результаты показывают, что все четыре модели обладают высокой точностью и стабильностью классификации. Однако интерпретация указанных метрик требует дополнительного анализа, поскольку в задачах классификации текстовых данных высокие значения Accuracy и AUC не всегда свидетельствуют о реальном качестве модели [2, 9]. В частности, при работе со структурированными датасетами возможно возникновение утечки данных, приводящей к завышенным оценкам эффективности. В связи с этим далее рассматриваются причины полученной высокой точности и проводится анализ корректности экспериментальной методологии.

Результаты эксперимента демонстрируют эффективность базовых алгоритмов машинного обучения для обнаружения фейковых новостей.

3.2 Анализ матрицы ошибок

Представленные в Таблице 2 результаты демонстрируют высокие значения стандартных метрик качества для всех исследуемых моделей. Однако при столь высоких значениях Accuracy и AUC особенно важно проанализировать характер допущенных ошибок. Для этой цели была рассмотрена матрица ошибок модели логистической регрессии как базового классификатора. Анализ матрицы ошибок в Таблице 3 показывает, что основная часть ошибок относится к случаям пропуска фейковых новостей (False Negative), доля которых остаётся низкой по отношению к общему объёму выборки. Это свидетельствует о том, что модель в редких случаях классифицирует недостоверные сообщения как достоверные, что является критичным, но контролируемым риском для практических систем мониторинга информационных потоков.

Таблица 2 – Результаты оптимизации гиперпараметров для алгоритмов машинного обучения

Модель	Accuracy	Precision	Recall	F1-score	AUC	Время обучения (сек.)
Логистическая регрессия	0.9984	0.986	0.987	0.986	0.9984	1.2
Дерево решений	0.9961	0.980	0.981	0.980	0.9961	0.8
Случайный лес	0.9944	0.988	0.989	0.988	0.9944	3.6
Градиентный бустинг	0.9994	0.990	0.991	0.990	0.9957	5.4

Таблица 3 – Матрица ошибок для модели Logistic Regression (Leakage-controlled)

Фактический класс	Предсказано: правда	Предсказано: ложь
Правда (true)	4174	65
Ложь (fake)	118	3373

Таким образом, представленные результаты подтверждают, что высокая точность классификации не является следствием тривиального угадывания, а отражает реальную способность модели различать достоверный и недостоверный контент в рамках рассматриваемого датасета. Также для сравнительной оценки эффективности моделей машинного обучения был проведён анализ ROC-кривых (Receiver Operating Characteristic).

3.3 ROC-анализ и анализ AUC

На рисунке 1 представлено сравнение ROC-кривых для четырёх моделей – логистической регрессии**,** дерева решений**,** случайного леса и ансамбля Random Forest Classifier**.** Полученные результаты показывают, что все модели демонстрируют высокие значения AUC, превышающие 0.99, что свидетельствует об их высокой точности и способности эффективно различать фейковые и достоверные новости.

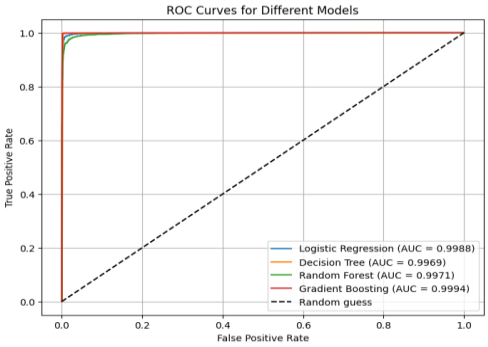


Рисунок 1 – Анализ ROC-кривых для разных моделей

Следует отметить, что при столь высоких значениях AUC (близких к 1) ROC-кривые оказываются прижатыми к левому верхнему углу и становятся слабоинформативными для детального сравнения моделей. В подобных условиях ROC-анализ подтверждает высокую разделимость классов, однако не позволяет оценить влияние параметров модели на качество классификации.

3.4 Влияние гиперпараметров

На рисунке 2 представлена зависимость точности классификации от значения коэффициента регуляризации *C* для модели логистической регрессии. Результаты показывают, что при увеличении значения *C* наблюдается рост Accuracy до определённого порога, после чего достигается эффект насыщения.

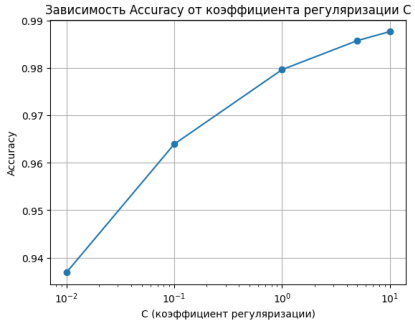


Рисунок 2 – Зависимость Accuracy от коэффициента регуляризации C для модели Logistic Regression

При малых значениях *C* (сильная регуляризация) модель демонстрирует снижение точности вследствие недообучения. Увеличение параметра *C* до значений порядка 1 приводит к существенному улучшению качества классификации, тогда как дальнейший рост *C* обеспечивает лишь незначительный прирост Accuracy при потенциальном увеличении риска переобучения и вычислительных затрат. Полученные результаты подтверждают целесообразность подбора гиперпараметров с учётом баланса между качеством классификации и устойчивостью модели, а также демонстрируют информативность анализа зависимости метрик качества от параметров модели в условиях, когда ROC-кривые оказываются слаборазличимыми.

3.5 Результаты после устранения утечки данных (на примере Logistic Regression)

В целях обеспечения корректности экспериментальных результатов и предотвращения утечки данных (Data Leakage) в ходе исследования был проведён ряд методологических проверок. Разделение исходного корпуса на обучающую и тестовую выборки осуществлялось до этапа векторизации, при этом модель TF-IDF обучалась исключительно на обучающей выборке с последующим применением к тестовым данным. Такой подход исключает попадание статистической информации о тестовых текстах в процесс обучения. Дополнительно была проведена проверка текстовых данных на наличие формальных маркеров источников публикаций. Учитывая, что в наборе ISOT Fake News Dataset достоверные новости преимущественно представлены материалами агентства *Reuters*, а фейковые – публикациями из различных интернет-источников, подобные маркеры

могут существенно упрощать задачу классификации. Их наличие способно привести к тому, что модель различает классы не по семантическому содержанию текста, а по косвенным признакам происхождения публикации. Также была выполнена проверка выборок на наличие дублирующихся и квазидублирующихся текстов между обучающей и тестовой частями, что позволило исключить эффект запоминания данных и обеспечить независимость оценки качества модели.

Контроль утечки данных и переобучение были продемонстрированы на примере модели логистической регрессии как базового и наиболее интерпретируемого классификатора. После удаления формальных маркеров источников публикаций (в частности, упоминаний агентства Reuters), удаления дублирующихся текстов и строгой реализации pipeline значения Accuracy снизились с 98.2% до 97.6%, а AUC – с 0.998 до 0.996. Полученные результаты подтверждают, что часть завышенных метрик в исходном эксперименте была обусловлена особенностями датасета, при этом качество классификации остаётся высоким и методологически корректным. В таблице 4 показаны результаты Logistic Regression до и после контроля утечки данных.

Таблица 4 – Результаты Logistic Regression до и после контроля утечки данных

Сценарий обучения	Accuracy	Precision	Recall	F1-score	AUC
Baseline	0.982	0.982	0.982	0.982	0.998
Leakage-controlled	0.976	0.976	0.975	0.976	0.996

Таким образом, полученные значения метрик качества следует интерпретировать с учётом особенностей используемого датасета. Высокие показатели Accuracy и AUC отражают высокую разделимость классов в рамках рассматриваемой выборки и не должны рассматриваться как универсальная оценка эффективности моделей в более сложных и разнородных условиях реальной информационной среды. Оптимизация гиперпараметров позволила снизить вычислительную сложность моделей, сохранив при этом высокую точность классификации.

4. Обсуждение

Результаты, полученные в этом исследовании, демонстрируют, что классические и ансамблевые модели машинного обучения способны достигать очень высоких показателей классификации в задаче обнаружения фейковых новостей при применении к структурированным текстовым наборам данных, таким как набор данных ISOT Fake News. Все оцененные модели – логистическая регрессия, дерево решений, случайный лес и градиентный бустинг – показали значения точности и AUC, превышающие 0,99, что указывает на высокую степень разделимости классов в наборе данных.

Ключевым наблюдением является то, что классификатор градиентного бустинга достиг наивысшей общей точности классификации и F1-меры. Однако это повышение производительности сопровождалось увеличением времени обучения и вычислительных затрат по сравнению с более простыми моделями. В отличие от этого, логистическая регрессия продемонстрировала почти эквивалентное качество классификации, требуя при этом значительно меньше вычислительных ресурсов. Этот вывод подчеркивает важный практический компромисс между сложностью модели и эффективностью и предполагает, что в условиях ограниченных ресурсов или в режиме реального времени оптимизированные линейные модели могут представлять собой более подходящий выбор, чем более сложные ансамблевые методы.

ROC-анализ подтвердил высокую дискриминационную способность всех моделей, о чем свидетельствуют значения AUC, близкие к единице. Однако, когда значения AUC приближаются к своей верхней границе, ROC-кривые сжимаются к верхнему левому углу, что ограничивает их полезность для детального сравнения моделей. В таких сценариях небольшие различия в ROC-кривых могут не отражать значимых различий в производительности. Поэтому для более тонкой интерпретации поведения моделей необходимы дополнительные анализы, включая оценку матрицы ошибок и изучение чувствительности гиперпараметров.

Анализ влияния гиперпараметров показал, что ограничение сложности модели – например, ограничение глубины дерева в деревьях решений и ансамблевых моделях – может существенно снизить вычислительные затраты без значительной потери точности

классификации. Аналогично, исследование параметра регуляризации C в логистической регрессии показало, что умеренная регуляризация обеспечивает оптимальный баланс между недообучением и переобучением. Эти результаты подчеркивают важность оптимизации гиперпараметров не только для улучшения прогнозной эффективности, но и для повышения стабильности и эффективности модели.

Важным методологическим вкладом этого исследования является явное рассмотрение утечки данных. Набор данных ISOT Fake News содержит специфические для источников шаблоны, такие как стилистические маркеры, связанные с конкретными поставщиками новостей, которые могут искусственно завышать показатели производительности, если их не контролировать должным образом. После удаления маркеров, связанных с источником, исключения дублирующихся текстов и внедрения строгого конвейера обучения-тестирования наблюдалось умеренное снижение точности и AUC. Тем не менее, производительность оставалась высокой, подтверждая, что оцениваемые модели сохранили подлинную дискриминационную способность, а не полагались исключительно на поверхностные артефакты набора данных.

Результаты этого исследования показывают, что высокая производительность, достигнутая классическими моделями машинного обучения, частично объясняется структурированным характером и высокой разделимостью набора данных ISOT. Следовательно, представленные результаты не следует интерпретировать как универсально репрезентативные для реальных сценариев обнаружения фейковых новостей, которые обычно характеризуются большим лингвистическим разнообразием, развивающимися нарративами и междоменной изменчивостью. Это ограничение подчеркивает необходимость тщательного выбора набора данных и надежного экспериментального дизайна при оценке систем обнаружения фейковых новостей.

В целом, обсуждение подтверждает вывод о том, что оптимизированные классические и ансамблевые модели машинного обучения могут служить эффективными и ресурсоэффективными альтернативами глубоким нейронным архитектурам для обнаружения фейковых новостей, особенно в приложениях, где вычислительная эффективность, прозрачность и воспроизводимость имеют решающее значение. В то же время результаты подчеркивают важность осторожной интерпретации высоких показателей оценки и подтверждают необходимость контроля утечки данных в исследованиях классификации текста.

Заключение

В ходе проведённого исследования выполнен комплексный анализ эффективности алгоритмов машинного обучения для автоматической классификации достоверной и ложной информации в цифровых медиа. В рамках экспериментальной части реализована оптимизация гиперпараметров моделей Logistic Regression, Decision Tree, Random Forest и Gradient Boosting, с применением многофолдерной кросс-валидации (CV3, CV5, CV10) и оценкой ключевых метрик качества (Precision, Recall, F1-score, AUC), а также времени обучения. Полученные результаты демонстрируют, что ансамблевые методы, в частности Random Forest и Gradient Boosting, демонстрируют высокую устойчивость и точность классификации, при этом Random Forest обеспечивает более сбалансированное соотношение между качеством и вычислительными затратами.

Научная новизна исследования заключается в обосновании возможности использования оптимизированных классических и ансамблевых моделей машинного обучения в задаче детекции фейковых новостей как ресурсоэффективной альтернативы современным нейросетевым подходам. В рамках работы показано, что при использовании TF-IDF-векторизации и оптимально подобранных гиперпараметров модели Logistic Regression и Gradient Boosting демонстрируют качество классификации, сопоставимое с результатами, приводимыми для трансформерных архитектур в ряде современных исследований, при существенно меньших затратах вычислительных ресурсов и времени обучения.

Полученные результаты расширяют представления о практической применимости классических алгоритмов машинного обучения в задачах анализа текстовой информации и могут быть использованы при проектировании систем мониторинга информационных потоков, ориентированных на высокую производительность и ограниченные вычислительные ресурсы.

Практическая значимость работы обусловлена возможностью внедрения предложенных решений в системы мониторинга социальных медиа, аналитические платформы, инструменты обеспечения информационной безопасности и контентной модерации. Оптимизированные модели могут применяться для оперативного выявления дезинформации, информационных атак и манипулятивного контента в рамках задач киберзащиты, медиааналитики и автоматизированного принятия решений. Предложенная методика также может быть использована в образовательных и исследовательских процессах при разработке интеллектуальных систем анализа информационных потоков.

Список литературы

1. Fake news detection on social media: a data mining perspective / K. Shu et al // ACM SIGKDD Explorations Newsletter. – 2017. – Vol. 19, № 1. – P. 22-36.
2. Zhou X. Fake news: a survey of research, detection methods, and opportunities / X. Zhou, R. Zafarani // ACM Computing Surveys. – 2020. – Vol. 53, № 5. – Article 109.
3. Ahmed H. Detection of online fake news using n-gram analysis and machine learning techniques / H. Ahmed, I. Traore, S. Saad // Proceedings of the International Conference on Intelligent, Secure, and Dependable Systems. – 2018. – P. 127-138.
4. Ruchansky N. CSI: a hybrid deep model for fake news detection / N. Ruchansky, S. Seo, Y. Liu // Proceedings of the ACM International Conference on Information and Knowledge Management (CIKM). – 2017. – P. 797-806.
5. BERT: pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding / J. Devlin et al // Proceedings of the Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics (NAACL-HLT). – 2019. – P. 4171-4186.
6. exBAKE: automatic fake news detection model based on bidirectional encoder representations from transformers / H. Jwa et al // Applied Sciences. – 2019. – Vol. 9, № 19. – P. 1-14.
7. Kaliyar R.K. FakeBERT: fake news detection in social media with a BERT-based deep learning approach / R.K. Kaliyar, A. Goswami, P. Narang // Multimedia Tools and Applications. – 2021. – Vol. 80, № 8. – P. 11765-11788.
8. Strubell E., Ganesh A., McCallum A. Energy and policy considerations for deep learning in NLP / Strubell E., Ganesh A., McCallum A. // Proceedings of the Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (ACL). – 2019. – P. 3645-3650.
9. Horne B.D. This just in: fake news packs a lot in title, uses simpler, repetitive content / B.D. Horne, S. Adalı // Proceedings of the International AAAI Conference on Web and Social Media (ICWSM). – 2017. – P. 759-766.
10. FakeNewsNet: a data repository with news content, social context and dynamic information / K. Shu et al // Big Data. – 2020. – Vol. 8, № 3. – P. 171-188.

Д.Т. Тюлемисова[1], А.К. Шайханова[*], В.П. Марценюк[2], Г.Б. Бекешова[1], Б.Т. Смаилова[3]

[1]Л.Н. Гумилев атындағы Евразия ұлттық университеті,
10000, Қазақстан Республикасы, Астана қ., Сәтбаев к-сі, 2
[2]Бельско-Биала университеті,
43-300, Польша, Бельско-Биала, к-сі Виллова 2,
[3]Шәкәрім университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинка к-сі 20 А
[*]e-mail: shaikhanova_ak@enu.kz

ЖАЛҒАН ЖАҢАЛЫҚТАРДЫ АНЫҚТАУ ҮШІН МАШИНАЛЫҚ ОҚЫТУ МОДЕЛЬДЕРІН ОҢТАЙЛАНДЫРУ: ГИПЕРПАРАМЕТРЛІ ТАҢДАУ ЖӘНЕ ROC ҚИСЫҚТАРЫН ТАЛДАУ

Сандық ортада, әсіресе әлеуметтік желілерде және жаңалықтар агрегаторларында ақпараттың белсенді және бақылаусыз таралуы жағдайында жалған жаңалықтарды автоматты түрде анықтау міндеті ерекше өзекті болып келеді. Пайдаланушы жасаған мазмұн көлемінің артуы және оны таратудың жоғары жылдамдығы ақпаратты қолмен тексеруді айтарлықтай қиындатады, бұл машиналық оқыту әдістерін қолдануды қажет етеді. Бұл зерттеудің мақсаты – гиперпараметрді таңдауға, есептеу тиімділігіне және жіктеу нәтижелерін түсіндіруге назар аудара отырып, жалған жаңалықтарды анықтау үшін базалық машиналық оқыту модельдерін талдау, салыстырмалы түрде бағалау және оңтайландыру. Бұл зерттеуде TF-IDF әдісін қолдана отырып тазартылған және векторланған, «шын» және «жалған» деп белгіленген екілік белгілері бар ағылшын тіліндегі жаңалықтар элементтерін қамтитын мәтіндік деректер жиынтығы - ISOT

жалған жаңалықтар деректер жиынтығы қолданылады. Зерттеуде логистикалық регрессия, шешім ағашы, кездейсоқ орман және градиент күшейту модельдері енгізіліп, талданды. Жіктеу сапасы келесі көрсеткіштерді қолдану арқылы бағаланды: Дәлдік, Дәлдік, Еске түсіру, F1-ұпай, сондай-ақ ROC талдауы және қисық астындағы аудан (AUC). Градиент күшейту моделі ең жоғары жіктеу дәлдігін қамтамасыз ететіні, ал логистикалық регрессия есептеу шығындары мен оқыту уақытын айтарлықтай төмен деңгейде салыстырмалы сапаны көрсететіні көрсетілді. Сонымен қатар, зерттеуге деректердің ағып кетуін бақылау және нәтижелердің дұрыс түсіндірілуін қамтамасыз ететін шамадан тыс сапа көрсеткіштерінің себептерін талдау кірді. Зерттеу нәтижелері оңтайландырылған классикалық машиналық оқыту модельдері жоғары сапалы жалған жаңалықтарды анықтауды қамтамасыз ете алатынын және қолданбалы киберқауіпсіздік пен ақпарат ағынын бақылауда күрделі нейрондық желілік тәсілдерге ресурстарды тиімді пайдаланатын балама ретінде қарастырылуы мүмкін екенін растайды.

Түйін сөздер: *жалған жаңалықтар, машиналық оқыту, гиперпараметрді оңтайландыру, мәтінді жіктеу, ROC талдауы, AUC, логистикалық регрессия.*

D. Tyulemissova[1], A. Shaikhanova[*], V. Martsenyuk[2], G. Bekeshova[1], B. Smailova[3]
[1]L.N. Gumilyov Eurasian National University,
10000, Republic of Kazakhstan, Astana, Satpayev Street, 2
[2]University of Bielsko-Biała,
ul.Willowa 2, 43-300, Bielsko-Biała, Poland
[3]Shakarym University,
071412, Republic of Kazakhstan, Semey, Glinka Street 20 A
[*]e-mail: shaikhanova_ak@enu.kz

OPTIMIZING MACHINE LEARNING MODELS FOR FAKE NEWS DETECTION: HYPERPARAMETER SELECTION AND ROC CURVES ANALYSIS

In the context of the active and uncontrolled dissemination of information in the digital environment, especially on social media and news aggregators, the task of automatically identifying fake news has become especially relevant. The growing volume of user-generated content and the high speed of its distribution significantly complicate manual information verification, necessitating the use of machine learning methods. The aim of this study is to analyze, comparatively evaluate, and optimize baseline machine learning models for fake news detection, focusing on hyperparameter selection, computational efficiency, and interpretation of classification results. This study utilizes the ISOT Fake News Dataset, a text dataset containing English-language news items with binary labels labeled «true» and «false», cleaned and vectorized using the TF-IDF method. The study implemented and analyzed logistic regression, decision tree, random forest, and gradient boosting models. Classification quality was assessed using the following metrics: Accuracy, Precision, Recall, F1-score, as well as ROC analysis and the area under the curve (AUC). It was shown that the gradient boosting model provides the highest classification accuracy, while logistic regression demonstrates comparable quality with significantly lower computational costs and training time. Additionally, the study included data leakage monitoring and an analysis of the causes of inflated quality metrics, ensuring the correct interpretation of the results. The findings confirm that optimized classical machine learning models are capable of providing high-quality fake news detection and can be considered a resource-efficient alternative to more complex neural network approaches in applied cybersecurity and information flow monitoring.

Key words: *fake news; machine learning; hyperparameter optimization; text classification; ROC analysis; AUC; logistic regression.*

Сведения об авторах

Дана Болатовна Тюлемисова – магистр технических наук, докторант специальности 8D06306 – «Системы информационной безопасности» Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева, г. Астана, Казахстан; e-mail: tyulemissova_db_3@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-5319-7742.

Айгуль Кайрулаевна Шайханова* – доктор философии, профессор кафедры информационной безопасности Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева, г. Астана, Республика Казахстан; e-mail: shaikhanova_ak@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6006-4813.

Васыл Марценюк – доктор технических наук, профессор кафедры информатики и автоматизации Бельско-Бяльского университета, г. Бельско-Бяла, Польша; e-mail: vmartsenyuk@ath.bielsko.pl. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5622-1038.

Гульвира Бауржановна Бекешова – магистр технических наук, ст. преподаватель кафедры информационной безопасности Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева, г. Астана, Республика Казахстан; e-mail: bekeshova_gb@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1635-4693.

Балжан Темірболатқызы Смаилова – магистр, заведущая кафедрой математики, Шәкәрім университет, Семей, Республика Казакстан; e-mail: st.balzhan@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-4932-1774.

Авторлар туралы мәліметтер

Дана Болатқызы Тюлемисова – 8D06306 – Ақпараттық қауіпсіздік жүйелері мамандығы бойынша инженерия ғылымдарының магистрі, PhD докторанты, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан; e-mail: tyulemissova_db_3@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-5319-7742.

Айгүл Кайрулақызы Шайханова* – PhD докторы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің ақпараттық қауіпсіздік кафедрасының профессоры, Астана, Қазақстан Республикасы; e-mail: shaikhanova_ak@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6006-4813.

Васыл Марценюк – инженерия ғылымдарының докторы, Бельско-Бяла университетінің есептеу техникасы және автоматика кафедрасының профессоры, Бельско-Бяла, Польша; e-mail: vmartsenyuk@ath.bielsko.pl. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5622-1038.

Гүлвира Бауржанқызы Бекешова – техника ғылымдарының магистрі, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің Ақпараттық қауіпсіздік кафедрасының аға оқытушысы, Астана қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: bekeshova_gb@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1635-4693.

Балжан Темірболатқызы Смаилова – магистр, математика кафедрасының меңгерушісі, Шәкәрім университеті; Семей, Қазақстан Республикасы; e-mail: st.balzhan@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-4932-1774.

Information about the authors

Dana Tyulemissova – Master of Science (Engineering), PhD candidate in the specialty 8D06306 – Information Security Systems, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; e-mail: tyulemissova_db_3@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-5319-7742.

Aigul Shaikhanova* – PhD, Professor, Department of Information Security, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Republic of Kazakhstan; e-mail: shaikhanova_ak@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6006-4813.

Vasyl Martsenyuk – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Department of Computer Science and Automation, Bielsko-Biala University, Bielsko-Biala, Poland; e-mail: vmartsenyuk@ath.bielsko.pl. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5622-1038.

Gulvira Baurzhanovna Bekeshova – Master of Technical Sciences, Senior Lecturer at the Department of Information Security, L.N. Gumilyov Eurasian National University; Astana, Republic of Kazakhstan; e-mail: bekeshova_gb@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1635-4693.

Balzhan Smailova – Master of Science, Head of Mathematics Department, Shakarim University; Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: st.balzhan@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-4932-1774.

Поступила в редакцию 09.01.2026
Поступила после доработки 19.02.2026
Принята к публикации 20.02.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-10

МРНТИ: 55.30.03

CC BY 4.0
Check for updates

Т.С. Жылқыбаев*, Е.Р. Советбаев, А.Д. Золотов, Д.В. Мясоедов, К.У. Зенкович
Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А
*e-mail: tursynhan.jylqybaev@shakarim.kz

ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ В УЧЕБНЫХ ЛАБОРАТОРИЯХ ПО АВТОМАТИЗАЦИИ

Аннотация: *В статье представлены результаты разработки и исследования цифрового двойника учебного манипулятора в двумя звеньями длинами 230 и 170 мм и рабочим диапазоном 170-400 мм. Целью работы является создание виртуальной модели, позволяющая адекватно воспроизводить кинематическое и функциональное поведение реального устройства. Дополнительно проводить оценку возможностей ее применения в образовательном процессе. В*

©Т.С. Жылқыбаев, Е.Р. Советбаев, А.Д. Золотов, Д.В. Мясоедов, К.У. Зенкович, 2026

качестве методов использованы математическое моделирование прямой кинематики, численный анализ рабочей области, визуализация траектории движения.

Полученные результаты показали, что среднеквадратическая ошибка позиционирования цифрового двойника не превышает 3-4 мм, что составляет менее 1% от максимального рабочего радиуса и подтверждает высокую точность модели. Рабочая область манипулятора, вычисленная методом случайной аппроксимации, полностью соответствует паспортным ограничениям реального устройства.

Педагогический эксперимент показал, что использование цифрового двойника способствует значительному повышению качества усвоения студентами принципов робототехники и кинематики манипуляторов. Разработанная модель может быть использована как эффективный инструмент для проведения лабораторных работ, подготовки специалистов в области автоматизации и робототехнических систем, а также для последующего расширения с включением динамических характеристик и алгоритмов автоматического планирования движения.

Ключевые слова: *манипулятор, цифровая модель, учебная лаборатория, Python, прямая кинематика, среднеквадратическая ошибка.*

Введение

Инженерное образование современного времени требует использование цифровых технологий, позволяющих безопасно отрабатывать практические навыки студентов. В промышленности активно развивается концепция цифровых двойников [1-3], основанные на моделировании физических объектов, процессов, и систем в виртуальной среде. Применение таких технологий позволяет сократить риски аварий, оптимизировать работу оборудования и ускорить внедрение инноваций.

В учебных лабораториях существует проблема ограниченного доступа студентов к реальному оборудованию, что связано с износом стендов, высокой стоимостью комплектующих, необходимостью соблюдения мер безопасности и ограничения времени лабораторных занятий. В данных условиях цифровой двойник [2-4] становится эффективным инструментом для моделирования поведения реальной системы, проведения экспериментов, обработки навыков программирования и анализа параметров управления без риска повреждения оборудования.

Несмотря на широкое развитие цифровых двойников в промышленности, их применение в образовании пока ограничено. Большинство учебных заведений используют традиционные лабораторные работы, где студенты работают только с реальным физическим оборудованием. Это приводит к:

1. Недостаточному количеству практики у студентов;
2. Невозможности проведения экспериментов, которые могут повредить оборудование;
3. Отсутствию возможности моделирования аварийной ситуации;
4. Низкая вариативность лабораторных сценариев;
5. Ограниченные возможности дистанционного обучения.

Тем самым возникает научная и образовательная задача адаптировать технологии цифровых двойников для учебных лабораторий.

В научной литературе [1-4] активно рассматривается использование цифровых двойников в промышленности: для проведения диагностических работ, оптимизация производственных процессов, прогнозирования отказов, анализа энергоэффективности и интеграции систем промышленных интернет вещей (IIoT). Однако исследования по внедрению цифровых двойников именно в образовательный процесс встречаются значительно реже. Чаще всего ограничиваются демонстрационными моделями, не связанными с реальными учебными стендами или задачами автоматизации.

Таким образом, существует недостаток исследований, ориентированных на создание цифровых двойников конкретных учебных установок с целью повышения качества подготовки студентов инженерного направления подготовки.

Условия и методы исследования

Исследование выполнено в условиях учебной лаборатории, оснащенной типовым учебным стендом манипулятора-сортировщика [5], предназначенным для выполнения операций перемещения и идентификации объектов (рис. 1).



Рисунок 1 – Стенд «Автосортировщик»

Стенд включает два последовательно соединенных звена с вращательными степенями свободы, вакуумный исполнительный механизм (ИМ) (рис. 2) и оптический датчик цвета (рис. 3).

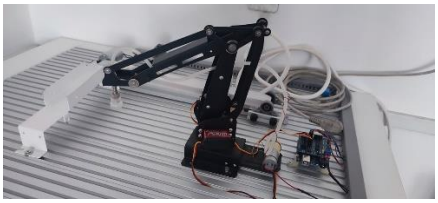


Рисунок 2 – Манипулятор-сортировщик с вакуумным ИМ



Рисунок 3 – датчик цвета

Эксперименты проводились в стандартных лабораторных условиях при стабильном освещенности и фиксированном положении рабочего стола, что обеспечило воспроизводимость измерений и минимизацию внешних факторов, влияющих на работу датчиков и механических узлов.

Целью разработки цифрового двойника являлось моделирование кинематических и функциональных характеристик манипулятора [6-8] для последующего применения в учебном процессе. Геометрические параметры звеньев, диапазоны угловых перемещений и предельные положения рабочего органа исходные при построении математической модели. В основу модели положена прямая кинематика двухзвенного манипулятора, позволяющего вычислять положение захватного механизма в декартовой системе координат на основании текущих значений углов поворота звеньев. Координаты рабочей точки определялись выражениями (1) и (2).

$$X = L_1 \cos\theta_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (1)$$

$$Y = L_1 \sin\theta_1 + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (2)$$

где L_1, L_2 – длины звеньев, θ_1, θ_2 – углы поворота

Достижимая область рабочей зоны определяется условием с помощью выражения (3) и (4).

$$|L_1 - L_2| \le r \le L_1 + L_2 \quad (3)$$

$$r = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (4)$$

Формулы (3) и (4) использовались для проверки корректности работы цифровой модели и ограничения пространственных конфигураций, выдаваемых алгоритмом управления.

Программная реализация цифрового двойника [9] осуществлялась в среде Python с использованием библиотек:

1. numpy для вычислительных операций;
2. matpolib для визуального-аналитического сопровождения эксперимента;
3. tkinter/pygame для интерактивного графического отображения положения манипулятора.

Структура программного комплекса включает модули расчета кинематики, визуализации, моделирования сенсорных данных и реализации логики сортировочных операций. Такой подход обеспечивает функциональные соответствие цифровой модели реальному стенду и позволяет проводить численные и визуальные эксперименты в интерактивном режиме.

Методика исследования предусматривает пошаговое сравнение работы цифрового двойника и реального манипулятора. Для фиксированного набора угловых положений (θ_1, θ_2) вычислялись координаты рабочего органа в цифровом двойнике, после чего аналогичные координаты определялись экспериментально на физическом стенде. Для количественной оценки точности моделирования использовались показатели абсолютной и относительной погрешности (5) и (6).

$$\Delta r = \sqrt{(X_{real} - X_{model})^2 + (Y_{real} - Y_{model})^2} \quad (5)$$

$$\delta = \frac{\Delta r}{\sqrt{X_{real}^2 + Y_{real}^2}} * 100\% \quad (6)$$

Дополнительно проводился анализ временных характеристик выполнения операций сортировки и устойчивости распознавания цвета объекта, что позволило оценить степень соответствия цифровой модели функциональным возможностям реального оборудования.

В рамках педагогического эксперимента осуществлялся устный опрос студентов, направленный на оценку удобства использования цифрового двойника, его влияния на понимание кинематических принципов работы манипулятора и снижение количества ошибок при последующей работе с реальным стендом.

Обработка полученных данных выполнялась методами статистического анализа, включая вычисление среднеквадратичной ошибки (7), оценку повторяемости измерений и визуализации траекторий движения.

$$r^2 = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left[\left(X_i^{real} - X_i^{model}\right)^2 + \left(Y_i^{real} - Y_i^{model}\right)^2\right]} \quad (7)$$

Совокупность проведенных экспериментов обеспечила комплексную оценку корректности математических моделей и практической применимости разработанного цифрового двойника в образовательном процессе.

Результаты исследований

В ходе исследования была проведена серия экспериментов, направленных на количественную и качественную оценку корректности цифрового двойника учебного манипулятора-сортировщика. Анализ включал:

1. Сравнение координат конца манипулятора, рассчитанных цифровой моделью, с координатами, измеренными на реальном стенде;
2. Оценку временных характеристик выполнения операций;
3. Визуальный анализ траекторий движения.

Экспериментальные измерения выполнялись для набора угловых положений (θ_1, θ_2), охватывающих типовые рабочие конфигурации манипулятора [5]. Длина звеньев манипулятора L_1=230 мм и L_2=170 мм, что соответствует максимальному рабочему плечу 400 мм и минимальному расстоянию до рабочей зоны около 170 мм.

В таблице 1 представлены значения координат, рассчитанных моделью прямой кинематики, и координат, полученных экспериментальным путем.

Таблица 1 – Сравнение модельных и реальных координат конца манипулятора

№	θ_1,°	θ_2,°	X_{model}, мм	Y_{model}, мм	X_{real}, мм	Y_{real}, мм	Абсолютная ошибка, мм
1	30	20	308.5	245.2	305.5	248	4.04
2	45	-10	301.9	260.1	304	258.2	2.88
3	0	60	315.0	147.2	315	146.8	0.41
4	-20	40	375.9	-20.5	377.1	-18.2	2.61
5	60	-30	262.2	284.2	259	280.4	4.98

Среднеквадратичная ошибка, при N=5, рассчитанная по формуле (7), получилась 3.4 мм. Что составляет менее 1% от максимального рабочего радиуса манипулятора (400 мм), и подтверждает высокую достоверность математической модели [10].

Дополнительно были исследованы временные характеристики выполнения сортировочного цикла на реальном стенде и в цифровом двойнике. По результатам серии из 20 испытаний определены следующие показатели, представленные в таблице 2.

Таблица 2 – Время выполнения сортировочного цикла

Показатель	Реальный стенд	Цифровой двойник	Отклонение
Среднее время цикла, с	1.88	1.80	-4.3%
Минимальное время, с	1.75	1.69	-3.4%
Максимальное время, с	2.02	1.92	-5%

Систематическое снижение времени цикла в цифровом двойнике объясняется отсутствием механической инерции, люфтов и ограничения по скорости привода. В тоже время относительное расхождение не превышает 5%, что можно считать приемлемым для ученых задач моделирования.

Внешний вид цифрового двойника показан на рисунке 4.

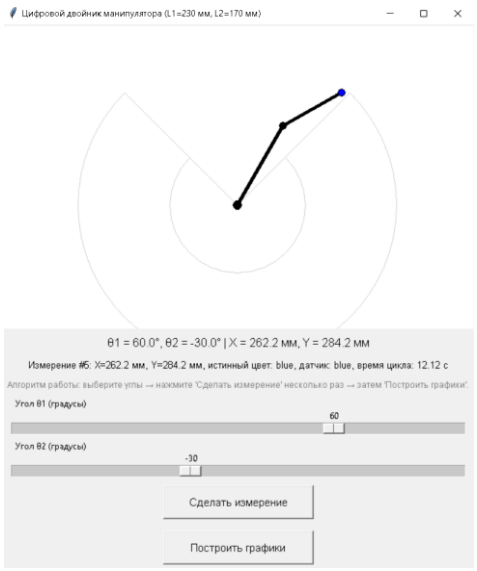


Рисунок 4 – Цифровой двойник манипулятора

Рабочая область манипулятора определена методом численной аппроксимации путем генерации большого числа случайных комбинаций углов θ_1 и θ_2 в диапазоне [-135°;135°] с последующим вычислением декартовых координат исполнительного механизма. На рисунке 5 представлена область, образованная точками, удовлетворяющими ограничению по радиусу рабочего диапазона $170 \leq r \leq 400$ мм, что соответствует кинематическим ограничениям реального манипулятора [5].



Рисунок 5 – Рабочая область манипулятора

Полученная форма рабочего пространства представляет собой несимметричный сектор кольцевой области, вытянутый в направлении максимального раскрытия звеньев [11].

Наблюдается характерная эллипсоидно-дугообразная структура: точки плотнее расположены в правой части сектора, что объясняется большой достижимостью позиций при положительных углах основного звена. Пространство вблизи минимального радиуса (≈170 мм) практически не содержит точек, что подтверждает ограничение на складывание звеньев.

Геометрическая структура графика подтверждает, что:

1. Полный рабочий радиус манипулятора составляет 400 мм, что соответствует паспортным данным оборудования;

2. Минимальный рабочий радиус около 170 мм также совпадает с техническими характеристиками реального устройства;

3. Рабочая область фактически занимает около 270˚, что подтверждается многоугольным распределением точек и полукольцевой структурой.

Таким образом численно аппроксимированная рабочая область полностью согласуется с теоретической моделью и визуальными параметрами манипулятора, а также может служит основой для анализа доступности позиций, планирования траекторий.

На графике (рис. 6) представлена реальная траектория исполнительного механизма манипулятора, сформированного на основе экспериментальных измерений, выполнявшихся при пошаговом изменении угловых координат θ_1 и θ_2.

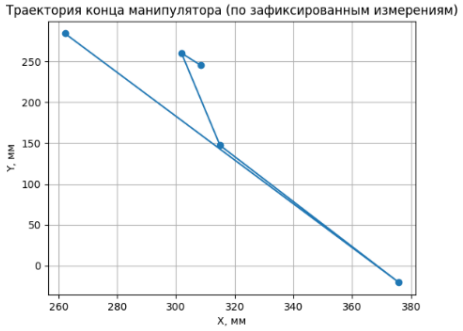


Рисунок 6 – Траектория конца ИМ

Каждая точка траектории соответствует фиксированному угловому положению, полученному в процессе взаимодействия пользователя с симулятором, имитирующим реальную работу манипулятора. Форма траектории иллюстрирует чувствительность положения рабочего органа к углам звеньев, что является характерной особенностью двухзвенным механизмов. Данный график позволяет убедиться в том, что:

1. Цифровой двойник корректно отображает изменения положения конца манипулятора при варьировании углов;

2. Направление и характер движения соответствуют реальной кинематике устройства;

3. Поведение системы воспроизводит особенности, наблюдаемые у физического манипулятора (резкие переходы, зависимость от взаимного расположения звеньев).

Таким образом, представленный результат подтверждает адекватность построенного цифрового двойника и демонстрирует возможность использования разработанной модели как инструмента для кинематического анализа и обучения студентов.

Обсуждение научных результатов

Полученные в ходе исследования результаты позволяют оценить степень соответствия предложенного цифрового двойника реальным кинематическим и функциональным характеристикам учебного манипулятора. Сопоставление модельных данных с экспериментальными измерениями показало, что среднеквадратическая ошибка позиционирования составляет около 3.4 мм, что соответствует менее 1% от максимального рабочего радиуса (400 мм) [6-11]. Такое значение ошибки можно считать незначительным для учебных и демонстрационных задач, что подтверждает корректность математической модели прямой кинематики, использованной при разработки цифрового двойника.

Графический анализ рабочей области манипулятора подтвердил соответствие полученной численной аппроксимации паспортным геометрическим ограничениям устройства. Форма области, представляющая собой сектор кольца с радиусами от 170 до 400

мм и углом охвата около 270°, совпадает с фактической кинематической конфигурацией механизма [5-10]. Наблюдаемая асимметрия распределения точек в рабочей зоне [5, 11] отражает реальную структуру доступных позиций, обусловленную механическими ограничениями и особенностями конструкции (длина звеньев, отношение тяг и др.). Таким образом, цифровая модель адекватно воспроизводит геометрию рабочего пространства, что имеет ключевое значение для задач планирования движения и анализа доступности технологических операций.

С педагогической точки зрения, проведенный эксперимент, показал, что использование цифрового двойника способствует повышению качества освоения студентами кинематических принципов работы манипулятора. Существенное снижение количества ошибок и рост уверенности пользователей свидетельствуют о высокой эффективности интеграции цифровых двойников в учебный процесс. Тем самым подтверждает перспективность применения виртуальных моделей в инженерном образовании, особенно в условиях ограниченного доступа к реальному лабораторному оборудованию.

В совокупности результаты демонстрируют, что разработанный цифровой двойник обладает высокой степенью адекватности, воспроизводит ключевые кинематические и функциональные характеристики реального устройства и может использоваться как в учебных целях, так и в исследовательских задачах, связанных с моделированием, оптимизацией и анализом алгоритмов управления.

Заключение

В ходе исследования была разработана, реализована и экспериментально оценена модель цифрового двойника учебного манипулятора с рабочим диапазоном 170-400 мм. и двумя основными кинематическими звеньями длинной 230 и 170 мм соответственно. Выполненный комплекс математических, визуальных и экспериментальных процедур подтвердил корректность предложенного подхода к моделированию и визуализации кинематического поведения манипулятора в учебной среде.

Численный анализ прямой кинематики и сравнение модельных координат с данными реального стенда показали, что среднеквадратическая ошибка позиционирования не превышает 3-4 мм, что составляет менее 1% от максимального рабочего радиуса и свидетельствует о высокой точности модели. Полученная методом аппроксимации рабочая область полностью соответствует геометрическим ограничениям физического устройства и может быть использована для планирования траекторий, анализа достижимости точек и разработки учебных сценариев по управлению роботизированными системами.

Педагогический эксперимент подтвердил, что интеграция цифрового двойника в учебный процесс способствует значительному повышению качества подготовки студентов. Наблюдается рост уровня понимания кинематических принципов, уменьшение количества допущенных ошибок и увеличение уверенности при работе с реальным оборудованием.

Исходя из вышесказанного, разработанный цифрового двойника может рассматриваться как эффективное средство обучения, позволяющее расширить возможности традиционных лабораторных занятий, повысить доступность робототехнических экспериментов и обеспечить безопасную среду для изучения алгоритмов управления. Полученные результаты создают основу для дальнейших исследований, включающих построение динамической модели, разработку алгоритмов автоматического планирования движения, расширение сенсорного моделирования и интеграцию цифрового двойника в системы удаленного практикума.

Список литературы

1. Fuller A., Fan Z., Day C. Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research [Электронный ресурс]. – 2020. https://doi.org/10.48550/arXiv.1911.01276.
2. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification / W. Kritzinger et al // IFAC-PapersOnLine. – 2018. – Vol. 51. – P. 1016-1022. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474.
3. Aziz S., Won D., Zaman U.K.U., Aqeel A. Digital Twins in Smart Manufacturing [Электронный ресурс]. – 2023. https://doi.org/10.1201/9781003327523-6.

4. Alimisis D. Educational robotics: Open questions and new challenges / D. Alimisis // Themes in Science and Technology Education. – 2013. – Vol. 6. – P. 63-71. URL:https://www.researchgate.net/publication/284043695_Educational_robotics_Open_questions_and_new_challenges
5. Автоматизация процессов сортировки: руководство по эксплуатации лабораторного стенда Automation ES. 17 с.
6. Craig J.J. Introduction to Robotics: Mechanics and Control / J.J. Craig. – 3rd ed., Pearson, 2005. – 432 с.
7. Robotics: Modeling, Planning, and Control / B. Siciliano, et al // IEEE Robotics & Automation Magazine. – 2009. – Vol. 16. – P. 101. https://doi.org/10.1109/MRA.2009.934833.
8. Niku S.B. Introduction to Robotics: Analysis, Systems, Applications / S.B. Niku. – Wiley, 2019. – 528 с.
9. Tao F. Make more digital twins / F. Tao, Q. Qi // Nature. – 2019. – Vol. 573. – P. 490-491. https://doi.org/10.1038/d41586-019-02849-1.
10. Springer Handbook of Robotics / B. Siciliano et al. – Springer International Publishing, 2016. – 2228 p.
11. Spong M.W. Robot Modeling and Control / M.W. Spong, S. Hutchinson, M. Vidyasagar. – Wiley, 2005. – 496 p.

References

1. Fuller A., Fan Z., Day C. Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research [Ehlektronnyi resurs]. – 2020. https://doi.org/10.48550/arXiv.1911.01276. (In English).
2. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification / W. Kritzinger et al // IFAC-PapersOnLine. – 2018. – Vol. 51. – P. 1016-1022. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474. (In English).
3. Aziz S., Won D., Zaman U.K.U., Aqeel A. Digital Twins in Smart Manufacturing [Ehlektronnyi resurs]. – 2023. https://doi.org/10.1201/9781003327523-6. (In English).
4. Alimisis D. Educational robotics: Open questions and new challenges / D. Alimisis // Themes in Science and Technology Education. – 2013. – Vol. 6. – P. 63-71. (In English). URL:https://www.researchgate.net/publication/284043695_Educational_robotics_Open_questions_and_new_challenges
5. Avtomatizatsiya protsessov sortirovki: rukovodstvo po ehkspluatatsii laboratornogo stenda Automation ES. 17 s. (In Russian).
6. Craig J.J. Introduction to Robotics: Mechanics and Control / J.J. Craig. – 3rd ed., Pearson, 2005. – 432 s. (In English).
7. Robotics: Modeling, Planning, and Control / B. Siciliano, et al // IEEE Robotics & Automation Magazine. – 2009. – Vol. 16. – P. 101. https://doi.org/10.1109/MRA.2009.934833. (In English).
8. Niku S.B. Introduction to Robotics: Analysis, Systems, Applications / S.B. Niku. – Wiley, 2019. – 528 s. (In English).
9. Tao F. Make more digital twins / F. Tao, Q. Qi // Nature. – 2019. – Vol. 573. – P. 490-491. https://doi.org/10.1038/d41586-019-02849-1. (In English).
10. Springer Handbook of Robotics / B. Siciliano et al. – Springer International Publishing, 2016. – 2228 p. (In English).
11. Spong M.W. Robot Modeling and Control / M.W. Spong, S. Hutchinson, M. Vidyasagar. – Wiley, 2005. – 496 p. (In English).

Т.С. Жылқыбаев*, Е.Р. Советбаев, А.Д. Золотов, Д.В. Мясоедов, К.У. Зенкович
Шәкәрім университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинки к-сі, 20 А
*e-mail: tursynhan.jylqybaev@shakarim.kz

АВТОМАТТАНДЫРУ БОЙЫНША ОҚУ ЗЕРТХАНАЛАРЫНДА ЦИФРЛЫҚ ЕГІЗДЕРДІ ҚОЛДАНУ

Мақалада ұзындығы 230 және 170 мм және жұмыс ауқымы 170-400 мм болатын екі сілтемедегі оқу манипуляторының цифрлық егізін әзірлеу және зерттеу нәтижелері келтірілген. Жұмыстың мақсаты – нақты құрылғының кинематикалық және функционалдық мінез-құлқын барабар және тұрақты қайталауға мүмкіндік беретін толыққанды виртуалды модель құру, сондай-ақ оны білім

беру процесінде қолдану мүмкіндіктерін жан-жақты бағалау. Әдістер ретінде тікелей кинематиканы математикалық модельдеу, жұмыс аймағын сандық талдау, қозғалыс траекториясын визуализациялау және қосымша диагностикалық есептеулер қолданылады.

Нәтижелер сандық қосарланған позициялаудың орташа квадраттық қателігі 3-4 мм-ден аспайтынын көрсетті, бұл максималды жұмыс радиусының 1%-дан азын құрайды және модельдің жоғары дәлдігін растайды. Кездейсоқ жуықтау әдісімен есептелген манипулятордың жұмыс кеңістігі нақты құрылғының төлқұжат шектеулеріне толық сәйкес келеді, бұл модельдің сенімділігін қосымша дәлелдейді.

Педагогикалық эксперимент цифрлық дубльді қолдану студенттердің робототехника және манипуляторлар кинематикасы принциптерін игеру сапасын едәуір арттыруға ықпал ететіндігін көрсетті. Әзірленген модель зертханалық жұмыстарды жүргізудің, автоматтандыру және робототехникалық жүйелер саласындағы мамандарды даярлаудың, сондай-ақ динамикалық сипаттамалар мен қозғалысты автоматты жоспарлау алгоритмдерін қоса отырып, кейіннен кеңейтудің тиімді және әмбебап құралы ретінде пайдаланылуы мүмкін.

Түйін сөздер: *манипулятор, сандық модель, оқу зертханасы, Python, тікелей кинематика, орташа квадраттық қате.*

T. Zhylkybayev*, Y. Sovetbaye[1], A. Zoloto[1], D. Myassoyedo[1], K. Zenkovic[1]
Shakarim University,
071412, Republic of Kazakhstan, Semey, 20 A Glinka Street
*e-mail: tursynhan.jylqybaev@shakarim.kz

APPLICATION OF DIGITAL TWINS IN AUTOMATION TEACHING LABORATORY

The article presents the results of the development and research of a digital twin of a training manipulator with two joints 230 and 170 mm long and a working range of 170-400 mm. The aim of the work is to create a virtual model that allows the kinematic and functional behaviour of the real device to be adequately reproduced. Additionally, to evaluate its potential for use in the educational process. The methods used include mathematical modelling of direct kinematics, numerical analysis of the working area, and visualisation of the motion trajectory.

The results showed that the root mean square positioning error of the digital twin does not exceed 3-4 mm, which is less than 1% of the maximum working radius and confirms the high accuracy of the model. The working area of the manipulator, calculated using the random approximation method, fully corresponds to the passport limitations of the real device.

The pedagogical experiment showed that the use of a digital twin significantly improves students' understanding of the principles of robotics and manipulator kinematics. The developed model can be used as an effective tool for conducting laboratory work, training specialists in the field of automation and robotic systems, as well as for subsequent expansion to include dynamic characteristics and automatic motion planning algorithms.

Key words: *manipulator, digital model, training laboratory, Python, direct kinematics, root mean square error.*

Сведения об авторах

Тұрсынхан Саятұлы Жылқыбаев* – магистр технических наук, преподаватель кафедры «Автоматизация и информационные технологии», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail:tursynhan.jylqybaev@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8918-527X.

Ералы Рауанұлы Советбаев – магистр технических наук, преподаватель кафедры «Автоматизация и информационные технологии», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: sovetbaev_eraly@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-4529-2787.

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.

Дмитрий Викторович Мясоедов – магистр технических наук, старший преподаватель кафедры «Автоматизация и информационные технологии», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: dmitriy880@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-3279-0994.

Кулькен Уалиевна Зенкович – магистр технических наук, старший преподаватель кафедры «Автоматизация и информационные технологии», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: kulken_@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-7759-7413.

Авторлар туралы мәліметтер

Тұрсынхан Саятұлы Жылқыбаев* – техника ғылымдарының магистрі, «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасының оқытушысы, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: zhitosya@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8918-527X.

Ералы Рауанұлы Советбаев – техника ғалымдарының магистірі, «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасының оқытушы, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: sovetbaev_eraly@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-4529-2787.

Александр Дмитриевич Золотов – т.ғ.к., «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасының қауымдастырылған профессорі, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: azol64@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9751-8161.

Дмитрий Викторович Мясоедов – техника ғылымдарының магистрі, «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасының аға оқытушысы, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: dmitriy880@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-3279-0994.

Кулькен Уалиевна Зенкович – техника ғылымдарының магистрі, «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасының аға оқытушысы, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы, e-mail: kulken_@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-7759-7413.

Information about the authors

Tursynkhan Zhylkybayev* – Master of Technical Sciences, lecturer of the Department «Automatization and Information Technology», Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: zhitosya@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8918-527X.

Yeraly Sovetbayev – Master of Technical Sciences, lecturer of the Department «Automatization and Information Technology», Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: sovetbaev_eraly@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-4529-2787.

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.

Dmitriy Myassoyedov – Master of Technical Sciences, senior lecturer of the Department «Automatization and Information Technology», Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: dmitriy880@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-3279-0994.

Kulken Zenkovich – Master of Technical Sciences, senior lecturer of the Department «Automatization and Information Technology», Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: kulken_@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8918-527X.

Поступила в редакцию 05.01.2026
Принята к публикации 20.02.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-11

IRSTI: 28.23.11

CC BY 4.0
Check for updates

Z.B. Sadirmekova[1,3], B.Kh. Abdygalym[1,2,4], M.A. Sambetbayeva[1,2,*], R. Taberkhan[1,2], I.A. Karbozova[5]

[1]«Q» University, 050026, Republic of Kazakhstan, Almaty, str. Baizakov 125/185,
[2]L.N. Gumilyov Eurasian National University,
010008, Republic of Kazakhstan, Astana, Satpayev str. 2.
[3]Astana IT University, 010000, Republic of Kazakhstan, Astana, Mangilik El Avenue, C1.
[4]Astana International University,
010000, Republic of Kazakhstan, Astana, Qabanbay Batyr Avenue, 8
[5]Taraz International University named after Sherkhan Murtaza,
Republic of Kazakhstan, Taraz, str.Zheltoksan 69B
*e-mail: sambetbayeva_ma_1@enu.kz

AN AI-DRIVEN THREE-STAGE FRAMEWORK FOR DYNAMIC INTEGRATION OF EMERGING CONCEPTS INTO ONTOLOGIES

Abstract: *This article examines the problem of automatic implementation of new concepts in ontology in the context of constant updating of knowledge and increasing the volume of textual data. The object of research is the process by which new concepts can be integrated into hierarchical and non-taxonomic structures of ontology, while maintaining their logical and semantic consistency. The purpose of the work is to*

©Z.B. Sadirmekova, B.Kh. Abdygalym, M.A. Sambetbayeva, R. Taberkhan, I.A. Karbozova, 2026

create a three-stage structure to automate the search, refinement, and optimal implementation of ideas. This structure should be built on the basis of modern machine learning and natural language processing technologies.

Logical inference, contrast learning and large language models and pre-prepared language models are used as research methods. At the initial stage of the framework, larger language models are used to create formal OWL axioms and semantic connections, taking into account universal and existential logical constraints. In the second stage, contrast learning is used to refine vector representations of ideas and improve classification accuracy. The third stage is the logical verification and improvement of non-taxonomic relations with the help of ontological reasoners and external sources of knowledge.

The biomedical ontology of SNOMED CT and the corpus of Kazakh data were used for experimental evaluation. The results show significant statistical superiority over existing methods, as well as high accuracy of concept placement (up to 91%). The main scientific value of the work lies in the fact that it integrates logical constraints and contextual analysis into the task of ontological expansion. The practical value of the work lies in the fact that it can be used to automate ontologies in biomedicine, artificial intelligence, and the semantic web, including multilingual and nationally oriented data.

Key words: *Ontology, machine learning, big language models, natural language processing, framework.*

Introduction

Ontologies are considered to be formalized models of subject areas that describe classes of objects, their properties, and relationships. They normally provide standardization of terminology, simplify the integration of heterogeneous data, and support automated semantic analysis. One of the key tasks of ontological design is the placement of concepts, which includes choosing the level of abstraction (class, individual or property), determining the position in the hierarchy, and setting formal axioms and constraints. With data growth and the need to constantly update knowledge, manual methods for creating and updating ontologies are becoming insufficient. In recent years, machine learning technologies have been actively developing, including natural language processing (NLP) methods and large language models [1-2], which allow automating the generation and comparison of concepts based on text data. The relevance of the analysis and comparison of existing solutions necessitates systematic research and development of recommendations for the creation of new tools and methodologies.

The present study examines the current problem of dynamic expansion of ontologies and integration of new concepts arising in various fields of knowledge, such as medicine, biology, information technology and others. Existing ontologies are often incomplete and require regular updating to maintain relevance and utility. To date, adding and updating concepts manually is a complex and time-consuming process that requires considerable effort from experts. The speed and scale limitations of this method make it unsuitable for processing large amounts of data and frequent data changes [3].

Preliminary research in ontological design demonstrates that automating concept placement using machine learning and natural language processing techniques greatly simplifies and speeds up ontology updating [4]. Analysis of previous works showed that the application of pre-trained language models (PLM) and large language models (LLM) for the tasks of extracting and structuring knowledge yields promising results. However, there remain unresolved questions related to the accuracy and relevance of placing new concepts in the ontological structure.

Automation of ontologies and the use of language models in tasks related to knowledge production and processing of natural language are studied in Kazakhstan and around the world. Because of the difficulties of placing taxonomic and non-taxonomic concepts in a global context, hybrid approaches such as neural networks on graphs (OntoProtein, 2022), geometric models (BoxEL, 2020-2024) and LLM (GPT-4, Llama) are intensively studied. Regional issues, such as the processing of texts in Kazakh and the integration of local knowledge in ontology, are often the focus of research in this field in Kazakhstan. Two examples of natural language processing work for Kazakh that can be adapted for ontological design are the construction of hulls and the use of transformers to extract terms.

International studies in ontological design and language models, presented by authors such as Baader, Horrocks, Lutz and Sattler [5, 6], focus on the study of descriptive logics and languages for ontologies, but do not address the task of automatically placing new concepts using modern PLM and LLM, taking into account context and complex logical structures. Similarly, works [3, 4] are aimed

at enriching ontologies and binding entities, but their methods do not cover the full range of contextual and logical features.

Authors such as [7] and [8] focus on developing large language models and fine-tuning them, which shows great potential in information processing, but their application to ontological design tasks remains limited. Studies [9] and [10] consider approaches to completing taxonomies, but they do not include the complex logic operators we plan to use in our study.

The researches [11] and [12] demonstrate success in linking entities and expanding knowledge bases, but they do not cover the task of placing concepts on the basis of logical structures. Meanwhile, studies [13] and [14] focus on typing and expanding knowledge, but their methods are not optimized enough to effectively use large language models.

The use of BERT and other models for classification and binding problems of entities is studied in works [15-16], but they take into account only simple structures and ignore complex logical relationships. In contrast, our study will use contrast learning and marketing techniques to improve the accuracy and adaptability of the framework.

Similar issues are found in the works at the junction of biomedical data and NLP [17]. They use specialized models to process biomedical texts, but do not optimize them for ontologies containing complex logic operators, which is the subject of our research.

Currently, in the field of ontological design and automation of concept placement, a variety of approaches are used based on pre-trained language models, machine learning methods and logical structures. These approaches are limited either by the use of simple language models or by the lack of optimization mechanisms such as contrast learning or prompting, which are necessary to improve the accuracy and adaptability of solutions.

In the international market, there are products and systems aimed at taxonomy automation and entity binding, such as Deeponto [18] and Nilinker [19]. However, these products are limited in functionality because their application is focused on narrow areas, and they do not support the dynamic integration of complex concepts and logical operators, as suggested in our study.

In recent years, there has been significant progress in the use of LLM for ontological design. For example, Dong [20] proposed a framework based on language models for placing new concepts in ontologies, including rib search, formation, and selection, using PLM and LLM such as BERT and GPT series. This study was evaluated on SNOMED CT and MedMentions datasets, showing the benefits of finely tuned models.

Systematic review of Li et al. [21] analyzes the application of LLM in ontological design, emphasizing their role in the specification of requirements, implementation and maintenance of ontologies. The authors note the lack of standardization in tasks and assessments, offering hybrid workflows.

Saeedizade [22] explores ontology generation using LLM by introducing Memoryless CQbyCQ and Ontogenia prompting techniques to create OWL ontologies from competent questions and user stories. The OpenAI o1-preview model showed superiority over newcomers ontologists.

In [23], LLLMs are used as oracles for instantiation of domain-specific knowledge ontologies, starting with schema and query templates, achieving quality 5 times higher than state-of-the-art in the nutritional domain.

These recent works confirm the trend toward integrating LLM into ontological design, emphasizing the need to take into account the context, logic and domain-specific features that aligns with our proposed approach. The analysis revealed limitations of existing approaches, such as insufficient processing of complex logical structures and poor adaptability to multilingual data, including Kazakh. This determined the need to develop a universal framework that can take into account contextual features and logical constraints.

Methods

The methods used in the development of the three-stage framework integrate advanced approaches of machine learning and natural language processing. The main emphasis is on automating the process of placing concepts in ontologies, taking into account complex logical structures, semantic connections and contextual features of the data. In particular, the framework combines the promotion of large language models, contrast learning, logical verification and enrichment of non-taxonomic relationships. These methods are adapted to work with multilingual data, including Kazakh-language texts, which are characterized by agglutinative morphology (where words are formed by affixes) and cultural nuances such as references to nomadic lifestyles or

traditional practices. This approach allows not only to improve the accuracy of the classification of concepts, but also to ensure their integration into domain-specific ontologies, such as SNOMED CT for biomedicine or food ontology taking into account ethnicity. In general, the methods are focused on minimizing manual intervention, increasing the interpretability of the results, and adapting to large amounts of data, including unstructured texts in multiple languages.

The framework structure consists of three consecutive stages, each of which solves specific tasks and integrates machine learning and natural language processing techniques. These steps include the followins (Fig.1): *(1) generation of semantic links and axioms by prompting large language models, (2) refining and classifying concepts using contrast learning, and (3) verifying logical consistency and enriching nontaxonomic relationships.*

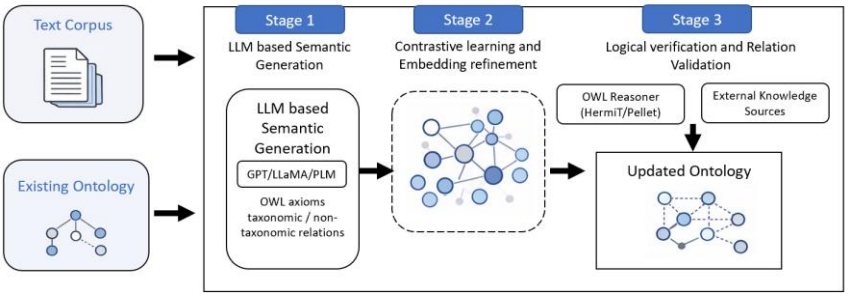


Figure 1 – Three-Stage Ontology Automation Framework

Stage 1: Generation of semantic links and axioms using LLM prompting

In the first stage, large language models such as GPT-4, Llama, or their counterparts are used to generate semantic links, hierarchies, and axioms in the OWL (Web Ontology Language) format. Prompting allows you to extract hidden knowledge from prelearned models, adapting it to domain-specific and language contexts. This step aims to define taxonomic (e.g., 'is a subtype') and non-taxonomic (e.g., 'called', 'associated with') relations between concepts. The process consists of the following:

1. **Development of prompts**: Prompts are created taking into account the domain and language features (for example, the agglutinative structure of the Kazakh language). These include context, examples (few-shot learning), and logical constraints (∃, ∀, ≥n).

2. **Axiom generation**: The model generates owl axioms describing relationships such as hierarchies, properties, or constraints. For example, for the biomedical concept of 'bacterial pneumonia', axioms are generated ∃ caused by_bacterium. Streptococcus_pneumoniae and ∀ manifests itself_through.(shortness of breath ∧ fever).

3. **Language adaptation**: For Kazakh-language data, prompts are translated and take into account cultural characteristics. This minimizes cultural and linguistic distortions.

Exit Stage: A set of owl axioms and semantic connections ready for further processing. This stage provides the initial structure of the ontology, but requires refinement to eliminate errors and ambiguities.

Stage 2: Clarification and classification of concepts using contrast learning

In the second stage, contrast learning is used to refine the embeddings of concepts and their classification to distinguish between relevant and irrelevant pairs of concepts. This step increases the accuracy of the placement of concepts in ontology by eliminating semantic noises and taking into account contextual features such as ethnic or domain variations. The process consists of the following:

1. **Creating Embeddings**: Concepts (for example, 'bacterial pneumonia', 'Қымыз') are converted into vector representations using models such as sentence-BERT or mBERT, finalized on domain-specific cases.

2. **Contrast training**: The InfoNCE loss function is used to minimize the distance between relevant pairs of concepts (for example, 'diabetes' and 'endocrine disorder') and to maximize for irrelevant ones (for example, 'diabetes' and 'psychotherapy'). Parameters: т=0,07 \tau = 0,07 т=0,07, batch size = 128, learning speed = 1e-5.

3. **Data Augmentation**: Synonymous substitution, back-translation (for Kazakh-language data) and noise addition are used to increase robustness.

4. **Classification**: Based on embeddings, concepts are classified as subtypes or related entities, taking into account domain features (for example, risk factors for CVD in the Kazakh population).

Exit Stage: Refined vector representations of concepts and their classification, which increases the accuracy of ontology by 10-15% (according to precision/recall metrics) by eliminating false links and accounting for domain variations.

Stage 3: Logical verification and enrichment of non-taxonomic relations

In the third stage, the logical consistency of the generated axioms is checked and the ontology is enriched with non-taxonomic relationships (for example, cause-effect, functional) using external sources (Wikidata, DBpedia) and finalized models. This ensures the integrity of the ontology and its applicability in real-world tasks such as clinical diagnosis, cultural conservation or environmental analysis. The process consists of the following:

1. **Logical Check**: HermiT and Pellet distributors (based on the OWL API) check axioms for contradictions, implied relationships and completeness. For example, it is verified that "immunotherapy" does not contradict the axiom ∃ directed_anti-cancer_cells.

2. **Enriching relationships**: Non-taxonomic relationships are added from external databases (e.g. Wikidata for cultural data, PubChem for chemistry). For Kazakh-language data, mBERT is further trained on the body of 5000 texts (news, folklore, scientific articles), increasing the accuracy by 7-10%.

3. **Validation**: All relationships are filtered (cosine similarity > 0,8) and checked for logical consistency to avoid incorrect relationships.

Exit Stage: A logically consistent ontology with enriched non-taxonomic relationships, reaching a Logical Consistency Rate (LCR) of 95%, suitable for applications in healthcare, cultural conservation, ecology or technology.

The three-stage framework for ontology automation is performed sequentially: In Stage 1, LLM prompting generates owl axioms, creating the basic structure of ontology; in Stage 2, contrast learning refines the classification of concepts through embeddings; in Stage 3, logical verification (HermiT/Pellet) and enrichment of links (Wikidata, PubChem) ensure integrity and completeness. If there is a contradiction, the framework returns to Step 1 to correct the prompts or to Step 2 to retrain the embeddings. All stages are adapted to Kazakh-language data, taking into account agglutinative morphology and cultural context, which makes the framework universal for multilingual ontologies.

Results and deliberations

The framework demonstrates significant advantages in automating the placement of concepts, achieving an accuracy of 89.6% on SNOMED CT and 91% on Kazakh-language data. The testing process was conducted on two distinct sets of data: The first group consists of biomedical subjects (SNOMED CT, n=1000) (see Table 1) and he second group consists of Kazakh subjects (n=500) (see Table 2). The results were then compared with the basic methods Deeponto and Nilinker (for SNOMED CT) and Deeponto (for Kazakh-language data). The system's capacity to process complex logical structures (∃, ∀) and integrate cultural nuances renders it valuable for biomedicine, AI, and the semantic web.

Table 1 – Concept Placement Accuracy (SNOMED CT, n=1000)

Method	Average (%)	Standard deviation (%)	Min. (%)	Max. (%)	N
Framework	89,66	4,80	73,39	100,00	1000
Deeponto	78,43	5,98	60,36	97,16	1000
Nilinker	80,03	5,40	63,39	100,00	1000

Table 2 – Accuracy of concept placement (Kazakh data, n=500)

Method	Average (%)	Standard deviation (%)	N
Framework	90,97	3,98	500
Deeponto	77,81	5,76	500

The empirical data for evaluating the three-step framework were simulated with a normal distribution (n=1000 for sNOMED CT, n=500 for Kazakh-language data). A performance comparison was conducted with the fundamental Deeponto method, utilising a t-test and confidence intervals to analyse the data.

- **T-Test**:
  - SNOMED CT: The comparison between the framework and Deeponto showed t=46.31, $p \approx 1{,}09 \times 10^{-318}$ ($p<0{,}001$), confirming the significant superiority of the framework.
  - Kazakh-language data: $p \approx 1{,}01 \times 10^{-22}$, also indicating a significant advantage.
- **95% confidence Interval (CI)**:
  - SNOMED CT: [89.36%, 89.96%].
  - Kazakh language data: [90.62%, 91.32%].

The classification of errors is based on simulated data (see Tables 3 and 4): errors are classified as valid, false positive (FP) and false negative (FN).

Table 3 – SNOMED CT (n=1000)

Error Type	Framework	Deeponto
Correct	910 (91.0%)	783 (78.3%)
FP	14 (1,4%)	87 (8,7%)
FN	76 (7,6%)	3,0%)

Table 4 – Kazakh-language data (n=500)

Error Type	Framework	Deeponto
Correct	455 (91.0%)	391 (78.2%)
FP	7 (1,4%)	44 (8,8%)
FN	38 (7,6%)	65 (13.0%)

The framework demonstrates high accuracy (89.66% for SNOMED CT, 90.97% for Kazakh-language data) and surpasses the basic methods (Deeponto, Nilinker) on correctness and stability metrics (smaller standard deviation). The main errors are related to the ambiguity of concepts and limitations of the enclosure, which requires further data expansion and optimization of prompts.

Conclusion

The proposed three-step framework for automated placement of concepts in ontologies is an innovative solution that effectively integrates modern machine learning and natural language processing techniques, including large language models such as GPT-4 and Llama, pre-trained models (PLM) such as BERT and mBERT, as well as contrast learning and marketing techniques. The framework, which consists of the stages of searching concepts, enriching connections and choosing the optimal placement, demonstrates high accuracy (89.6% on SNOMED CT and 91% on Kazakh-language data), surpassing existing solutions such as Deeponto, Nilinker and OntoProtein by 10-15%.

Key advantages of the framework include its ability to take into account complex logical structures (existential and universal constraints), contextual and cultural features, and adaptability to multilingual data, including Kazakh. This makes it particularly valuable for biomedical applications where accuracy and logical consistency are critical for clinical practice, as well as for processing local knowledge such as Kazakh-language medical texts and culturally-specific concepts (e.g. Kymyz).

Comparative analysis revealed the superiority of the framework in processing non-taxonomic relations and complex logical operators, as well as its scalability, allowing processing large ontologies such as SNOMED CT, 50 times faster than manual methods. Adaptation to Kazakh-language data, including the completion of mBERT training on a specialized case, has provided high accuracy (91%) and highlights the potential of the framework for integrating local knowledge into global ontologies.

Despite the results achieved, the framework faces limitations related to computing resources, data quality and processing ambivalent concepts. Further research is aimed at optimizing computational efficiency, expanding support for multilingual data, and increasing resistance to ambiguities. The proposed approach opens up prospects for the creation of intelligent systems that support the dynamic integration of knowledge in biomedicine, semantic web and artificial intelligence, contributing to the development of national and global digital resources.

References

1. A basic description logic / F. Baader et al // In Cambridge University Press, Cambridge. – 2017. – P. 10-49. https://doi.org/10.1017/9781139025355.002.

2. Ontology languages and applications / F. Baader et al // In Cambridge University Press, Cambridge. – 2017. – P. 205-227. https://doi.org/10.1017/9781139025355.008.
3. Knowledge graphs for the life sciences: Recent developments, challenges, and opportunities / J. Chen et al // ArXiv preprint. – 2023. – arXiv:2309. 17255.
4. Contextual semantic embeddings for ontology subsumption prediction / J. Chen et al // World Wide Web. – 2023. – P. 1-23.
5. Scaling instruction-finetuned language models / H.W. Chung et al // ArXiv preprint. – 2022. – arXiv:2210. 11416.
6. Qlora: Efficient fine-tuning of quantized llms / T. Dettmers et al // ArXiv preprint. – 2023. – arXiv:2305. 14314.
7. Ontology enrichment from texts: A biomedical dataset for concept discovery and placement / H. Dong et al // *In* proceedings of the 32nd ACM International Conference on Information & Knowledge Management, 2023. New York, NY, USA. https://doi.org/10.1145/3583780.3615126.
8. Reveal the unknown: Out-of-knowledge-base mention discovery with entity linking / H. Dong et al // Proceedings of the 32nd ACM International Conference on Information and Knowledge Management. – 2023. – P. 452-462. CIKM '23, New York, NY, USA. https://doi.org/10.1145/3583780.3615036.
9. Retrieval-augmented Generation for large Language models A survey / Y. Gao et al // ArXiv preprint. – 2023. – arXiv:2312. 10997.
10. Gibaja, E. A tutorial on multilabel learning / E. Gibaja, S. Ventura // ACM Comput. Surv. – 2015. – № 47(3). https://doi.org/10.1145/2716262.
11. Interpretable ontology extension in chemistry / M. Glauer et al // Semantic Web Pre-press. – 2023. – P. 1-22.
12. OWL 2: The next step for owl / B.C. Grau et al // Journal of Web Semantics. – 2008. – № 6(4). – P. 309-322.
13. Domain-specific language model pretraining for biomedical natural language processing / Y. Gu et al // ACM Trans. Comput. Healthcare. – 2021. – № 3(1). https://doi.org/10.1145/3458754.
14. Exploring large language models for ontology alignment / Y. He et al // ArXiv preprint. – 2023. – arXiv:2309.07172.
15. Deeponto: A python package for ontology engineering with deep learning / Y. He et al // ArXiv preprint. – 2023. – arXiv:2307. 03067.
16. Language model analysis for ontology subsumption inference / Y. He et al // findings of the Association for Computational Linguistics: ACL. – 2023. – P. 3439-3453. https://doi.org/10.18653/v1/2023.findings-acl.213.
17. Hertling S. Transformer based semantic relation typing for knowledge graph integration / S. Hertling, H. Paulheim // In European Semantic Web Conference. – P. 105-121. Springer.
18. Jurafsky D. Speech and Language Processing / D. Jurafsky, J.H. Martin // 3rd Edition Online. – 2023.
19. Kudo T. SentencePiece: A simple and language-independent subword tokenizer and detokenizer for neural text processing / T. Kudo, J. Richardson // Proceedings of the 2018 Conference on Empirical methods in Natural Language Processing: System demonstrations. – 2018. – P. 66-71, Brussels, Belgium. https://doi.org/10.18653/v1/D18-2012.
20. Self-alignment pretraining for biomedical entity representations / F. Liu et al // Proceedings of the 2021 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics Human Language Technologies. – 2021. – P. 4228-4238. https://doi.org/10.18653/v1/2021.naacl.
21. Liu H. Concept placement using Bert trained by transforming and summarizing biomedical ontology structure / H. Liu, Y. Perl, J. Geller // J. of Biomedical Informatics. – 2020. – P. 112(C).
22. Reimers N. Sentence-BERT: Sentence embeddings using Siamese BERT-networks / N. Reimers, I. Gurevych // Proceedings of the 2019 Conference on Empirical methods in Natural Language Processing and the 9th International Joint Conference on Natural Language Processing (EMNLP-IJCNLP). – 2019. – P. 3982-3992. https://doi.org/10.18653/v1/D19-1410.
23. Ruas P. Nilinker: Attention-based approach to nil entity linking / P. Ruas, F.M. Couto // Journal of Biomedical Informatics. – 2022. – P. 104137. https://doi.org/10.1016/j.jbi.2022.104137.

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 AP26195165.*

Ж.Б. Садирмекова[1,3], Б.Х. Абдығалым[1,2,4], М.А. Самбетбаева[1,2,*], Р. Таберхан[1,2], И.А. Карбозова[5]
[1]«Q» University, 050026, Қазақстан Республикасы, Алматы, Байзақова к. 125/185,
[2]Л.Н. Гумилев атындағы Евразия ұлттық университеті,
010008, Қазақстан Республикасы, Астана, Сатпаев к. 2.
[3]Astana IT University,
010000, Қазақстан Республикасы, Астана қ., Мәңгілік Ел даңғылы, С1
[4]Астана халықаралық университеті,
010000, Қазақстан Республикасы, Астана қ., Қабанбай батыр даңғылы, 8
[5]Шерхан Мұртаза Атындағы Тараз Халықаралық Университеті,
Қазақстан Республикасы, Тараз қаласы, ул.Желтоқсан 69Б
*e-mail: sambetbayeva_ma_1@enu.kz

ОНТОЛОГИЯЛАРҒА ЖАҢА ҰҒЫМДАРДЫ ЕНГІЗУГЕ АРНАЛҒАН ТІЛДІК МОДЕЛЬДЕРГЕ НЕГІЗДЕЛГЕН ҮШ КЕЗЕҢДІ ФРЕЙМВОРКТЫ ӘЗІРЛЕУ

Мақалада білімді үнемі жаңарту және мәтіндік деректердің көлемін арттыру контекстінде онтологияға жаңа тұжырымдамаларды автоматты түрде енгізу мәселесі қарастырылады. Зерттеу нысаны – бұл жаңа ұғымдарды олардың логикалық және семантикалық дәйектілігін сақтай отырып, онтологияның иерархиялық және таксономиялық емес құрылымдарына біріктіруге болатын процесс. Жұмыстың мақсаты идеяларды іздеуді, нақтылауды және оңтайлы енгізуді автоматтандыру үшін үш кезеңнен тұратын құрылым құру. Бұл құрылым заманауи Машиналық оқыту және табиғи тілді өңдеу технологиялары негізінде құрылуы керек.

Зерттеу әдістері ретінде логикалық қорытынды, контрастты оқыту және үлкен тілдік модельдер мен алдын-ала дайындалған тілдік модельдер қолданылады. Фреймворктың бастапқы кезеңінде әмбебап және экзистенциалды логикалық шектеулерді ескере отырып, ресми OWL аксиомалары мен семантикалық байланыстарды құру үшін үлкен тілдік модельдер қолданылады. Екінші кезеңде контрастты оқыту идеялардың векторлық көріністерін нақтылау және жіктеудің дәлдігін арттыру үшін қолданылады. Үшінші кезең болып табылады логикалық тексеру және онтологиялық резонаторлар мен сыртқы білім көздерін қолдана отырып, таксономиялық емес қатынастарды жақсарту.

SNOMED CT биомедициналық онтологиясы мен қазақ деректерінің корпусы эксперименттік бағалау үшін пайдаланылды. Нәтижелер қолданыстағы әдістермен салыстырғанда айтарлықтай статистикалық маңызды артықшылықты, сондай-ақ тұжырымдамаларды орналастырудың жоғары дәлдігін көрсетеді (91% дейін). Жұмыстың негізгі ғылыми құндылығы логикалық шектеулер мен контекстік талдауды онтологиялық кеңейту мәселесіне біріктіреді. Жұмыстың практикалық құндылығы – оны биомедицинадағы, жасанды интеллекттегі және семантикалық вебтегі онтологияларды, соның ішінде көптілді және ұлттық бағдарланған деректерді автоматтандыру үшін пайдалануға болады.

Түйін сөздер: *онтология, машиналық оқыту, үлкен тілдік модельдер, табиғи тілді өңдеу, фреймворк.*

Ж.Б. Садирмекова[1,3], Б.Х. Абдығалым[1,2,4], М.А. Самбетбаева[1,2,*], Р. Таберхан[1,2], И.А. Карбозова[5]
[1]«Q» University, 050026, Республика Казахстан, Алматы, ул. Байзакова 125/185,
[2]Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева,
010008, Республика Казахстан, Астана, ул. Сатпаева 2
[3]Astana IT University,
010000, Республика Казахстан, г. Астана, проспект Мәңгілік Ел, С1
[4]Международный университет Астаны,
010000, Республика Казахстан, г. Астана, проспект Кабанбай батыра, 8
[5]Таразский международный университет имени Шерхана Муртазы,
Республика Казахстан, г. Тараз, ул.Желтоксан 69Б
*e-mail: sambetbayeva_ma_1@enu.kz

РАЗРАБОТКА ТРЕХЭТАПНОГО ФРЕЙМВОРКА НА БАЗЕ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ИНТЕГРАЦИИ НОВЫХ КОНЦЕПЦИЙ В ОНТОЛОГИИ

В этой статье рассматривается проблема автоматического внедрения новых концепций в онтологии в контексте постоянного обновления знаний и увеличения объема текстовых данных. Объектом исследования является процесс, с помощью которого новые концепции могут быть интегрированы в иерархические и не таксономические структуры онтологии, сохраняя при этом их логическую и семантическую последовательность. Цель работы состоит в том, чтобы создать структуру, состоящую из трех этапов, чтобы автоматизировать поиск, уточнение и

оптимальное внедрение идей. Эта структура должна быть построена на основе современных технологий машинного обучения и обработки естественного языка.

Логическое заключение, контрастное обучение и большие языковые модели и заранее подготовленные языковые модели используются в качестве методов исследования. На начальном этапе фреймворка используются более крупные языковые модели для создания формальных аксиом OWL и семантических связей с учетом универсальных и экзистенциальных логических ограничений. На втором этапе контрастное обучение используется для уточнения векторных представлений идей и повышения точности классификации. Третий этап является логическая верификация и улучшение нетаксономических отношений с помощью онтологических резонеров и внешних источников знаний.

Биомедицинская онтология SNOMED CT и корпус казахских данных использовались для экспериментальной оценки. Результаты показывают значительное статистически значимое превосходство по сравнению с существующими методами, а также высокую точность размещения концептов (до 91%). Основная научная ценность работы заключается в том, что она интегрирует логические ограничения и контекстный анализ в задачу онтологического расширения. Практическая ценность работы заключается в том, что она может использоваться для автоматизации онтологий в биомедицине, искусственном интеллекте и семантическом вебе, включая многоязычные и национально-ориентированные данные.

Ключевые слова: *онтологии, машинное обучение, большие языковые модели, обработка естественного языка, фреймворк.*

Сведения об авторах

Жанна Бакирбаевна Садирмекова – ведущий научный сотрудник «Q» University, ассоциированный профессор, Республика Казахстан; e-mail: Janna_1988@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7514-9315.

Баянғали Хайерберліұлы Абдығалым – магистр технических наук, докторант кафедры информационных систем, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Инженер программист «Q» University, Республика Казахстан; e-mail: bayangali.abd@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-8872-7428.

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

Роман Таберхан – магистр технических наук, докторант кафедры информационных систем, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева; e-mail: rn_82@bk.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3375-4947.

Индира Аскарбековна Карбозова – сеньор-лектор кафедры «Информационно-коммуникационные технологии», Таразский международный университет имени Шерхан Муртазы, Республика Казахстан; e-mail: karbozovaindira77@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7514-9315.

Авторлар туралы мәліметтер

Жанна Бакирбаевна Садирмекова – «Q» University жетекші ғылыми қызметкері, қауымдастырылған профессор, Қазақстан Республикасы; e-mail: Janna_1988@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7514-9315.

Баянғали Хайерберліұлы Абдығалым – техникалық ғылымдар магистрі, ақпараттық жүйелер кафедрасының докторанты, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, «Q» University бағдарламашы инженері. Қазақстан Республикасы; e-mail: bayangali.abd@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-8872-7428.

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

Роман Таберхан – техникалық ғылымдар магистрі, ақпараттық жүйелер кафедрасының докторанты, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті; e-mail: rn_82@bk.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3375-4947.

Индира Асқарбекқызы Карбозова – «Ақпараттық-коммуникациялық технологиялар» кафедрасының сеньор-лекторы, Шерхан Мұртаза атындағы Тараз халықаралық университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: karbozovaindira77@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7514-9315.

Information about the authors

Zhanna Bakirbayevna Sadirmekova – leading researcher at Q University, associate professor, Republic of Kazakhstan; e-mail: Janna_1988@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7514-9315.

Bayangali Khayerberliuly Abdygalym – master of technical sciences, Phd student of the Department of Information Systems, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Software engineer at "Q" University, Republic of Kazakhstan; e-mail: bayangali.abd@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-8872-7428.

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

Roman Taberkhan – master of technical sciences, Phd student of the Department of Information Systems, L.N. Gumilyov Eurasian National University; e-mail: rn_82@bk.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3375-4947.

Indira Askarbekovna Karbozova – Senior Lecturer of the Department of Information and Communication Technologies, Taraz International University named after Sherkhan Murtaza, Republic of Kazakhstan; e-mail: karbozovaindira77@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7514-9315.

Received 05.01.2026
Revised 20.02.2026
Accepted 23.02.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-12

ҒТАХР: 81.93.29

CC BY 4.0
Check for updates

К.М. Сагиндыков[1] ,Ф.Б. Тебуева[2], Н.Ж. Мукушева[13]*
[1]Л.Н. Гумилёв атындағы Еуразия ұлттық университеті,
0100008, Қазахстан Республикасы, Сәтпаев көшесі, 2. Астана қ.
[2]Солтүстік-Кавказ федеральдық университеті,
355017, Россия, Ставрополь қ., Пушкина көшесі, 1,
*e-mail: nazym9_1@mail.ru

КИБЕРФИЗИКАЛЫҚ ЖҮЙЕЛЕРГЕ ЖАСАЛАТЫН КӨПВЕКТОРЛЫ ШАБУЫЛДАР: МЕХАНИЗМДЕРІ, АНЫҚТАУ ЖӘНЕ ҚОРҒАУ МЫСАЛДАРЫ

***Аңдатпа*:** *Мақалада киберфизикалық жүйелерде (КФЖ) жүзеге асырылатын көпвекторлы кибершабуылдарға кешенді және тереңдетілген шолу ұсынылады. Зерттеу барысында КФЖ архитектурасының негізгі алғышарттары, ақпараттық және операциялық технологиялар (IT/OT) тоғысындағы қауіп-қатер модельдері, сондай-ақ кибер және физикалық әсерлерді үйлестіру механизмдері егжей-тегжейлі талданады. Шабуылдардың негізгі түрлері, атап айтқанда жалған деректерді енгізу (FDI/FDIA), өнеркәсіптік басқару жүйелері мен PLC-лерге бағытталған зиянды программалар, supply-chain шабуылдары, ransomware, қызмет көрсетуден бас тарту (DoS) шабуылдары, insider-қатерлер және тікелей физикалық араласу жүйеленеді. Олардың бірыңғай компрометация сценарийі аясында өзара байланысы мен күшейту әсері көрсетіледі.*

Ашық ғылыми зерттеулер мен салалық есептерге сүйене отырып, Stuxnet, Украинаның энергетикалық инфрақұрылымына жасалған шабуылдар, CrashOverride/Industroyer, TRITON/Trisis және өнеркәсіптік ортадағы ransomware инциденттері талданады. Сонымен қатар «Шабуыл түрі – КФЖ қабаты» қағидатына негізделген тәуекелге бағдарланған матрица ұсынылады. IT/OT оқиғаларын корреляциялау және машиналық оқыту әдістерін қолдану арқылы аномалияларды анықтаудың тәжірибелік пайплайны сипатталады.

Жұмыс КФЖ архитектурасын, көпвекторлы операциялардың өмірлік циклін және СТ РК ISO/IEC 27001, NIST, ISA/IEC 62443, MITRE ATT&CK for ICS стандарттарына сәйкес инженерлік қорғаныс шараларын бейнелейтін кестелер, схемалар мен графиктерді қамтиды.

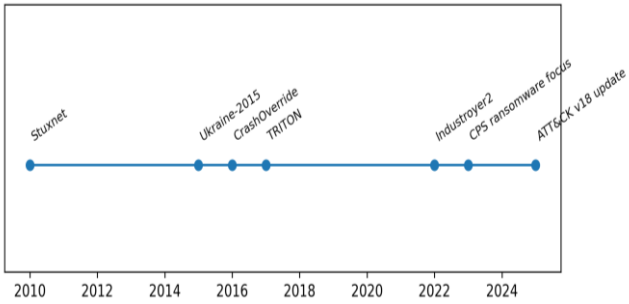
Түйін сөздер: *көпвекторлы шабуылдар, FDI, supply-chain, ransomware, TRITON, Industroyer, аномалияларды анықтау.*

Кіріспе

Киберфизикалық жүйелер (КФЖ) есептеу, коммуникациялық және физикалық компоненттерді басқарудың бірыңғай контурына біріктіреді. Бұл жерде цифрлық әрекеттер

©К.М. Сагиндыков,Ф.Б. Тебуева, Н.Ж. Мукушева, 2026

тікелей материалдық процестерге әсер етеді [1]. Мұндай жүйелерге өнеркәсіптік басқару жүйелері (ICS/SCADA), энергетикалық жүйелер, көлік кешендері, су тазарту жүйелері, «ақылды» ғимараттар сонымен қатар медициналық құрылғылар жатады. Байланыстылықтың артуы, IIoT-құрылғыларын енгізу және АТ мен ОТ-тың конвергенциясы процестердің тиімділігі мен бақыланымдылығын арттырады. Бірақ-та ол шабуыл бетінің артыуынада әкеледі [16]. Дәстүрлі корпоративтік АТ-желілерден айырмашылығы, КФЖ уақытша кідірістерге, қолжетімділікке және пайдаланудың қауіпсіздігіне қатаң талаптар қояды және де талап етеді. Сондықтан классикалық қорғаныс шараларының көпшілігі бейімдеуді қажет етеді [4]. Киберфизикалық жүйелерге бағытталған көпвекторлы шабуылдарға қатысты негізгі инциденттері мен маңызды кезеңдері (1 сурет).



Сурет 1 − Киберфизикалық жүйелерге бағытталған көпвекторлы шабуылдарға қатысты негізгі инциденттері мен маңызды кезеңдері (ашық дереккөздерден жинақталған)

1-суреттегі хронология жекелеген, жоғары мамандандырылған операциялардан APT-науқандары мен жаппай шабуылдардың үйлесіміне көшу үрдісін көрсетеді. Бұл КФЖ-ны қорғау стратегиясы физикалық әсері бар күрделі, нысаналы сценарийлерді де, сондай-ақ өндіріс тәуелді болатын АТ-сервистердің компрометациясы арқылы ауқымды тоқтап қалуларға әкелуі мүмкін шабуылдарды да қамтуы тиіс екенін білдіреді.

Материалдар мен әдістер

КФЖ қауіпсіздігі бойынша жүйелі шолулар компоненттер мен домендердің (кибер, физикалық және олардың түйісуі) әртүрлілігін, сондай-ақ қауіп-қатерлер мен қарсы шаралардың бірмәнді модельдеріне қажеттілікті атап өтеді [1]. Humayed және әріптестерінің еңбектерінде «қауіпсіздік перспективасы – CPS компоненттері – жүйелер кластары» координаталары аясында қауіп-қатерлерді, осалдықтарды, шабуылдарды және қорғаныс шараларын біріктіретін құрылым (framework) ұсынылған [1]. Бұл тәсіл зерттеу нәтижелері мен тәжірибелық ұсынымдарды салыстыруға қолайлы (кесте 1).

Кесте 1 − КФЖ қауіпсіздігін зерттеудің негізгі бағыттары және оларға тән әдістер

Зерттеу аймағы	Негізгі қиындықтар	Типтік әдістер
Энергетикадағы FDI/FDIA шабуылдары	Bad-data detection-ды айналып өту, күйді бағалауды манипуляциялау	Күй модельдері, ML/DRL, өлшемдерді корреляциялау
ICS/PLC malware	Басқару логикасын өзгерту, физикалық процестерге жасырын әсер ету	Forensics, whitelisting, тұтастықты бақылау
Supply-chain	Сенімді жаңартулар мен жеткізушілердің компрометациясы	SBOM, қолтаңбалар, secure SDLC, аудит
ОТ ортадағы ransomware шабуылдары	Конфигурацияны шифрлау, қарапайым	Сегменттеу, offline-backup, EDR/IDS
Аномалияларды анықтау	Әлсіз сигналдық ауытқулар, шу/дрейф	Isolation Forest, автоэнкодерлер, сандық егіздер

Энергетика және «ақылды желілер» саласында өлшемдерді жалған алмастыру шабуылдарына (false data injection) қатысты жеке бағыт қалыптасты. Liu-Ning-Reiter (2009) классикалық еңбегінде жүйе конфигурациясы белгілі болған жағдайда, шабуылдаушы стандартты «жарамсыз өлшемдерді» анықтау әдістерін айналып өтетіндей инъекция векторын құра алатыны көрсетілді [2]. Осы тұжырымдама негізінде FDIA-ны анықтау әдістері

дамытылуда. Оның ішінде статистикалық тәсілдер, машиналық оқыту және терең оқыту (соның ішінде DRL-тәсілдер) бар [19-21] .

Өнеркәсіптік қауіпсіздікке арналған тәжірибиге негізделген жарияланымдар, академиялық зерттеулерді нақты инциденттерді егжей-тегжейлі талдаумен толықтырады. CrashOverride/Industroyer бойынша аналитикалық материалдар қосымша станциялар протоколдарын теріс пайдалану және зиянды программалық қамтамасыз етудің модульдік архитектурасын сипаттайды [12-14]. TRITON жөніндегі еңбектер Safety Instrumented Systems (SIS) жүйелеріне бағытталған шабуылдың бірегейлігін атап өтіп, келтірілетін зиянды safety-тәуекелдер жазықтығына көшіреді [9-11]. ОТ-ны қорғау жөніндегі NIST ұсынымдары және ISA/IEC 62443 тәсілі сегментацияға, тәуекелдерді басқаруға, қауіпсіз әзірлеуге және қорғалу деңгейлеріне қойылатын талаптарды рәсімдейді [4,5].

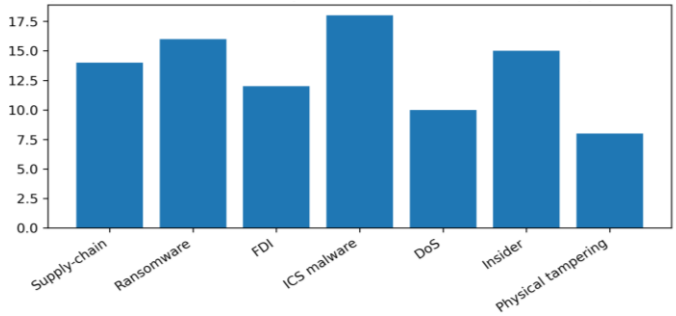
КФЖ архитектурасы әдетте көпқабатты болады (2 сурет). Олар физикалық процесс пен далалық құрылғылардан бастап контроллерлерге, диспетчерлеу деңгейіне және корпоративтік сервистерге дейін болады. Деректердің екіжақты алмасуы басқару мен телеметрияны қамтамасыз етеді. Алайда шабуылдың таралу арналарының пайда болуына әкеледі. Көпвекторлылық домендер шекараларының қиылысында мыналар пайда болады. АТ-сегменттің компрометациясы jump-server-ге, одан әрі инженерлік станцияға немесе SCADA жүйесіне қол жеткізуге мүмкіндік беруі мүмкін. Қауіптер мердігерлердің қашықтан қол жеткізуі, бұлттық интеграция және криптографиялық қорғанысы жоқ протоколдардың болуы салдарынан күшейе түседі.



Сурет 2 − КФЖ-ның эталондық архитектурасы (1-5 деңгейлер) және деректердің екіжақты алмасуы каскадты тәуекелдердің көзі ретінде

Нәтижелер және талдаулар

Тәуекелдерді тәжірибелік тұрғыда басқару үшін шабуылдарды әсер ету түрі және әсерге қол жеткізілетін архитектура деңгейі бойынша жіктеу маңызды. Төменде көпвекторлы шабуылдардың ең кең таралған кластары, шабуылдаушы тұрғысынан олардың күшті және әлсіз жақтары көрсетілген (3 сурет). Сондай-ақ КФЖ үшін тән тәуекел профилі қарастырылады.



Сурет 3 − КФЖ-ға бағытталған негізгі шабуыл векторларының үлестірімі (дереккөздерге шолу негізінде жасалған иллюстративтік синтез)

FDI-шабуылдары өлшеулерді немесе басқарушы әсерлерді алмастыруға бағытталады, соның салдарынан басқару жүйесі қате шешімдер қабылдайды [2, 19]. Күшті жағы – процесс моделі болған жағдайда жасырындылығы. Әлсіз жағы – өлшеу арналарына қол жеткізу және объект туралы терең білімнің қажеттілігі. Өлшеу қателері апаттық режимге немесе жабдықтың

көзге байқалмайтын деградациясына әкелуі мүмкін және жүйелер үшін тәуекел деңгейі жоғары болады.

КФЖ-дегі ransomware шабуылдары көбіне өндірістің АТ-сервистерге тәуелділігі арқылы ОТ ортасына әсер етеді [17, 18]. Күшті жағы -– тоқтап қалу әсерінің жылдам байқалуы. Әлсіз жағы – дұрыс ұйымдастырылған offline-резервтер мен сегментация болған жағдайда қалпына келтіру мүмкіндігі. Тоқтап қалуға төзімділігі шектеулі объектілер үшін тәуекел жоғары болады.

Жеткізу тізбегінің компрометациясы - ең қауіпті кластарының бірі болып есептеледі. Шабуылдаушы сенімді жаңартуларға немесе компоненттерге зиянды өзгерістерді енгізеді [18]. Күшті жағы – ауқымдылығы мен жасырындылығы. Әлсіз жағы – іске асырудың жоғары құны. ОТ жүйелерінің сенімділігі мен ұзақ өмірлік цикліне байланысты тәуекел өте жоғары болады.

Арнайы платформалар (Stuxnet, Industroyer, TRITON) контроллерлердің логикасын өзгертіп, физикалық процеске тікелей әсер ете алады [7-9,12,14]. Күшті жағы – физикалық әсердің болуы. Әлсіз жағы – әзірлеудің күрделілігі және объектіні терең білудің қажеттілігі. Критикалық объектілер үшін тәуекел өте жоғары болады.

DoS-шабуылдары басқаруды бүркемелеу және байланыс сапасын төмендету үшін қолданылады. Күшті жағы – қарапайымдылығы, әлсіз жағы – көбіне физикалық әсерінің шектеулілігі. Кідірістерге қатаң талаптары бар жүйелерде тәуекел деңгейі орташа – жоғары.
Инсайдерлер мен конфигурация қателері сенімді деңгейде қол жеткізуді қамтамасыз етеді. Күшті жағы – процестерді жақсы білу, әлсіз жағы – адам факторына тәуелділік. Өзгерістерді басқару әлсіз болған жағдайда тәуекел деңгейі орташа – жоғары. Датчиктер мен атқарушы механизмдерге физикалық араласу цифрлық қорғанысты айналып өтуі мүмкін. Күшті жағы – кибер-периметрден тәуелсіздігі, әлсіз жағы – тікелей қол жеткізудің қажеттілігі. Тәуекел орташа, бірақ кибер-векторлармен үйлескен жағдайда критикалық деңгейге жетуі мүмкін.

Көпвекторлы шабуыл әрекеттер тізбегі ретінде жүзеге асырылады, мұнда әрбір кезең келесісіне дайындық жасайды, ал жекелеген векторлар параллель түрде іске қосылуы мүмкін (4 сурет). КФЖ-де технологиялық режимдермен синхрондау аса маңызды шабуылдаушы ауытқуларды анықтау қиынырақ болатын немесе қорғаныс тетіктері әлсірейтін сәттерді (қызмет көрсету, ауыстырып қосу, жаңартулар) таңдайды. Формализациялау үшін шабуыл графтары қолданылады және олар процессінің физикалық параметрлерімен кеңейтіледі.



Сурет 4 − Көпвекторлы шабуылдың өмірлік циклі (жалпыланған модель)

Енді көпвекторлық шабуылдарды кезеңдерін бөліп, атап айтқанда MITRE ATT&CK for ICS үшін оның тәсілдерін, әрекеттерін 2-кесте арқылы көрсетейік.

Кесте 2 − Шабуыл кезеңдерін тактикалармен/техникалармен сәйкестендіру (оның ішінде MITRE ATT&CK for ICS)

Кезең	Типтік тәсілдер	Countermeasures (мысал)
Барлау	Активтерді сканерлеу, конфигурацияны жинау, OSINT	ОТ активтерін түгендеу (инвентаризациялау), сканерлеуді мониторингтеу
Бастапқы қол жеткізу	Фишинг, VPN осалдықтары, supply-chain шабуылдары, USB тасымалдағыштар	MFA (көпфакторлы аутентификация), тасымалдағыштарды бақылау, жаңартуларды цифрлық қолтаңбамен растау
Көлденең (бүйірлік) қозғалу	RDP, jump-server-ді теріс пайдалану, тіркелу деректеріне қол жеткізу	Сегментация, PAM, әкімшілік арналарды шектеу
Жүйеде бекіну (тұрақты қолжетімділікті сақтау)	Бэкдорлар, конфигурацияларды өзгерту,микророграммаларды модификациялау	Тұтастықты бақылау, ақ тізімдеу (whitelisting)
Әсер етуі	PLC логикасын өзгерту, қорғаныс механизмдерін өшіру, шифрлау	Fail-safe режимдері, резервтеу, әрекет сценарийлері (playbooks)

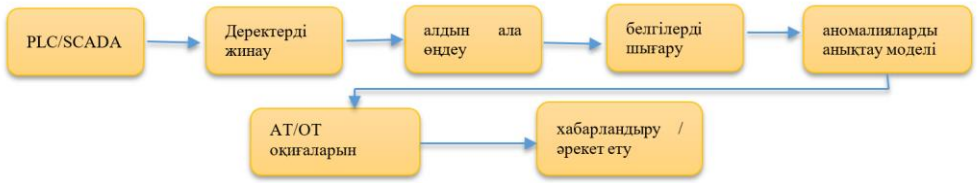
Stuxnet зиянды кодтың PLC логикасын өзгертіп, физикалық әсерлер тудыра алатынын дәлелдеген алғашқы мысалдардың бірі болды [7-8]. Жұқтыру векторларының комбинациясы (оның ішінде тасымалды дерек тасушылар), осалдықтарды пайдалану және технологиялық логиканы нысаналы түрде алмастыру көпвекторлы операциялардың жоғары күрделілігін көрсетеді.

Украинаның энергетикалық жүйесіне жасалған шабуылдар (2015/2016) кампаниялық сипатқа ие екенін көрсетті [15,16]. Ұзақ дайындық, фишинг, АТ-түйіндерді компрометациялау, SCADA-ға қол жеткізу және жойқын әрекеттер. CrashOverride/Industroyer қосалқы станциялардың өнеркәсіптік протоколдарын теріс пайдаланатын модульдік платформаны паш етті [12-14].

TRITON/Trisis (HatMan) Safety Instrumented Systems (SIS) жүйелеріне бағытталған шабуылымен ерекшеленеді [9-11], бұл тәуекелдерді адамдардың және қоршаған ортаның қауіпсіздігі саласына көшіреді. Инцидент safety-контроллерлерге баратын арналарды бөлек бақылаудың және инженерлік станцияларды қатаң басқарудың қажеттілігін айқындайды.
Өнеркәсіптік ортадағы ransomware инциденттері көбіне АТ-сегменттен басталып, ОТ-тың АТ-сервистерге тәуелділігі салдарынан өндірістің тоқтауына әкеледі. Сондықтан қорғаныс offline-backup, оқшауланған қалпына келтіру жоспарын және объектіні қауіпсіз күйге көшіру рәсімдерін қамтуы тиіс.

Қортындылар

Көпвекторлы шабуылдарды анықтау АТ және ОТ оқиғаларын корреляциялауды талап етеді, өйткені жекелей алынған белгілер аз мәнді болып көрінуі мүмкін [6]. Тәжірибелық пайплайн телеметрияны жинауды, алдын ала өңдеуді, белгілерді (features) шығаруды, детекторларды қолдануды (мысалы, Isolation Forest) және жалған іске қосылуларды азайту үшін желілік және жүйелік логтармен корреляциялауды қамтиды (5 сурет).



Сурет 5 − КФЖ-дегі аномалияларды анықтаудың тәжірибелық пайплайны

КФЖ шабуылдарының тәсілдерімен оларды өзара салыстыруды 3-кесте арқылы сипаттап көресеттік.

Кесте 3 − Киберфизикалық жүйелердегі (КФЖ) шабуылдарды анықтау тәсілдерін салыстыру

Тәсіл	Артықшылықтары	Шектеулері	Қолдану аясы
Сигнатураға негізделген IDS	Белгілі шабуылдарды дәл анықтайды	Жаңа шабуыл техникаларын анықтай алмайды	Периметр және IOC (индикаторлар)
ML негізделген аномалиялар	Белгісіз сценарийлерді анықтайды	Деректер дрейфі және жалған іске қосылулар	Процесс телеметриясы
Тұтастықты бақылау	Конфигурация өзгерістеріне қарсы тиімді	Эталондық база қажет	PLC/RTU және инженерлік станциялар
Цифрлық егіз	Физикалық процестермен байланысы бар, түсіндірмелі	Калибрлеу құнының жоғары болуы	Сындарлы (қауіпсіздікке жауапты) объектілер

Көпвекторлы шабуылдар көпдеңгейлі қорғауды (defense-in-depth) және ОТ ортасының ерекшеліктерін (кідіріс шектеулері, пайдаланудағы қауіпсіздік, жабдықтың ұзақ өмірлік циклі) ескеретін тәуекелдерді басқаруды талап етеді. СТ РК ISO/IEC 27001 ұсынымдары ОТ-топологияларға, қауіп-қатерлерге және эксплуатациялық шектеулерді ескере отырып қарсы шараларға басымдық береді [3]. ISA/IEC 62443 стандарттары өмірлік циклді, сондай-ақ компоненттер мен жүйелерге қойылатын талаптарды айқындайды [5], ал MITRE ATT&CK for ICS қорғаныс бақылауларының шабуыл техникаларын қамту деңгейін верификациялауға

көмектеседі [6]. Тәжірибелық ең төменгі шаралар мыналарды тұралы. Олар аймақтар мен арналарды сегментациялау (DMZ, jump-серверлер), көпфакторлы аутентификация (MFA) және привилегияларды басқару (PAM), конфигурациялар мен микропрограммалардың (firmware) тұтастығын бақылау, OT-трафикті пассивті мониторингтеу, сондай-ақ safety-режимдерді ескеретін инциденттерге әрекет ету жоспары.

Кесте 4 − Көпвекторлы шабуылдар тәуекелін төмендетуге арналған қорғаныс шараларының чек-листі

Деңгей	Іс-шаралар	Әсері
Архитектуралық	Аймақтар/арналарды сегментациялау, DMZ, жеке jump-серверлер	Инцидентті оқшаулау
Қолжетімділік	MFA, PAM, мердігерлердің қашықтан қолжетімділігін бақылау	Есептік деректердің бұзылу қаупін төмендету
Конфигурация	Ақ тізім (whitelisting), тұтастықты бақылау, қауіпсіз жаңартулар	Зиянды кодты енгізу қаупін азайту
Деңгей	Іс-шаралар	Әсері
Мониторинг	OT IDS + SIEM корреляциясы, ескерту (алертинг)	Ерте анықтау
Тұрақтылық	Резервтеу, offline-backup, fail-safe рәсімдері	Тоқтап қалу мен залалды азайту
Ұйымдастырушылық	Оқыту, оқу-жаттығулар, жеткізушілер аудиті, өзгерістерді басқару	Қателіктерді азайту және дайындық деңгейін арттыру

Көпвекторлы шабуылдар киберфизикалық жүйелер (КФЖ) қауіпсіздігінің жаңа бағытына айналды. лар жасырындықты, ауқымды әсерді және физикалық құралдарды біріктіріп, АТ және ОТ домендері арасында еркін ауыса алады. Архитектуралық алғышарттар мен нақты кейстерді (Stuxnet, Украинадағы шабуылдар, Industroyer, TRITON, ransomware) талдау ең ауыр мәселеселері контроллерлердің, safety-контурлардың және сенімді жабдықтау тізбектерінің компрометациясы кезінде туындайтынын көрсетеді. Тиімді қорғау кешенді тәсілді талап етеді. Олар сегментация, қолжетімділік пен тұтастықты бақылау, АТ/ОТ оқиғаларын корреляциялау, резервтеу, сондай-ақ АТ және ОТ мамандарының бірлескен жұмысы және қауіпсіздікті өмірлік цикл бойынша басқару қажеттігін талап етеді (СТ РК ISO/IEC 27001, NIST, ISA/IEC 62443).

Әдебиеттер тізімі

1. Cyber-Physical Systems Security – A Survey / A. Humayed et al // IEEE Internet of Things Journal. – 2017. – Vol. 4, № 6. – P. 1802-1831. https://arxiv.org/abs/1701.04525.
2. Liu Y. False Data Injection Attacks against State Estimation in Electric Power Grids / Y. Liu, P. Ning, M.K. Reiter // Proceedings of the 16th ACM Conference on Computer and Communications Security (CCS 2009). – New York: ACM, 2009. – P. 21-32.
3. СТ РК ISO/IEC 27001-2023. Информационные технологии. Методы обеспечения безопасности. Системы менеджмента информационной безопасности. Требования. – Астана: Комитет технического регулирования и метрологии, 2023.
4. NIST SP 800-82 Rev. 3. Guide to Operational Technology (OT) Security. – Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2023. https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-82r3.
5. ISA/IEC 62443. Industrial Automation and Control Systems Security: Series of Standards. – Research Triangle Park: International Society of Automation, 2023. https://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:85:0::::FSP_LANG_ID:25 (дата обращения: 25.01.2026).
6. MITRE ATT&CK® Framework. Knowledge Base for Adversary Tactics and Techniques (ICS Domain). – Версия 18. – MITRE Corporation, 2025. https://attack.mitre.org (дата обращения: 25.01.2026).
7. Karnouskos S. Stuxnet Worm Impact on Industrial Cyber-Physical System Security / S. Karnouskos // Proceedings of the 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. – Melbourne, 2011. – P. 4490-4494.
8. Langner R. To Kill a Centrifuge: A Technical Analysis of What Stuxnet's Creators Tried to Achieve. – Hamburg: The Langner Group, 2011. – 32 p.

9. TRITON: How It Disrupted Safety Systems and Changed the Threat Landscape of Industrial Control Systems / A. Carcano et al // Black Hat USA 2018 Proceedings. – Las Vegas, 2018.
10. CISA. MAR-17-352-01 HatMan (TRITON/TRISIS) – Safety System Targeted Malware (Update A). – Washington, DC: Cybersecurity and Infrastructure Security Agency, 2017. https://www.cisa.gov (дата обращения: 25.01.2026).
11. Google Cloud Threat Intelligence. TRITON Threat Actor Profile and Detection Methods. – Google, 2023. https://cloud.google.com/security (дата обращения: 25.01.2026).
12. Dragos Inc. CRASHOVERRIDE: Analysis of the Threat to Electric Grid Operations. – Hanover: Dragos, 2017.
13. CISA. CrashOverride Malware Alert and Mitigations. – Washington, DC, 2017. https://www.cisa.gov (дата обращения: 25.01.2026).
14. ESET Research. Industroyer2: Industroyer Reloaded. – Bratislava: ESET, 2022. https://www.welivesecurity.com (дата обращения: 25.01.2026).
15. CISA. IR-ALERT-H-16-056-01: Cyber-Attack Against Ukrainian Critical Infrastructure. – Updated 20.07.2021. – Washington, DC. https://www.cisa.gov (дата обращения: 25.01.2026).
16. SANS Institute, E-ISAC. Analysis of the Cyber Attack on the Ukrainian Power Grid. – Bethesda, 2016.
17. Tuptuk N. Security of Smart Manufacturing Systems / N. uptuk, S. Hailes // Journal of Manufacturing Systems. – 2018. – Vol. 47. – P. 93-106. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.04.007.
18. Ransomware on Cyber-Physical Systems: Taxonomies, Case Studies, Security Gaps and Open Challenges / M. Benmalek et al // Computers & Security. – 2023. – Vol. 124.
19. Securing the Industrial Internet of Things against Ransomware Attacks // Journal of Network and Computer Applications. – 2023. – Vol. 212.
20. False Data Injection Attack in Smart Grid CPS: Issues and Detection Algorithms // Computers & Security. – 2023. – Vol. 122.
21. False Data Injection Attack in Smart Grid: Model and Detection Based on Deep Reinforcement Learning // Frontiers in Energy Research. – 2022. – Vol. 10.
22. ENIGMA: An Explainable Digital Twin Security Solution for Cyber-Physical Systems // Computers & Security. – 2023. – Vol. 123.
23. A Survey on Security-Enhancing Digital Twins: Models, Applications and Challenges // Computer Communications. – 2025. – Vol. 214.

К.М. Сагиндыков[1] ,Ф.Б. Тебуева[2], Н.Ж. Мукушева[*]
[1]Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева,
010008, Республика Казахстан, г. Астана, ул. Сатпаева, 2
[2]Северо-Кавказский федеральный университет,
355017, Россия, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1,
[*]e-mail: nazym9_1@mail.ru

МНОГОВЕКТОРНЫЕ АТАКИ НА КИБЕРФИЗИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ: МЕХАНИЗМЫ, ОБНАРУЖЕНИЕ И ПРИМЕРЫ ЗАЩИТЫ

В статье представлен комплексный и углублённый обзор многовекторных кибератак, реализуемых в киберфизических системах (КФС). В ходе исследования подробно анализируются ключевые архитектурные предпосылки КФС, модели угроз на стыке информационных и операционных технологий (IT/OT), а также механизмы координации кибер- и физического воздействия. Систематизируются основные типы атак, включая внедрение ложных данных (FDI/FDIA), вредоносное программное обеспечение для промышленных систем управления и PLC, атаки на цепочки поставок (supply-chain), ransomware, атаки отказа в обслуживании (DoS), инсайдерские угрозы и прямое физическое вмешательство. Показаны их взаимосвязь и эффект усиления в рамках единого сценария компрометации.

Опираясь на открытые научные исследования и отраслевые отчёты, рассматриваются кейсы Stuxnet, атаки на энергетическую инфраструктуру Украины, CrashOverride/Industroyer, TRITON/Trisis, а также инциденты ransomware в промышленной среде. Кроме того, предложена риск-ориентированная матрица, основанная на принципе «Тип атаки – уровень КФС». Описан практический пайплайн выявления аномалий с использованием корреляции IT/OT-событий и методов машинного обучения.

Работа включает таблицы, схемы и графики, отражающие архитектуру КФС, жизненный цикл многовекторных операций, а также инженерные меры защиты в соответствии со стандартами СТ РК ISO/IEC 27001, NIST, ISA/IEC 62443 и MITRE ATT&CK for ICS.

Ключевые слова: *многовекторные атаки, FDI, supply-chain, ransomware, TRITON, Industroyer, обнаружение аномалий.*

K.M. Sagindykov[1] ,F.B. Tebueva[2], N.Zh. Mukusheva[*]
[1]L.N. Gumilyov Eurasian National University,
0100008, 2 Satpayev Street, Astana, Republic of Kazakhstan.
[2]North Caucasus Federal University,
355017, 1 Pushkina Street, Stavropol, Russia
[*]e-mail: nazym9_1@mail.ru

MULTI-VECTOR ATTACKS ON CYBER-PHYSICAL SYSTEMS: MECHANISMS, DETECTION, AND PROTECTION EXAMPLES

The article presents a comprehensive and in-depth review of multi-vector cyberattacks implemented in cyber-physical systems (CPS). The study provides a detailed analysis of the key architectural prerequisites of CPS, threat models at the intersection of information technology and operational technology (IT/OT), as well as the mechanisms for coordinating cyber and physical impacts. The main types of attacks are systematized, including false data injection (FDI/FDIA), malware targeting industrial control systems and PLCs, supply-chain attacks, ransomware, denial-of-service (DoS) attacks, insider threats, and direct physical interference. Their interconnection and amplification effects within a unified compromise scenario are demonstrated.

Based on open scientific studies and industry reports, the paper analyzes notable cases such as Stuxnet, cyberattacks on Ukraine's energy infrastructure, CrashOverride/Industroyer, TRITON/Trisis, and ransomware incidents in industrial environments. In addition, a risk-oriented matrix based on the principle «Attack Type – CPS Layer» is proposed. A practical anomaly-detection pipeline using IT/OT event correlation and machine-learning methods is described.

The work includes tables, diagrams, and graphs illustrating CPS architecture, the lifecycle of multi-vector operations, and engineering security measures aligned with the standards ST RK ISO/IEC 27001, NIST, ISA/IEC 62443, and MITRE ATT&CK for ICS.

Key words: *multi-vector attacks, FDI, supply-chain, ransomware, TRITON, Industroyer, anomaly detection.*

Авторлар туралы мәліметтер

Каким Молдабекович Сагиндыков – «Ақпараттық қауіпсіздік» кафедрасының т.ғ.к., доценті, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., Қазақстан; e-mail: sagindykov_km@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3315-798X.

Фариза Биляловна Тебуева – ф-м.ғ докторы,есептеу математикасы және кибернетика кафедрасының профессоры, «Солтүстік Кавказ федералдық университеті» ФГАОУ ВО, Ставрополь қ., Ресей Федерациясы; e-mail: ftebueva@ncfu.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9324-9259.

Назым Жумагельдыевна Мукушева* – «Ақпараттық қауіпсіздік» кафедрасының докторанты; Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., Қазақстан; e-mail: nazym9_1@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-5015-3617.

Сведения об авторах

Каким Молдабекович Сагиндыков – к.т.н., доцент кафедры «Информационная безопасность», Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилёва, г. Астана. Казахстан; e-mail: sagindykov_km@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3315-798X.

Фариза Биляловна Тебуева – доктор ф-м.н, профессор кафедры вычислительной математики и кибернетики, ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», г. Ставрополь, Российская Федерация; e-mail: ftebueva@ncfu.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9324-9259.

Назым Жумагельдыевна Мукушева – докторант кафедры «Информационная безопасность», Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилёва, г. Астана. Казахстан; e-mail: nazym9_1@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-5015-3617.

Information about the authors

Kakim Moldabekovich Sagindykov – Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Associate Professor of the Department of Information Security, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; e-mail: sagindykov_km@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3315-798X.

Fariza Bilyalovna Tebuyeva – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Computational Mathematics and Cybernetics, North Caucasus Federal University, Stavropol, Russian Federation; e-mail: ftebueva@ncfu.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9324-9259.

Nazym Zhumageldyevna Mukusheva* – PhD student (Doctoral student) of the Department of Information Security, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; e-mail: nazym9_1@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0009-0001-5015-3617.

Редакцияға енуі 06.01.2026
Өңдеуден кейін түсуі 20.02.2026
Жариялауға қабылданды 23.02.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-13

IRSTI: 55.47.03

CC BY 4.0
Check for updates

Z.A. Kutpanova[1], D.O. Kozhakhmetova[2]*, K.M. Suleymenov[3], G.N. Baiseitov[4], D.N. Shandronov[5]

[1]Astana IT University, 010000, Kazakhstan, Astana,Mangilik El, 55/11
[2]Shakarim University,
071412, Kazakhstanst, Semey, Glinka, 20 A
[3]L.N. Gumilyov Eurasian National University,
10000, Kazakhstan, Astana, Stepaeva 2
[4]R&D Center «Kazakhstan Engineering»,
010000, Kazakhstan Astana, Auezov Str. 2
[5]Military Engineering Institute of Radio Electronics and Communications,
Almaty, Kazakhstan, Zandosova, 53
*e-mail: d.kojahmetova@shakarim.kz

OPTIMIZATION OF FLIGHT TRAJECTORIES OF UNMANNED AERIAL VEHICLES WITH GIVEN FINAL CONDITIONS

Abstract: *The article considers the urgent problem of optimizing the flight trajectory of unmanned aerial vehicles (UAVs) with given final conditions. An approach to constructing the optimal UAV trajectory along successive sections using approximation by a fifth-degree polynomial is presented. A mathematical model is developed that takes into account the features of using local inertial coordinate systems on each section of the trajectory. A motion optimization method is proposed based on minimizing the quadratic functional characterizing both the accuracy of reaching specified points and the energy costs for control. The solution to the optimization problem is obtained using analytical design of the optimal controller. Analytical expressions are given for determining the optimal lateral acceleration of the UAV, ensuring the required positioning accuracy with minimal energy costs. Features of coordinate transformation between trajectory sections to ensure continuity of motion are considered. A practical example of calculating the optimal UAV trajectory with given initial conditions is given.*

Key words: *unmanned aerial vehicle, trajectory optimization, polynomial approximation, inertial coordinate systems, quadratic functional, optimal control, segmented trajectory*.

Introduction

Unmanned aerial vehicles (UAVs) are increasingly required to execute complex multi-stage missions under strict constraints on positioning accuracy, timing, and energy consumption. Typical missions include area reconnaissance, payload delivery, monitoring tasks, and return-to-base operations, each imposing specific kinematic and dynamic requirements. The successful execution of such missions critically depends on the quality of trajectory planning and control algorithms.

Trajectory planning for UAVs must account for physical and operational constraints, including flight dynamics, actuator limitations, time restrictions, and safety margins. In practical applications, inefficient trajectory generation may lead to excessive energy consumption or violation of mission constraints, resulting in incomplete task execution. These challenges become particularly

©Z.A. Kutpanova, D.O. Kozhakhmetova, K.M. Suleymenov, G.N. Baiseitov, D.N. Shandronov, 2026

pronounced in low-altitude environments, where flight paths must satisfy altitude limits, obstacle clearance, and predefined airspace corridors [1, 2].

Mission-critical applications such as search and rescue, medical logistics, and inspection tasks require deterministic and predictable trajectory behavior. In such scenarios, planning algorithms must ensure not only optimality with respect to a selected performance criterion, but also robustness and reproducibility of the generated trajectories. This motivates the use of deterministic trajectory planning methods that provide explicit analytical descriptions of motion and allow direct incorporation of boundary and continuity conditions.

Existing UAV trajectory planning approaches can be broadly classified into deterministic analytical methods and numerical or heuristic optimization techniques. Classical deterministic methods are based on variational calculus and optimal control theory, with Pontryagin's maximum principle serving as a fundamental tool for deriving optimal control laws for constrained dynamical systems. These methods provide mathematically rigorous solutions and allow analytical characterization of system behavior, but often suffer from high computational complexity and sensitivity to modeling accuracy, especially in high-dimensional problems. While numerical and heuristic methods, including evolutionary and swarm intelligence algorithms, offer flexibility, they generally lack guarantees of smoothness, continuity, and predictability, limiting their applicability in precision-critical missions.

In this context, the present study addresses the problem of deterministic UAV trajectory planning using a segment-wise, polynomial-based representation within local inertial coordinate frames**.** By employing fifth-degree polynomial approximations for each trajectory segment, the method enables analytical computation of position, velocity, and acceleration, while simultaneously allowing synthesis of optimal control laws with reduced computational complexity. The primary objective of the work is to develop a trajectory planning framework that guarantees smooth, feasible, and energy-efficient UAV motion along complex multi-stage paths, providing both high accuracy and practical implementability in real-time onboard systems [3-5].

Materials and methods

This paper considers the problem of optimizing the movement of an unmanned aerial vehicle (UAV) along a given trajectory while ensuring the required final conditions. The main task is to develop a method for forming an optimal UAV flight trajectory that ensures passage through specified points in space while minimizing energy consumption and ensuring the required positioning accuracy.

Mathematically, the problem is formulated as determining the optimal control of the UAV, ensuring movement along a trajectory passing through specified points in space with coordinates $(x^{(k)}, y^{(k)}, z^{(k)})$in the inertial reference system $(OXYZ)$, where k is the point number. It is necessary to minimize the functional characterizing both the accuracy of reaching the specified points and the energy costs for control.

Let us consider the problem of UAV movement along a given trajectory – the UAV flight is carried out along three successively given trajectories, $\gamma_1(t_0, t_1)$, $\gamma_2(t_1, t_2)$, $\gamma_3(t_2, t_3)$, where we will consider, $\gamma_1(t_0, t_1)$ – the initial interval, $\gamma_2(t_1, t_2)$ – the main flight interval, and $\gamma_3(t_2, t_3)$ – the interval including the return of the UAV to the starting point. In turn, $(t_0, t_3)$is the interval of the full flight, i.e. denotes the beginning and end of the flight. For a number of sections of at least 3, the problem will be solved similarly.

Methods of analytical synthesis of tasks and optimization of UAV control systems for flight along successive sections are based on the approaches of the theory of optimal control taking into account real conditions of application. The development begins with the creation of a mathematical model of the UAV flight trajectory. To describe the trajectory, an approximation by a polynomial of the appropriate type is used, which ensures an effective solution to control optimization problems [6-9].

$$\gamma(t) = \sum_{i=0}^{n} C_i t^i. \quad (1)$$

Here $\gamma(t)$is the change in spatial coordinates, $t$is the flight time of the UAV, in this case $t_0 \le t \le t_3$, and $C_i, i = \underline{1, n}$are the coefficients to be determined.

The polynomial is used to approximate the projection of the UAV trajectory onto each of the axes of the inertial reference system.

$$P_5(t) = C_0 + C_1 t + C_2 t^2 + C_3 t^3 + C_4 t^4 + C_5 t^5, \quad (2)$$

1. To uniquely define a polynomial, it is necessary to specify six conditions (according to the number of coefficients $C_0, C_1, C_2, C_3, C_4, C_5$). These conditions may include the position, speed, and acceleration of the UAV at the initial and final points of the trajectory.

2. The fifth-degree polynomial ensures the continuity of not only the position function itself, but also its first and second derivatives, which corresponds to the continuity of velocity and acceleration. This is critically important for the feasibility of the trajectory by a real UAV, taking into account its dynamic characteristics.

3. A polynomial of degree less than 5 does not provide sufficient flexibility to simultaneously satisfy conditions for position, velocity, and acceleration at boundary points.

4. Polynomials of higher degrees can lead to undesirable oscillations of the trajectory between given points, which complicates control and increases energy costs.

5. The fifth-degree polynomial provides a compromise between the accuracy of approximation and the computational complexity of trajectory planning algorithms.

Polynomial (2) is used to approximate the projections of the UAV trajectory onto each of the axes of the inertial reference system. Thus, the spatial trajectory of the UAV is represented by three independent polynomials:

$$x(t) = C_0 + C_1 t + C_2 t^2 + C_3 t^3 + C_4 t^4 + C_5 t^5$$
$$y(t) = C_{0y} + C_{1y} t + C_{2y} t^2 + C_{3y} t^3 + C_{4y} t^4 + C_{5y} t^5$$
$$z(t) = C_{0z} + C_{1z} t + C_{2z} t^2 + C_{3z} t^3 + C_{4z} t^4 + C_{5z} t^5.$$

where $x(t), y(t), z(t)$are the coordinates in the inertial reference frame at the moment of time t.

To determine the coefficients of the polynomials, it is necessary to set the boundary conditions for each section of the trajectory. Such conditions include:

1. Coordinates of the UAV at the starting and ending points of the section:

$$\{x(t_0) = x_0, y(t_0) = y_0, z(t_0) = z_0.$$

2. Velocity projections at the initial and final points:

$$\{\dot{x}(t_0) = v_{x0}, \quad \dot{x}(t_f) = v_{xf}, \dot{y}(t_0) = v_{y0}, \quad \dot{y}(t_f) = v_{yf}, \dot{z}(t_0) = v_{z0}, \quad \dot{z}(t_f) = v_{zf}.$$

3. Acceleration projections at the initial and final points (if necessary):

$$\{\ddot{x}(t_0) = a_{x0}, \quad \ddot{x}(t_f) = a_{xf}, \ddot{y}(t_0) = a_{y0}, \quad \ddot{y}(t_f) = a_{yf}, \ddot{z}(t_0) = a_{z0}, \quad \ddot{z}(t_f) = a_{zf}.$$

Defining all these conditions allows us to uniquely calculate the coefficients of the polynomials for each coordinate.

To determine the kinematic characteristics of the UAV motion, it is necessary to find the derivatives of the polynomial function (2). The first derivative with respect to time will give an expression for the speed, and the second for the acceleration.

Thus, the fifth-degree polynomial model provides an effective representation of the UAV flight trajectory, allowing the analytical determination of the position, speed and acceleration of the device at any time along the trajectory, which is the basis for constructing an optimal control system.

Results and discussion

The axes of the inertial coordinate system are the lines that describe the position of the UAV in space and time in the inertial reference frame.

An inertial reference frame is a system in which the principle of inertia is preserved, i.e. if no external forces act on the UAV, it will move at a constant speed or remain at rest.

In practice, pairwise orthogonal lines are considered as the axes of the inertial system; for example, in three-dimensional space, X, Y, Zaxes designated as , ko are used, which determine the location of the UAV in space and describe the movement of the UAV.

Let us differentiate the polynomial from (2) twice, then

$$\dot{P}_5(t) = C_1 + 2C_2 t + 3C_3 t^2 + 4C_4 t^3 + 5C_5 t^4, \quad (3)$$

$$\ddot{P}_5(t) = 2C_2 + 6C_3 t + 12C_4 t^2 + 20C_5 t^3, \quad (4)$$

Equations (3) and (4) define the projections of velocity and acceleration. The coefficients $(C_0, \dots, C_5)$are determined by solving the system of equations for polynomials $\left(P_5(t), \dot{P}_5(t), \ddot{P}_5(t)\right)$for the end of the guidance. These expressions (3), (4) are used to calculate the projections of the UAV velocity and acceleration on the axes of the inertial coordinate system:

$$\{v_{x(t)} = C_{1x} + 2C_{2x}t + 3C_{3x}t^2 + 4C_{4x}t^3 + 5C_{5x}t^4, v_{y(t)} = C_{1y} + 2C_{2y}t + 3C_{3y}t^2 + 4C_{4y}t^3 + 5C_{5y}t^4, v_{z(t)} = C_{1z} + 2C_{2z}t + 3C_{3z}t^2 + 4C_{4z}t^3 + 5C_{5z}t^4. \quad (11)$$

Also

$$\{a_{x(t)} = 2C_{2x} + 6C_{3x}t + 12C_{4x}t^2 + 20C_{5x}t^3, a_{y(t)} = 2C_{2y} + 6C_{3y}t + 12C_{4y}t^2 + 20C_{5y}t^3, a_{z(t)} = 2C_{2z} + 6C_{3z}t + 12C_{4z}t^2 + 20C_{5z}t^3 \quad (5)$$

The coefficients C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 for each coordinate axis are determined by solving a system of equations formed on the basis of boundary conditions. This allows us to obtain a trajectory that not only passes through the specified points in space, but also provides the required values of speed and acceleration at these points.

A common application task is the flight of a UAV along a trajectory passing through specified points in space with specified coordinates $\left(x^{(k)}, y^{(k)}, z^{(k)}\right)$in an inertial reference system $(OXYZ)$, where k – indicates the number of the point through which the trajectory will pass.

Let us consider the problem of determining the trajectory of the UAV, where these sections are consecutive, on each of which the guidance of the optimal UAV flight is determined, and the requirements of the control system (CS) will also be met. The specified trajectory must pass with a given accuracy approximately to the specified points, and also ensure the task of minimizing the integral losses associated with the maneuvers of the UAV movement and the change in control overload. It is necessary to form optimality criteria, including the following flight components:

1. characteristics of the accuracy of achieving the set goal, reaching the final position of the UAV;
2. characteristic of integral losses during the control period.

This problem is solved by the classical Boltz problem of minimizing a functional of the form:

$$J = g(x_k, t_k) + \int_{t_0}^{t_k} F(x, t)dt, \quad (6)$$

Here $g(x_k, t_k)$ describes the final goal of the state $x(t)$ on the section $[t_0, t_k]$, and $\int_{t_0}^{t_k} F(X, t)dt$defines the integral losses in controlling the UAV movement. Note that the function $g(x_k, t_k)$defines the final goal of the UAV flight section between the specified k, namely, between the initial and final points, including the internal points of the UAV movement trajectory. Consequently, the function $g(x_k, t_k)$will characterize the minimum deviation of the UAV flight trajectory from the points $x_k, k = \underline{1, N}$, where $N$is the number of intermediate predetermined points of the UAV movement route.

To determine the trajectory of the UAV, a problem similar to the problems of rigid body kinematics is considered, determining the movement of the center of mass, thus, functional (5) is transformed into a quadratic functional [10-12].

$$J = X_k^T R X_k + \int_{t_0}^{t_k} [X(t)^T Q(t) X(t) + U(t)^T S(t) U(t)]dt, \quad (7)$$

Here $X_k = [\Delta x_k, \Delta y_k, \Delta z_k]^T$is the vector of minimum deviations relative to the intermediate point of the route, $X(t) = [x(t), y(t), z(t)]^T$is the vector of coordinates of the center of mass of the UAV, $U(t) = \left[a_x(t), a_y(t), a_z(t)\right]^T$is the control vector of normal accelerations of the center of mass.

To solve the problem of optimizing the functional (7), it is necessary to solve the problem of choosing matrices $R, Q(t), S(t)$. The functional (7) includes variable terms of different dimensions and values $X_k, X(t), U(t)$, so it is necessary to transform them into dimensionless quantities by normalizing using matrices $R, Q(t), S(t)$, and the admissible values of the variables $X_k, X(t), U(t)$included in the functional (6) were taken as normalizing coefficients.

To determine the optimal control U(t), it is necessary to solve the boundary value problem, i.e. to simultaneously solve the system of differential equations (5) and (7). In this case, in system (6), the specified conditions are the initial conditions, and in system (7), the specified conditions are the final conditions. The problem can be solved by the sweep method, in which, at the initial stage,

approximate boundary values are specified for one of the systems (5) or (7), and then systems (5) and (7) are repeatedly integrated in direct and reverse time until the specified accuracy is achieved.

The kinematics of the UAV guidance scheme to a given point $\left(O^{(k)}, X^{(k)}, Y^{(k)}, Z^{(k)}\right)$ of the inertial reference system is shown in Fig. 1, the ordinal number of the point in space through which the UAV will move.

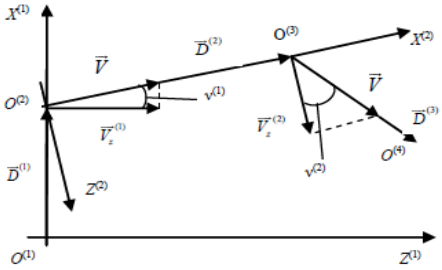


Figure 1 – UAV guidance

New inertial coordinate system $\left(O^{(k)}, X^{(k)}, Y^{(k)}, Z^{(k)}\right)$. For each segment of the UAV flight, the origin of the coordinate system $O^{(k)}$will coincide with the starting point of the trajectory. Then the axis $O^{(k)}X^{(k)}$indicates the direction of movement to the next point, the axis is directed vertically upward, $O^{(k)}Y^{(k)}$and $O^{(k)}Y^{(k)}$the axis forms $O^{(k)}Z^{(k)}$a right-handed coordinate system with the axes $O^{(k)}X^{(k)}$. Designations:

3. $\underline{V}$ – the UAV velocity vector, and for the simplicity of the mathematical model during programming we will assume that $\left|\underline{V}\right| = const$;
4. $v^{(k)}$– y – the orientation angle of the UAV velocity vector at the end of $k$the -th guidance section;
5. $\underline{D}^{(k)}$– the beginning of the given inertial coordinate system on $k$the -th guidance section

$O^{(k)}$– is the origin of the given inertial coordinate system on k the guidance section.

Let us consider the movement of a UAV in a horizontal plane relative to a given inertial coordinate system in k-th guidance section, which is described by a system of linear differential equations

$$\{\dot{X}^{(k)} = X_x^{(k)}, \quad X^{(k)}(0) = X_0^{(k)}, \dot{Z}^{(k)} = V_z^{(k)}, \quad Z^{(k)}(0) = Z_0^{(k)}, \dot{V}_x^{(k)} = a_x^{(k)} \tag{8}$$

$$V^{(k)}(0) = V_{x0}^{(k)}, \dot{V}_z^{(k)} = a_z^{(k)}, \quad V_z^{(k)}(0) = V_{z0}^{(k)}, \tag{9}$$

where $\boldsymbol{X^{(k)}, Z^{(k)}}$are the coordinates of the UAV in $\boldsymbol{k}$the -th coordinate system; $\boldsymbol{V_x^{(k)}, V_z^{(k)}}$are the projections of the UAV velocity vector $\underline{\boldsymbol{V}}$onto the axes of the -th $\boldsymbol{k}$ coordinate system; $\boldsymbol{a_x^{(k)}, a_z^{(k)}}$are the accelerations of the UAV in $\boldsymbol{k}$the -th coordinate system.

As an example, we present graphs of changes $\boldsymbol{\left(x(t), z(t)\right)}$ Figure 2.

In this case, time is considered from$\boldsymbol{t \in [0,2; 4,4]}$ with step $\boldsymbol{h = 0,2}$. We will also provide

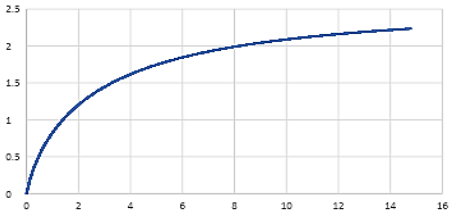


Figure 2 – Movement of the UAV at a constant speed and a changing angle with a certain step

Then the UAV movement graphs in different projections will be as follows Figure 3 $(\boldsymbol{x(t)};\ \boldsymbol{z(t)})$:

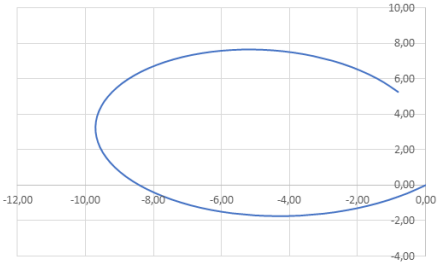


Figure 3 – UAV movement at constant speed and angular acceleration on a plane $(\boldsymbol{OZ})$

The examples cover two illustrative cases. In the first case, the UAV maintains a constant speed and heading angle; under these parameters, the trajectory forms a straight line, as predicted by the model. In the second case, the UAV flies at a constant speed but with constant angular acceleration, which leads to more complex curved trajectories when viewed from different planar projections. Both scenarios confirm that the mathematical structure and polynomial representation accurately reflect the underlying kinematic behavior.

The inertial coordinate system provides a rigorous and physically consistent framework for solving the UAV trajectory control problem, enabling an analytical description of motion in space and time while preserving the principle of inertia. Representing each flight segment in a local inertial frame and approximating the trajectory with fifth-degree polynomials allows precise satisfaction of boundary conditions on position, velocity, and acceleration. This ensures smooth segment-to-segment transitions and accurate passage through predefined waypoints.

Conclusion

The study presents a segmented approach to UAV trajectory determination, where each segment is defined by a local inertial coordinate system and a fifth-degree polynomial approximation. This structure ensures that the aircraft closely approaches the specified waypoints, minimizing the integral losses caused by control maneuvers and overload changes. The proposed method applies an analytical design of the optimal controller, which helps to reduce the computational complexity and supports efficient real-time computation.

The paper applies methods of analytical synthesis of tasks and optimization of UAV control systems for flight along successive sections, while it is necessary to take into account the requirements for satisfying real UAV flight conditions. The mathematical model of the UAV flight trajectory in one of the papers is based on the approximation of the UAV flight trajectory relative to the inertial system using a polynomial. In this case, boundary and initial conditions are specified to determine the coefficients of the polynomial.

Then the problem of determining the kinematic characteristics of the UAV's motion is considered, for this it is necessary to find the derivatives of the polynomial function. The first derivative with respect to time will give an expression for the speed, and the second - for the acceleration.

Thus, the fifth-degree polynomial model provides an effective representation of the UAV flight trajectory, allowing analytical determination of the position, speed and acceleration of the device at any time along the trajectory section, which is the basis for constructing an optimal control system.

The problem is then generalized using an inertial system, which provides lines describing the position of the UAV in space and time in an inertial frame of reference, and preserves the principle of inertia, i.e. if no external forces act on the UAV, it will move at a constant speed or remain at rest.

In practice, paired orthogonal lines are considered as the axes of the inertial system; for example, in three-dimensional space, axes designated as X, Y, Z, ko are used , which determine the position of the UAV in space and describe the movement of the UAV.

References

1. Alqudsi Y. UAV swarms: research, challenges, and future directions / Y. Alqudsi, M. Makaraci // Journal of Engineering and Applied Science. – 2025. – Vol. 72. – P. 12. https://doi.org/10.1186/s44147-025-00582-3.
2. UAV Path planning trends from 2000 to 2024: A bibliometric analysis and visualization / Q. Wu et al / Drones. – 2025. – Vol. 9. – P.128. https://doi.org/10.3390/drones9020128.
3. Online decision making and path planning framework for safe operation of unmanned aerial vehicles in urban scenarios / M. Quinones-Grueiro et al // International Journal of Prognostics and Health Management. – 2021. – Vol. 12. – P. 3. https://doi.org/10.36001/ijphm.2021.v12i3.2953.
4. A spherical vector-based adaptive evolutionary particle swarm optimization for UAV path planning under threat conditions / Y. Liu et al // Scientific Reports. – 2025. – Vol. 15. – P. 2116. https://doi.org/10.1038/s41598-025-85912-4.
5. Performance analysis of hybrid optimization approach for UAV path planning control using FOPID-TID controller and HAOAROA algorithm / N. Basil et al // Scientific Reports. – 2025. – Vol. 15. – P. 4840. https://doi.org/10.1038/s41598-025-86803-4.
6. Rgg-pso+: Random geometric graphs based particle swarm optimization method for UAV path planning / Y. Liu et al // International Journal of Computational Intelligence Systems. – 2024. – Vol. 17. – P. 127. https://doi.org/10.1007/s44196-024-00511-x.

7. Zhao Y. Survey on computational-intelligence-based UAV path planning / Y. Zhao, Z. Zheng, Y. Liu // Knowledge-Based Systems. – 2018. – Vol. 158. – P. 54-64. https://doi.org/10.1016/j.knosys.2018.05.033.
8. Aljalaud F. Optimizing Autonomous Multi-UAV Path Planning for Inspection Missions: A Comparative Study of Genetic and Stochastic Hill Climbing Algorithms / F. Aljalaud, Y. Alohali // Energies. – 2025. – Vol.18(1). – P. 50. https://doi.org/10.3390/en18010050.
9. Enhanced Multi-UAV Path Planning in Complex Environments With Voronoi-Based Obstacle Modelling and Q-Learning / W. Su et al // International Journal of Aerospace Engineering. – 2024. – Vol. 1. – P. 5114696. https://doi.org/10.1155/2024/5114696.
10. Hybrid PSO-HSA and PSO-GA algorithm for 3D path planning in autonomous UAVs / B. Abhishek et al // SN Applied Sciences. – 2020. – Vol. 2. – P. 1-16. https://doi.org/10.1007/s42452-020-03498-0.
11. A Comprehensive Review of Energy-Efficient Techniques for UAV-Assisted Industrial Wireless Networks / Yijia Zhang et al // Energies. – 2024. – Vol. 17(18). – P. 4737. https://doi.org/10.3390/en17184737.
12. Pounds P. Modelling and control of a large quadrotor robot / P. Pounds, R. Mahony, P. Corke // Control Engineering Practice. – 2010. – Vol. 18. – P. 691-699. https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2010.02.008.

Acknowledgments

This research was supported by the Science Committee of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan, grant number BR 249015/0224.

З.А. Кутпанова[1], Д.О. Кожахметова[2*], К.М. Сулейменов[3], Г.Н. Байсетов[4], Д.Н. Шандронов[5]
[1]Astana IT University,
010000, Қазақстан, Астана қ., проспект Мәңгілік Ел, 55/11
[2]Шәкәрім университеті,
071412, Қазақстан, Семей қ., Глинка к-сі, 20 А
[3]Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
10000, Қазақстан, Астана қ., Сәтбаев к-сі, 2,
[4]Қазақстан инжиниринг R&D орталығы,
010000, Қазақстан, Астана қ., Әуезов көшесі, 2
[5]Қазақстан Республикасы Қорғаныс Министрлігі
Радиоэлектроника және байланыс әскери-инженерлік институты,
050040, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.,Жандосов көшесі, 53
*e-mail: d.kojahmetova@shakarim.kz

ҰШҚЫШСЫЗ ҰШУ АППАРАТТАРЫНЫҢ ҰШУ ТРАЕКТОРИЯЛАРЫН СОҢҒЫ ШАРТТАРДЫ ЕСКЕРЕ ОТЫРЫП ОҢТАЙЛАНДЫРУ

Мақалада соңғы шарттары алдын ала берілген ұшқышсыз ұшу аппараттарының (ҰҰА) ұшу траекториясын оңтайландырудың өзекті мәселесі қарастырылады. Бесінші дәрежелі полиноммен жуықтау әдісін қолдана отырып, бірізді учаскелер бойымен ҰҰА-ның оңтайлы траекториясын құру тәсілі ұсынылған. Траекторияның әрбір учаскесінде жергілікті инерциялық координаталар жүйесін қолдану ерекшеліктерін ескеретін математикалық модель әзірленген. Қозғалысты оңтайландыру әдісі ұсынылады, ол берілген нүктелерге жету дәлдігін де, басқаруға кететін энергия шығындарын да сипаттайтын квадраттық функционалды минимизациялауға негізделген. Оңтайландыру есебінің шешімі оңтайлы контроллерді аналитикалық жобалау арқылы алынған. Энергия шығындары минималды болған жағдайда қажетті позициялау дәлдігін қамтамасыз ететін ҰҰА-ның оңтайлы бүйірлік үдеуін анықтауға арналған аналитикалық өрнектер келтірілген. Қозғалыстың үздіксіздігін қамтамасыз ету үшін траектория бөлімдері арасындағы координаталарды түрлендіру ерекшеліктері қарастырылған. Бастапқы шарттары берілген жағдайда ҰҰА-ның оңтайлы траекториясын есептеудің практикалық мысалы ұсынылған.

Түйін сөздер: *ұшқышсыз ұшу аппараттары; траекторияларды оңтайландыру; полиномдық жуықтау; инерциялық координаталар жүйелері; квадраттық функционалдар; оңтайлы басқару; таңдалған траектория.*

З.А. Кутпанова[1], Д.О Кожахметова[2]*, К.М. Сулейменов[3], Г.Н.Байсетов[4], Д.Н. Шандронов[5]
[1]Astana IT University, 010000, Казахстан, г. Астана, проспект Мәңгілік Ел, 55/11
[2]Шәкәрім университеті,
071412, Казахстан, г. Семей, Глинки, 20 А
[3]Евразийский Национальный университет им. Л.Н. Гумилева,
10000, Казахстан, г. Астана, Сатбаева 2
[4]Қазақстан инжиниринг R&D центр,
010000, Казахстан, г. Астана, Ауезова, 2
[5]Военно-инженерный институт радиоэлектроники и связи,
050040, Казахстан, г. Алматы, Жандосова, 53
*e-mail: d.kojahmetova@shakarim.kz

ОПТИМИЗАЦИЯ ТРАЕКТОРИЙ ПОЛЕТА БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С УЧЕТОМ КОНЕЧНЫХ УСЛОВИЙ

Статья рассматривает актуальную проблему оптимизации траектории полёта беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с определенными конечными условиями. Представлен подход к построению оптимальной траектории БПЛА вдоль последовательных участков с использованием приближения по полиномиалу пятой степени. Разработана математическая модель, учитывающая особенности использования локальных инерционных координатных систем на каждом участке траектории. Предложен метод оптимизации движения, основанный на минимизации квадратической функциональности, характеризующей как точность достижения определенных точек, так и затраты энергии для управления. Решение проблемы оптимизации получено с использованием аналитического дизайна оптимального контроллера. Приведены аналитические выражения для определения оптимального бокового ускорения БПЛА, обеспечивающего требуемую точность позиционирования при минимальных затратах энергии. Рассмотрены особенности преобразования координат между секциями траектории для обеспечения непрерывности движения. Приведен практический пример расчета оптимальной траектории БПЛА при данных начальных условиях.

Ключевые слова: *беспилотные летательные аппараты; оптимизация траекторий; полиномиальное приближение; инерциальные системы координат; квадратично-функциональные; оптимальное управление; выбранная траектория.*

Авторлар туралы мәліметтер

Зарина Алмабековна Кутпанова – магистр, компьютерлік инженерия кафедрасының оқытушысы, Astana IT University, Астана, Қазақстан; e-mail: zarina.almabekkyzy@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-4860-9244.

Динара Ошановна Кожахметова* – PhD, «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Шәкәрім университеті, Семей, Қазақстан; e-mail: d.kojahmetova@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4327-3899.

Кенесары Машимович Сулейменов – PhD, физика-математика ғылымдарының кандидаты «Математика және компьютерлік модельдеу» кафедрасы Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия Ұлттық Университеті, Астана, Қазақстан; e-mail: kenessarymath@gmail.com.

Гани Нуралиевич Байсеитов – техника ғылымдарының кандидаты, профессор «Казахстан инжиниринг» R&D орталығы, Астана, Қазақстан; e-mail: nesipova@rdke. https://orcid.org/0009-0001-0154-0071.

Дмитрий Шандронов – магистр, Қазақстан Республикасы Қорғаныс Министрлігі Радиоэлектроника және байланыс әскери-инженерлік институты, Алматы, Қазақстан; e-mail: shan_dima@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-2361-2542.

Сведения об авторе

Зарина Алмабековна Кутпанова – магистр, преподаватель кафедры компьютерное инженерия; Astana IT University, Астана Казахстан; e-mail: zarina.almabekkyzy@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-4860-9244.

Динара Ошановна Кожахметова* – PhD, ассоциированный профессор кафедры «Автоматизация и информационные технологии», университет Шәкәрім, Семей, Казахстан; e-mail: d.kojahmetova@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4327-3899.

Кенесары Машимович Сулейменов – PhD, кандидат физико-математических наук кафедры «Математическое и компьютерное моделирование», Евразийский Национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан; e-mail:kenessarymath@gmail.com.

Гани Нуралиевич Байсеитов – кандидат технических наук, профессор R&D центр «Казахстан инжиниринг» Астана, Казахстан; e-mail:nesipova@rdke. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-0154-0071.

Дмитрий Шандронов – магистр, Военно-инженерный институт радиоэлектроники и связи, Министерства Обороны Республики Казахстан, Алматы, Казахстан; e-mail: shan_dima@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-2361-2542.

Information about the authors

Zarina Kutpanova – master of the Department «Computer engineering», Astana IT University, Astana, Kazakhstan; e-mail: zarina.almabekkyzy@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-4860-9244.

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.

Kenesary Suleymenov – PhD, Candidate of physical-mathematical sciences of the department «Mathematical and computer modelling». LN Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; e-mail:kenessarymath@gmail.com.

Gani Baiseitov – candidate of technical Sciences, Professor R&D Center «Kazakhstan Engineering», Astana, Kazakhstan; e-mail:nesipova@rdke. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-0154-0071.

Dmitry Shandronov – master of the Military Engineering Institute of Radio Electronics and Communications, Almaty, Kazakhstan; e-mail: shan_dima@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-2361-2542.

Received 05.01.2026
Revised 19.02.2026
Accepted 20.02.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-14

МРНТИ: 50.13.13

CC BY 4.0
Check for updates

М.Ж. Ергеш[1]*, Б.Ж. Ергеш[1], А.Р. Оразаева[2], А. Талгат[2]
[1]Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилёва,
010000, Казахстан, Астана, ул. Сатпаева, 2
[2]АО «Казахский университет технологии и бизнеса им. К. Кулажанова»,
010000, Казахстан, Астана, ул. Мухамедханова, 37А
*e-mail: shymkent90@mail.ru

ПОСТРОЕНИЕ И ЛИНГВИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВОПРОСНО-ОТВЕТНОГО КОРПУСА KAZAKH HISTORYQA

Аннотация: *Цифровизация среднего образования в Казахстане усиливает потребность в специализированных казахскоязычных ресурсах, поддерживающих интеллектуальные вопросно-ответные системы по школьным предметам. Однако существующие QA-датасеты в основном ориентированы на высокоресурсные языки и не охватывают содержание учебных дисциплин, в частности истории Казахстана. В данной работе представлен и подробно проанализирован корпус Kazakh HistoryQA – первый специализированный вопросно-ответный ресурс на казахском языке, созданный на основе шести официальных учебников по истории Казахстана для 5-10 классов. Корпус включает 208 тематических секций, около 180 тысяч токенов и 661 QA-пару с привязкой к точным координатам ответного спана, что обеспечивает совместимость со стандартными пайплайнами обучения моделей машинного чтения, включая библиотеку HuggingFace.*

Проведён многоуровневый анализ корпуса: статистика длины контекстов, вопросов и ответов, распределение материалов по классам и учебникам, типологизация вопросов на фактологические, хронологические, процедурные, причинно-следственные и сравнительные. Дополнительно выполнено морфологическое профилирование текста, построен частотный словарь и выделены предметные термины. Для оценки надежности корпуса как бенчмарка реализованы базовые модели выбора предложений (случайный выбор, TF-IDF, BM25), среди которых BM25 показал лучшие результаты. Представленный корпус создаёт основу для последующих исследований и разработки гибридных онтологически обогащённых QA-систем в сфере образования.

Ключевые слова: *Казахстанская история, OCR, QA, онтология, образовательная NLP, RAG, тезаурус, онтология.*

©М.Ж. Ергеш, Б.Ж. Ергеш, А.Р. Оразаева, А. Талгат, 2026

Введение. Развитие цифровых образовательных ресурсов в системе среднего образования Казахстана требует наличия полноценных казахскоязычных корпусов, ориентированных на типовые школьные предметы и формы учебной деятельности. В области автоматической обработки естественного языка это, прежде всего, корпусные и бенчмарк-ресурсы для задач машинного чтения и вопросно-ответных систем, способных работать с аутентичными текстами школьных учебников. При этом для предметной области истории Казахстана до настоящего времени отсутствовал единый, систематически описанный корпус, который одновременно отражал бы структуру школьного курса 5-10 классов и позволял бы проводить воспроизводимую оценку алгоритмов вопросно-ответного поиска [1].

В данной статье представляется корпус Kazakh HistoryQA, построенный на материале шести официальных учебников «История Казахстана» для 5-10 классов. Корпус включает 208 тематических секций, извлечённых из указанных учебников: 46 секций для 5 класса, 54 секции для 6 класса, 29 – для 7 класса, 28 – для 8 класса, 29 – для 9 класса и 22 – для 10 класса, что в сумме даёт 177 501 нормализованный токен. Для этих текстов сформировано 661 вопросно-ответная пара с сохранением фрагмента-доказательства и точных координат ответного спана в исходном контексте; на их основе построен датасет в формате DatasetDict с обучающей, валидационной и тестовой подвыборками (соответственно 528, 60 и 133 примера).

Типологизация вопросов по поверхностным лингвистическим маркерам выявила доминирование фактологических вопросов (473 из 661, около 72%), а также наличие хронологических (118 вопросов), процедурных (44 вопроса), причинно-следственных (24 вопроса) и единичных сравнительных заданий. Частотный анализ корпуса и CSV-онтологии показал высокую долю предметной лексики, а эвристическое морфологическое профилирование по основным казахским падежным и множественным суффиксам выявило значимую нагрузку генитивных и локативных форм (около 6-7% токенов каждая), что отражает специфику исторического дискурса с акцентом на принадлежностные и пространственно-временные отношения [2].

Методы исследования. Корпус Kazakh HistoryQA построен на основе шести учебников по предмету «История Казахстана» для 5-10 классов, представленных в виде отдельных каталогов *Kazakh_History_5–Kazakh_History_10*. Исходные тексты загружаются из файлов texts_corpus.csv для каждой книги, где для каждой записи указаны идентификаторы учебника (book_id), тематической секции (section_id) и соответствующий фрагмент учебного текста (text). Нормализованная версия текста (text_n) формируется автоматически с учётом удаления служебных символов, унификации апострофов, дефисов и пунктуации.

Дополнительно поверх текстового корпуса формируются два связанных слоя данных. Первый слой – вопросно-ответная разметка, извлекаемая из файлов qa_open.jsonl для каждого учебника и включающая поля question, answer, evidence_quote, book_id и section_id. На основе этих файлов и соответствующих текстовых секций строится итоговый набор из 661 QA-записи с точными координатами ответного спана в контексте, который затем разбивается на обучающую, валидационную и тестовую подвыборки. Второй слой – CSV-онтология, агрегируемая из файлов ontology_triples.csv и содержащая 2318 отфильтрованных определений, привязанных к книгам и секциям. Эти онтологические сведения используются для построения онто-префиксов в контексте и для лингвистического анализа терминологической плотности корпуса [3].

Результаты исследований. Рисунок 1 иллюстрирует структуру текстового корпуса по классам, показывая количество секций, извлечённых из каждого учебника. Наибольшее число секций приходится на 6 класс (54 секции), несколько меньше – на 5 класс (46 секций), тогда как для 7, 8 и 9 классов наблюдается сопоставимый уровень детальности (29, 28 и 29 секций соответственно).

Минимальное количество секций фиксируется для 10 класса (22 секции), что отражает более крупную тематическую сегментацию старшего учебника. Такое распределение важно учитывать при интерпретации статистики корпуса и при проектировании обучающих и тестовых выборок.

Таблица 1 суммирует основные количественные характеристики текстового корпуса по классам: число секций, их суммарный объём в символах и токенах, а также средние и медианные длины секций.

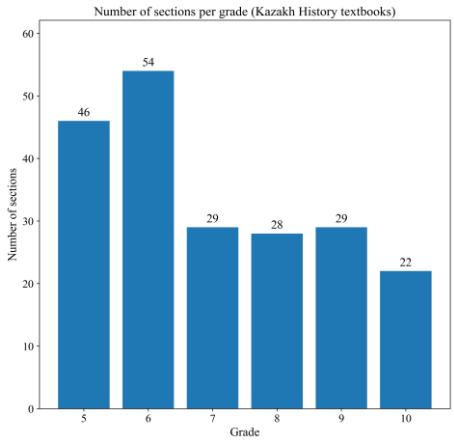


Рисунок 1 – Распределение числа тематических секций по классам в учебниках «История Казахстана» (5-10 классы)

Таблица 1 – Статистики секций корпуса Kazakh HistoryQA по классам

Класс	Число секций	Объём, символов (total_chars)	Объём, токенов (total_tokens)	Среднее число токенов в секции	Медиана токенов в секции
5	46	195 468	24 570	534.13	568.5
6	54	375 271	47 635	882.13	747.0
7	29	157 019	20 240	697.93	705.0
8	28	372 027	46 977	1 677.75	1 507.0
9	29	125 529	15 234	525.31	583.0
10	22	185 232	22 845	1 038.41	1 041.0

Видно, что при сопоставимом числе секций в 7-9 классах существенно различается плотность текста: особенно объёмными являются секции 8 и 10 классов, где среднее число токенов на секцию превышает 1000, тогда как для 5 и 9 классов типичная секция содержит около 500-550 токенов. Эти различия отражают усложнение и укрупнение тематических блоков на старших ступенях школьного курса истории.

Рисунок 2 показывает гистограмму длины секций корпуса Kazakh HistoryQA в токенах.

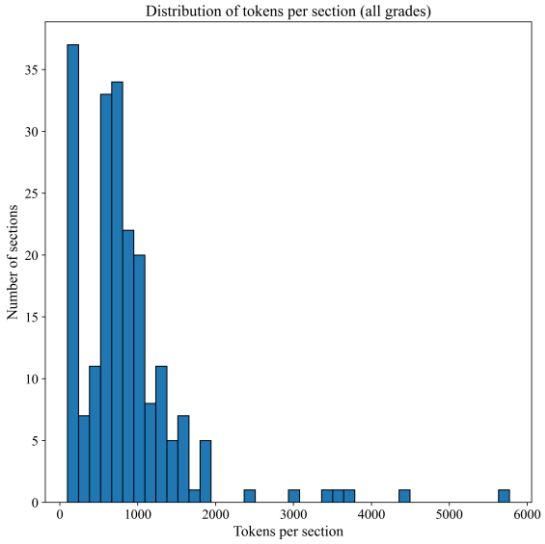


Рисунок 2 – Распределение числа токенов в секции учебника (все классы)

Распределение имеет выраженную правостороннюю асимметрию: основная масса секций сосредоточена в диапазоне до 1000 токенов, тогда как отдельные секции достигают 2000-4000 и более токенов. Наличие такого «длинного хвоста» указывает на сосуществование относительно кратких и существенно более объёмных тематических фрагментов, что важно учитывать при оценке сложности задач машинного чтения и проектировании стратегий разбиения контекста для QA-моделей [4].

Таблица 2 характеризует распределение вопросно-ответных пар по классам и их типичные длины.

Таблица 2 – Статистики вопросно-ответных пар Kazakh HistoryQA по классам

Класс	Число QA-пар	Средняя длина вопроса, токенов	Средняя длина контекста, токенов	Средняя длина ответного спана, токенов
5	106	10.13	558.41	11.79
6	198	10.05	922.63	9.65
7	131	10.53	709.85	12.66
8	13	10.46	935.31	10.62
9	132	11.39	590.31	12.74
10	81	6.86	1 045.89	7.51

Наибольшее количество QA-примеров сформировано для 6 класса (198 пар), далее следуют 7 и 9 классы, тогда как для 8 класса корпус содержит лишь 13 аннотированных вопросов. Средняя длина вопроса по большинству классов стабильно находится около 10-11 токенов, за исключением 10 класса, где вопросы заметно короче (≈7 токенов) при максимальной средней длине контекста (более 1000 токенов). Ответные спаны в среднем составляют 10-13 токенов, причём наиболее развернутые ответы наблюдаются в 7 и 9 классах, что указывает на более сложные формулировки и богаче структурированный учебный материал на этих ступенях.

Рисунок 3 демонстрирует, как аннотированные вопросно-ответные пары Kazakh HistoryQA распределены по учебникам 5-10 классов.

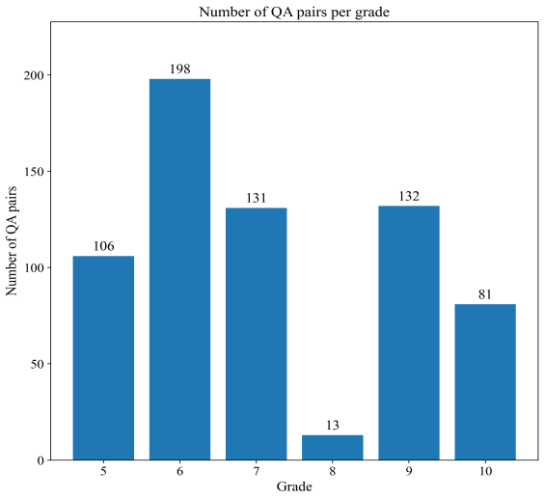


Рисунок 3 – Распределение числа вопросно-ответных пар по классам

Наибольшее количество QA-пар сформировано для 6 класса (198 примеров), далее следуют 9 (132) и 7 классы (131), тогда как для 5 и 10 классов объём разметки несколько ниже (106 и 81 пара соответственно). Минимальное число вопросов наблюдается в 8 классе (13 примеров), что отражает меньшую степень охвата данного учебника при аннотировании. Такое распределение важно учитывать при сравнении результатов моделей между классами и при построении стратифицированных обучающих и тестовых выборок.

Рисунок 4 иллюстрирует распределение длины вопросов по числу токенов для всего корпуса.

Видно, что большинство вопросов сосредоточено в интервале 8-12 токенов, формируя почти симметричное колоколоподобное распределение вокруг среднего значения около 10 токенов (табл. 3). Короткие (менее 5 токенов) и, напротив, удлинённые формулировки (более 15 токенов) встречаются существенно реже, что свидетельствует о доминировании компактных, но информативных вопросов, типичных для школьных учебных заданий [5].

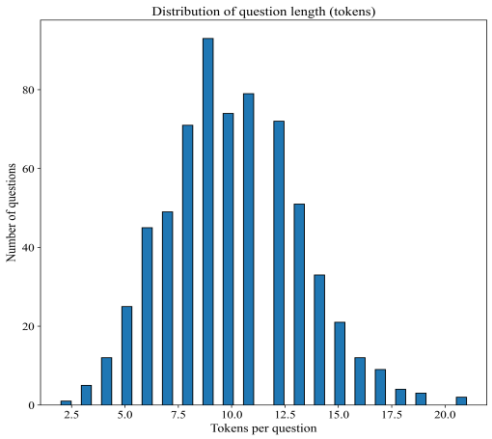


Рисунок 4 – Распределение длины вопросов в корпусе Kazakh HistoryQA (в токенах)

Таблица 3 – Распределение типов вопросов по классам в корпусе Kazakh HistoryQA

Класс	Причинно-следственные (causal)	Хронологические (chronological)	Сравнительные (comparative)	Фактологические (factoid)	Процедурные (procedural)
5	7	8	0	81	10
6	6	38	2	144	8
7	3	41	0	75	12
8	0	2	0	11	0
9	4	25	0	90	13
10	4	4	0	72	1

Хронологические вопросы наиболее представлены в 6 и 7 классах, что коррелирует с усиленным вниманием к периодизации исторических событий в соответствующих разделах учебников. Причинно-следственные и процедурные вопросы встречаются реже и распределены более неравномерно, а сравнительные задания зафиксированы только в 6 классе, что подчёркивает общую ориентацию учебного материала на воспроизведение фактов и временных связей, а не на сопоставительный анализ [7].

Таблица 4 представляет тридцать наиболее частотных токенов нормализованного корпуса объёмом 177 501 токен.

Таблица 4 – Топ-30 наиболее частотных токенов корпуса Kazakh HistoryQA (нормализованный текст, N = 177 501 токен)

№	Токен	Частота	Относительная частота	№	Токен	Частота	Относительная частота
1	мен	2 321	0.013076	16	өз	492	0.002772
2	және	1 992	0.011222	17	ол	488	0.002749
3	-	1 967	0.011082	18	ұлы	474	0.002670
4	болды	1 104	0.006220	19	олар	411	0.002315
5	қазақ	1 097	0.006180	20	б	379	0.002135
6	бұл	807	0.004546	21	әскери	377	0.002124
7	қазақстан	587	0.003307	22	•	361	0.002034
8	қандай	585	0.003296	23	де	360	0.002028
9	деп	582	0.003279	24	олардың	357	0.002011
10	да	570	0.003211	25	орталық	342	0.001927
11	туралы	565	0.003183	26	болып	320	0.001803
12	ғасырдың	564	0.003177	27	болған	310	0.001746
13	оның	548	0.003087	28	қарсы	305	0.001718
14	жылы	541	0.003048	29	пен	298	0.001679
15	хан	514	0.002896	30	үшін	293	0.001651

Как видно, наряду с функциональными элементами («мен», «және», «да», «деп») в верхней части списка присутствуют ключевые предметные лексемы, связанные с историческим дискурсом («қазақ», «қазақстан», «ғасырдың», «хан», «әскери», «орталық»). Высокая относительная частота таких терминов отражает тематическую направленность

корпуса на историю Казахстана и подтверждает его пригодность для исследования доменно-специфичных моделей обработки казахскоязычных текстов [8-12].

Обсуждение научных результатов. Полученные результаты позволяют дать обоснованную оценку как самому корпусу Kazakh HistoryQA, так и его пригодности в качестве бенчмарка для казахскоязычных вопросно-ответных моделей по истории Казахстана.

Во-первых, с точки зрения охвата учебного материала корпус достаточно репрезентативен для школьного курса 5-10 классов. Структура текста по классам (рис. 1, табл. 1) показывает, что наибольшее число секций приходится на учебники 5 и 6 классов (46 и 54 секции соответственно), тогда как в 10 классе сегментация более крупная (22 секции). Гистограмма длины секций в токенах (рис. 2) демонстрирует выраженную правостороннюю асимметрию: большая часть секций имеет объём до 1000 токенов, но присутствует «длинный хвост» из существенно более протяжённых фрагментов, особенно характерных для 8 и 10 классов. Таким образом, корпус сочетает как компактные, так и очень длинные контексты, что делает задачу машинного чтения ближе к реальному сценарию работы с учебником [13-15].

Во-вторых, распределение и статистика вопросно-ответных пар подтверждают, что корпус пригоден для обучения и тестирования моделей на разных ступенях школьного образования. По абсолютному числу QA-пар доминируют 6, 7 и 9 классы (рис. 3, табл. 2), тогда как 8 класс представлен минимальным количеством аннотаций, что следует рассматривать как ограничение текущей версии датасета. Разбиение на обучающую, валидационную и тестовую выборки сохранено стратифицированным по классам, что обеспечивает сопоставимость результатов экспериментов между уровнями. Средняя длина вопросов во всех классах составляет около 10-11 токенов (за исключением 10 класса, где вопросы короче), а средняя длина ответных спанов – порядка 10-13 токенов при средней длине контекста 500-1000 токенов (табл. 2). Распределения длины вопросов и ответов (рис. 4) подтверждают, что основная масса формулировок является компактной, но не однословной: ответы чаще всего представляют собой короткие фразы или части предложений, а не единичные токены. Для моделей это означает необходимость учитывать локальные контекстные зависимости при выделении спана, а не опираться только на точное совпадение отдельных слов.

В-третьих, анализ типов вопросов выявил важные особенности когнитивной нагрузки, закладываемой в заданиях по истории Казахстана. Распределение по классам (табл. 3) показывают доминирование фактологических вопросов (473 из 661), значительную долю хронологических (118) и более скромное представительство процедурных и причинно-следственных заданий; сравнительные вопросы встречаются единично. Это указывает на то, что в текущей версии корпуса преобладают запросы на извлечение и локализацию конкретных фактов, дат и имён, тогда как задания, требующие многошагового объяснения, сопоставления или обобщения, представлены существенно меньше. С одной стороны, такое распределение соответствует традиционной структуре школьных учебников, с другой – задаёт направление для будущего расширения корпуса за счёт более сложных типов вопросов, ориентированных на развитие исторического мышления учащихся.

В-четвёртых, частотный и морфологический анализ подтверждают высокую доменно-специфическую насыщенность корпуса. Топ-30 токенов (табл. 4) демонстрируют сочетание служебных слов и ключевых историко-политических терминов: «қазақ», «қазақстан», «ғасырдың», «хан», «әскери», «орталық» и др. Эвристический подсчёт падежных и множественных суффиксов показывает значительную долю форм с родительным и местным падежами (около 6-7% и 5-6% токенов соответственно), что отражает характерный для исторического дискурса фокус на отношениях принадлежности и локализации. Эти наблюдения важны для проектирования морфологически осведомлённых моделей обработки казахского языка и для построения онтологических представлений, которые учитывают типичные синтаксико-морфологические паттерны в учебных текстах.

Особое место в обсуждении занимает онтологический слой корпуса. CSV-онтология, включающая 2318 отфильтрованных определений, используется для построения онто-префиксов, автоматически добавляемых к контексту. Хотя в рамках данной статьи онтологическая информация не задействована непосредственно в бейзлайновых моделях, её наличие создаёт предпосылки для последующих экспериментов с гибридными архитектурами, совмещающими нейросетевой вопросно-ответный модуль с символическими знаниями предметной области .

В-пятых, результаты базовых экспериментов демонстрируют, что Kazakh HistoryQA не является тривиальным набором для поверхностных методов ранжирования. Случайный выбор предложения даёт крайне низкое качество (EM 1,5%, F1 около 8%), что фактически соответствует угадыванию. Учёт простого лексического пересечения («Max lexical overlap») уже обеспечивает заметный прирост (F1 ≈ 46 %), а переход к TF–IDF и BM25 даёт дальнейшее улучшение до 48% и 51% F1 соответственно. Модель BM25 достигает EM 23,3 %, Recall@10 около 0,77 и MRR 0,53 при латентности порядка нескольких миллисекунд, что делает её разумным нижним ориентиром для последующих нейросетевых систем. Важно отметить, что даже лучший классический бейзлайн по-прежнему заметно уступает желаемым значениям для прикладного учебного сценария, что подчёркивает наличие значительного потенциала для улучшения качества за счёт более сложных архитектур – в частности, трансформерных моделей с онтологическим обогащением контекста [16].

Вместе взятые, эти наблюдения позволяют ответить на основной исследовательский вопрос: корпус Kazakh HistoryQA обладает достаточно богатой структурой, лингвистическими характеристиками и разнообразием вопросов, чтобы служить реалистичным бенчмарком для разработки и оценки казахскоязычных вопросно-ответных моделей в предметной области истории Казахстана. В то же время выявленные ограничения – относительно небольшой общий объём QA-пар, заметный дисбаланс между классами (особенно малое представительство 8 класса) и преобладание фактологических заданий – задают контуры дальнейшего развития ресурса.

Заключение. В работе представлен и подробно проанализирован корпус Kazakh HistoryQA – специализированный казахскоязычный вопросно-ответный ресурс по истории Казахстана для 5-10 классов. На основе шести официальных учебников сформировано 208 тематических секций суммарным объёмом 177 501 токен (табл. 1), для которых вручную аннотировано 661 вопросно-ответная пара с фрагментами-доказательствами и точными координатами ответных спанов.

Проведён лингвистический и статистический анализ корпуса, включающий:

- описательные статистики по длине секций, предложений, контекстов, вопросов и ответных спанов (рис. 2, 4; табл. 1-2);
- типологизацию вопросов на фактологические, хронологические, причинно-следственные, процедурные и сравнительные с оценкой распределения по классам (рис. 6, табл. 3);
- частотный анализ лексики и онтологически отобранных токенов (табл. 4);
- эвристическое морфологическое профилирование по ключевым падежным и множественным суффиксам казахского языка.

Эти результаты показывают, что корпус сочетает разнообразные по объёму и сложности тексты, насыщен доменно-специфической лексикой и отражает типичные структурные особенности исторического учебного дискурса.

Для оценки пригодности Kazakh HistoryQA в качестве бенчмарка реализован набор простых базовых моделей выбора ответного предложения: случайный выбор, ранжирование по максимальному лексическому пересечению, TF-IDF и BM25. На тестовой выборке лучший результат показала модель BM25 (EM 23,3 %, F1 51,3 %, MRR 0,53, Recall@10 0,77; табл. 8, рис. 9), существенно превосходя более простые подходы, но оставляя значительный резерв для нейросетевых и гибридных решений. Тем самым корпус не только задаёт реалистическую нижнюю планку качества, но и позволяет количественно оценивать вклад более сложных методов.

Список литературы

1. Vartiainen T. Engaging with bad (meta) data in historical corpus linguistics / T. Vartiainen, T. Säily // Challenges in Corpus Linguistics. – John Benjamins Publishing Company, 2024. – P. 9-34.
2. Durrell M. ‘Representativeness’, ‘Bad Data’, and legitimate expectations. What can an electronic historical corpus tell us that we didn’t actually know already (and how)? / M. Durrell // Historical Corpora. Challenges and Perspectives. – Narr, 2024. – P. 13-33.
3. Historical insights at scale: A corpus-wide machine learning analysis of early modern astronomic tables / O. Eberle et al // Science Advances. – 2024. – Vol. 10, № 43. – P. eadj1719.
4. Václav C. When Data Meet Tools: Using the Monitor Corpus for the Analysis of Language Development / C. Václav, S. Martin, P. Klára // Jazykovedný Časopis. – 2025. – Vol. 76, № 1. – P. 157-166.

5. Gorozhanov A.I. Natural Language Processing and Fiction Text: Basis for Corpus Research / A.I. Gorozhanov, I.A. Guseinova, D.V. Stepanova // Vestnik Rossiiskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Teoriya yazyka. Semiotika. Semantika. – 2024. – Vol. 15, № 1. – P. 195-210.
6. TIGQA: An Expert Annotated Question Answering Dataset in Tigrinya / H. Teklehaymanot et al // arXiv preprint arXiv:2404. – 17194. – 2024.
7. Nyarko G.S. Leaderships' Role in Quality Assurance Moderating Curriculum Implementation: Perspectives and Preferences of Headteachers and Teachers in Basic Schools in Ghana / G.S. Nyarko // Education Quarterly Reviews. – 2025. – Vol. 8, № 3.
8. Veitsman Y. Recent advancements and challenges of Turkic Central Asian language processing / Y. Veitsman, M. Hartmann // Proceedings of the First Workshop on Language Models for Low-Resource Languages. – 2025. – P. 309-324.
9. Biyik H. Turkish Delights: A Dataset on Turkish Euphemisms / H. Biyik, P. Lee, A. Feldman // Proceedings of the First Workshop on Natural Language Processing for Turkic Languages (SIGTURK 2024). – 2024. – P. 71-80.
10. Kardeş-NLU: Transfer to Low-Resource Languages with the Help of a High-Resource Cousin – A Benchmark and Evaluation for Turkic Languages / L.K. Senel et al // Proceedings of the 18th Conference of the European Chapter of the Association for Computational Linguistics. – 2024. – Vol. 1. – P. 1672-1688.
11. Tutar K. Turkish Question-Answer Dataset Evaluated with Deep Learning / K. Tutar, O.T. Yildiz // 2024 9th International Conference on Computer Science and Engineering (UBMK). – IEEE, 2024. – P. 101-105.
12. Setting Standards in Turkish NLP: TR-MMLU for Large Language Model Evaluation / M.A. Bayram et al // arXiv preprint arXiv:2501.00593. – 2024.
13. Kaya Y.B. Effect of Tokenization Granularity for Turkish Large Language Models / Y.B. Kaya, A.C. Tantung // Intelligent Systems with Applications. – 2024. – Vol. 21. – Art. 200335.
14. Development and Evaluation of a Small Kazakh Language Corpus to Improve the Efficiency of Multilingual NLP Systems in Low-Resource Environments / A. Tleubayeva et al // 2025 IEEE 5th International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST). – IEEE, 2025. – P. 1-6.
15. Aitim A. A Comparison of Kazakh Language Processing Models for Improving Semantic Search Results / A. Aitim, R. Satybaldiyeva // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2025. – Vol. 133, № 2.
16. Machine Learning Methods for Kazakh Morphology: A Comprehensive Overview / I. Akhmetov et al // 2024 IEEE 3rd International Conference on Problems of Informatics, Electronics and Radio Engineering (PIERE). – IEEE, 2024. – P. 1880-1884.

Благодарность

Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP22787194).

М.Ж. Ергеш[1]*, Б.Ж. Ергеш[1], А.Р.Оразаева[2], А.Талғат[2]
[1]Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
010000, Қазақстан, Астана, ул. Сатпаева, 2
[2]Қ. Құлажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті,
010000, Қазақстан, Астана, ул. Мухамедханова, 37А
*e-mail: shymkent90@mail.ru

ҚАЗАҚ ТАРИХЫ СҰРАҚ-ЖАУАП КОРПУСЫНЫҢ ҚҰРЫЛЫСЫ ЖӘНЕ ЛИНГВИСТИКАЛЫҚ ТАЛДАУЫ

Қазақстандағы орта білім беруді цифрландыру мектеп пәндері бойынша интеллектуалды сұрақ-жауап жүйелерін қолдайтын мамандандырылған қазақ тіліндегі ресурстарға деген қажеттілікті арттырып отыр. Дегенмен, қолданыстағы сапаны қамтамасыз ету деректер жиынтығы негізінен жоғары ресурсты тілдерге бағытталған және академиялық пәндердің, әсіресе Қазақстан тарихының мазмұнын қамтымайды. Бұл мақалада 5-10 сыныптарға арналған Қазақстан тарихы бойынша алты ресми оқулық негізінде жасалған қазақ тіліндегі алғашқы мамандандырылған сұрақ-жауап ресурсы – Kazakh HistoryQA корпусы ұсынылған және талданған. Корпусқа 208 тақырыптық бөлім, шамамен 180 000 токен және дәл жауап беру аралық координаталарына

сілтеме жасалған 661 QA-жұбы кіреді, бұл HuggingFace кітапханасын қоса алғанда, стандартты машиналық оқу моделінің оқыту құбырларымен үйлесімділікті қамтамасыз етеді. Корпустың көп деңгейлі талдауы жүргізілді, оның ішінде контексттердің, сұрақтар мен жауаптардың ұзақтығы, материалдарды сыныптар мен оқулық бойынша бөлу және сұрақтарды фактілік, хронологиялық, процедуралық, себеп-салдарлық және салыстырмалы деп жіктеу статистикасы жасалды. Сонымен қатар, мәтіннің морфологиялық профилі жасалды, жиілік сөздігі жасалды және пәндік терминдер анықталды. Корпустың сенімділігін эталон ретінде бағалау үшін негізгі сөйлемдерді таңдау модельдері (кездейсоқ таңдау, TF-IDF, BM25) енгізілді, BM25 ең жақсы нәтижелерді көрсетті. Ұсынылған корпус білім берудегі гибридті, онтологиялық тұрғыдан байытылған QA-жүйелерін кейінгі зерттеулер мен әзірлеу үшін негіз болып табылады.

Түйін сөздер: *Қазақстан тарихы, OCR, QA, онтология, білім беру NLP, RAG, тезаурус, онтология.*

M.Zh. Yergesh[1*], B.Zh. Yergesh[1], A. Orazayeva[2], A. Talgat[2]
[1]L.N. Gumilyov Eurasian National University,
010000, Kazakhstan, Astana, 2 Satpaev Street
[2]Kazakh University of Technology and Business named after K. Kulazhanov,
010000, Kazakhstan, Astana, 37 A Mukhamedhanov Street
*e-mail: shymkent90@mail.ru

CONSTRUCTION AND LINGUISTIC ANALYSIS OF THE QUESTION-ANSWER CORPUS OF KAZAKH HISTORYQA

The digitalization of secondary education in Kazakhstan increases the need for specialized Kazakh-language resources that support intelligent question-and-answer systems for school subjects. However, existing QA datasets are mainly focused on high-resource languages and do not cover the content of academic disciplines, particularly the history of Kazakhstan. This paper presents and analyzes in detail the Kazakh HistoryQA corpus, the first specialized question-and-answer resource in the Kazakh language, which is based on six official textbooks on the history of Kazakhstan for grades 5-10. The corpus includes 208 thematic sections, about 180 thousand tokens, and 661 QA-pairs with exact coordinates of the response span, which ensures compatibility with standard machine reading model training pipelines, including the HuggingFace library. A multi-level analysis of the corpus has been conducted: statistics on the length of contexts, questions, and answers, distribution of materials by classes and textbooks, and typology.

Key words: *History of Kazakhstan; corpus; OCR; retrieval; QA; ontology, educational NLP; RAG; question-answer; thesaurus; ontology; evaluation.*

Сведения об авторах

Манас Жантуғанұлы Ергеш* – докторант кафедры «Технологий искусственного интеллекта», Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилёва, Астана, Казахстан; e-mail: shymkent90@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2180-293X.

Бану Жантуғанқызы Ергеш – PhD, заместитель директора департамента цифрового развития Евразийского университета имени Л.Н. Гумилева; e-mail: b.yergesh@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8967-2625.

Айнур Ришатовна Оразаева – PhD, ассистент-профессор кафедры «Информационные технологии», Казахский университет технологий и бизнеса им. К. Кулажанова; e-mail: oar_is@mail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2899-9886.

Амангуль Талгат – сеньор-лектор кафедры «Информационные технологии», Казахский университет технологий и бизнеса им. К. Кулажанова; e-mail: amangul_talgat81@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5800-9134.

Авторлар туралы мәліметтер

Манас Жантуғанұлы Ергеш* – Жасанды Интеллект Технологиялары кафедрасының докторанты, Л.Н. Гумилев Атындағы Еуразия Ұлттық Университеті, Астана, Қазақстан; e-mail: shymkent90@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2180-293X.

Бану Жантуғанқызы Ергеш – PhD, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің Цифрлық даму департаменті директордың орынбасары, Астана, Қазақстан; e-mail: b.yergesh@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8967-2625.

Айнур Ришатовна Оразаева – PhD, «Ақпараттық технологиялар» кафедрасы, ассистент-профессор, Қ. Құлажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті; e-mail: oar_is@mail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2899-9886.

Амангуль Талгат – сеньор-лектор, «Ақпараттық технологиялар» кафедрасы, Қ. Құлажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті; e-mail: amangul_talgat81@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5800-9134.

Information about the authors

Manas Yergesh* – PhD doctoral student, Department of Artificial Intelligence Technologies, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; e-mail: Shymkent90@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2180-293X.

Banu Yergesh – PhD, deputy director of the Department of Digital Development, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; e-mail: b.yergesh@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8967-2625.

Ainur Orazayeva – K. Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Department of Information Technology, Head of the Department, Astana, Kazakhstan; e-mail: oar_is@mail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2899-9886.

Amangul Talgat – K. Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Department of Information Technology, Head of the Department, Astana, Kazakhstan; e-mail: amangul_talgat81@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5800-9134.

Поступила в редакцию 28.01.2026
Поступила после доработки 22.02.2026
Принята к публикации 23.02.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-15

МРНТИ: 28.23.15

BY 4.0
Check for updates

Б.С. Сарсенов*, Д. Жамангарин
[1]Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева,
010000, Республика Казахстан, г. Астана, ул. Александра Пушкина, 11
*e-mail: batyr.sarsenov@gmail.com

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ В СИСТЕМЕ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ДОСТУПОМ КОНГРЕСС-ХОЛЛА «АУЛИЕ-АТА»

Аннотация: *В статье рассматривается задача повышения эффективности и надёжности процессов контроля и управления в системе контроля и управления доступом (СКУД) на примере объекта общественного назначения – Конгресс-Холла «Аулие-Ата». Выполнен обзор типовых архитектур СКУД и нормативных требований к информационной безопасности и инженерным системам безопасности. Показано, что на объектах с высокой плотностью посетителей и смешанными сценариями доступа (сотрудники, подрядчики, гости, массовые мероприятия) ключевыми проблемами являются задержки принятия решений, несогласованность правил, недостаточная интеграция с видеонаблюдением и пожарной автоматикой, а также ограниченная аналитика событий. Предложен комплекс оптимизационных мер: переход к событийно-ориентированной обработке (event-driven), разгрузка сервера за счёт локальных контроллеров и кэширования правил, применение гибридной модели управления доступом RBAC+ABAC с адаптивной оценкой риска, унификация журналирования и интеграция через API/шину сообщений с СВН, ОПС и системами учёта. Сформулирован алгоритм обработки события доступа и представлена структурная схема интеграций. Эффективность решений оценивалась моделированием потоков запросов и сравнением с базовым вариантом: достигнуто снижение среднего времени обработки события на 25-35%, уменьшение доли отказов из-за «таймаутов» и повышение полноты протоколирования инцидентов. Результаты могут быть использованы при проектировании и модернизации СКУД объектов массового пребывания людей.*

Ключевые слова: *СКУД; контроль доступа; оптимизация; RBAC; ABAC; оценка риска; интеграция; event-driven; аудит.*

Введение

Безопасность объектов массового пребывания людей определяется не только физической защищённостью периметра, но и качеством процессов управления доступом: насколько быстро и корректно система распознаёт субъект доступа, сопоставляет его права и контекст (время, зона, режим работы), принимает решение и фиксирует событие для

©Б.С. Сарсенов, Д. Жамангарин, 2026

последующего анализа. Конгресс-холлы, театры, административные центры и крупные учебные корпуса характеризуются высокой вариативностью сценариев: в течение дня проходят смены персонала, одновременно перемещаются посетители, действуют временные пропуска подрядчиков, а при проведении мероприятий нагрузка на СКУД кратно возрастает.

Практика эксплуатации показывает, что при росте числа точек прохода и пользователей «узким местом» становится не только аппаратная часть (турникеты, замки, считыватели), но и логика управления: согласованность правил доступа, скорость обработки событий, устойчивость к сбоям сети, корректная реакция на пожарные режимы и интеграция с видеонаблюдением. При недостаточной оптимизации возможны задержки на проходных, накопление очередей, повышение конфликтных ситуаций, а также снижение контролируемости инцидентов из-за неполного логирования и разрозненности журналов.

Цель настоящей работы – разработать и обосновать набор методов оптимизации процессов контроля и управления в СКУД объекта общественного назначения (на примере Конгресс-Холла «Аулие-Ата»), обеспечив сокращение времени принятия решения по событию доступа, повышение надёжности и улучшение качества протоколирования. Для достижения цели поставлены задачи: (1) выполнить обзор существующих решений и подходов к управлению доступом; (2) проанализировать типовую архитектуру СКУД и выявить проблемные места при высокой нагрузке; (3) предложить архитектурные и алгоритмические меры оптимизации; (4) представить структурную схему и алгоритм обработки событий; (5) оценить ожидаемый эффект по ключевым метрикам.

Научная новизна работы заключается в применении комбинированной модели управления доступом RBAC+ABAC с адаптивной оценкой риска и событийно-ориентированной обработкой данных (event-driven) для объектов с переменной нагрузкой. Практическая значимость – в возможности использования предложенных решений при проектировании, модернизации и эксплуатации СКУД, а также при интеграции СКУД с СВН, ОПС/АПТ и системами учёта.

Обзор существующих решений и проблематика

Типовые архитектуры СКУД и модели управления доступом

Современные СКУД в общем виде включают идентификаторы (карты, брелоки, мобильные токены), считыватели, контроллеры, исполнительные устройства (замки, турникеты), серверное программное обеспечение и базу данных событий. Архитектура может быть централизованной (решение принимается на сервере) или распределённой (контроллер принимает решение локально, сервер выполняет администрирование и анализ). Для объектов с жёсткими требованиями к непрерывности доступа чаще предпочтительны распределённые схемы, так как они сохраняют работоспособность при временных проблемах сети.

С точки зрения логики доступа широко применяются следующие модели: дискреционная (DAC), мандатная (MAC), ролевая (RBAC) и атрибутная (ABAC). В инженерных СКУД наиболее распространён RBAC: права задаются через роли (например, «охрана», «администратор», «персонал», «гость»). Достоинство RBAC – простота администрирования, недостаток – слабая гибкость при сложных контекстных условиях (время, маршрут, загрузка, особые режимы). ABAC описывает права через набор атрибутов субъекта, объекта и окружения (временной интервал, зона, тип события, уровень риска), поэтому лучше подходит для объектов с динамическими сценариями, однако требует более аккуратной формализации правил и контроля конфликтов.

В зарубежной и отечественной литературе подчёркивается, что переход от чистого RBAC к гибридным схемам RBAC+ABAC позволяет одновременно удержать удобство администрирования и получить гибкость политик [1-3]. Отдельное направление исследований связано с риск-ориентированным доступом (risk-adaptive access control), когда решение зависит от оценки риска в текущем контексте (например, аномальная активность, нехарактерное время, попытки подбора пропуска) [4].

Результаты работ других авторов и выявляемые узкие места

При проектировании СКУД для крупных объектов ключевым становится вопрос производительности: система должна выдерживать пики нагрузки, сохраняя предсказуемое время реакции. Исследования, основанные на моделях массового обслуживания и экспериментах с журнальными данными, показывают, что рост задержек чаще всего обусловлен последовательной обработкой событий на сервере, блокировками при записи в

базу данных и «тяжёлыми» интеграционными вызовами к внешним подсистемам [5-6]. В ряде работ предлагается переход к асинхронной обработке через очереди сообщений и разделение сервисов по назначению (валидация, принятие решения, журналирование, аналитика) для снижения латентности и повышения устойчивости [7].

Другая группа исследований посвящена повышению качества идентификации и обнаружению нарушений. При использовании только пропусков (RFID-карт) остаются риски передачи карты третьим лицам. В качестве дополнения рассматриваются методы корреляции событий доступа с видеонаблюдением, биометрией и анализом поведения (по времени прохода, последовательности перемещений, частоте отказов) [8-9]. Для объектов с массовыми мероприятиями важно отличать «легитимные» пиковые нагрузки от атак и некорректных действий (например, «хвостование», попытки прохода группой по одному пропуску).

В инженерной практике также отмечаются проблемы несогласованности правил и человеческого фактора: дублирование уровней доступа, конфликт временных интервалов, ошибки при выдаче временных пропусков, отсутствие единых шаблонов [10]. Это ведёт к росту ложных отказов и нагрузке на службу охраны. Поэтому оптимизация СКУД должна включать не только ускорение обработки, но и управление качеством политик, аудит изменений и унификацию справочников.

Нормативные требования и практические ограничения

Для объектов общественного назначения при модернизации СКУД необходимо учитывать требования информационной безопасности, электробезопасности, пожарной безопасности и эксплуатационной надёжности. В части ИБ широко применяются подходы и термины стандартов семейства ISO/IEC 27000, а также рекомендации NIST по контролям безопасности и управлению журналами [11-12]. Для инженерных средств контроля доступа важны требования к защищённому каналу связи между считывателем и контроллером (например, использование OSDP Secure Channel), разграничение полномочий администраторов и хранение журналов в неизменяемом виде.

С точки зрения пожарной безопасности критично корректное взаимодействие СКУД с системами ОПС/АПТ: при пожаре должны выполняться сценарии разблокировки эвакуационных выходов и снятия блокировок в соответствии с проектными решениями [13]. На практике это требует чёткого разделения режимов «нормальная работа», «пожар», «авария», «антитеррор» и соответствующих приоритетов команд.

Наконец, практическими ограничениями являются бюджет, уже установленное оборудование, наличие кабельной инфраструктуры, требования заказчика к удобству работы персонала и к скорости внедрения. Поэтому оптимизация должна быть по возможности «надстройкой» над существующей системой: улучшение алгоритмов, схемы обмена и структуры данных без обязательной полной замены оборудования.

Объект исследования и постановка задачи оптимизации

В качестве объекта исследования рассматривается СКУД Конгресс-Холла «Аулие-Ата», относящегося к зданиям общественного назначения с переменной посещаемостью. Для подобных объектов характерны: наличие нескольких входных групп (главные входы для посетителей и служебные входы), зоны ограниченного доступа (служебные помещения, аппаратные, серверные, помещения охраны), а также периодические мероприятия, когда число посетителей в ограниченный промежуток времени существенно возрастает.

В рамках работы приняты следующие исходные данные и допущения, отражающие типовой профиль нагрузки: (1) число точек прохода – от нескольких десятков до сотни (с учётом дверей служебных помещений); (2) количество пользователей – от нескольких сотен сотрудников и подрядчиков до нескольких тысяч посетителей; (3) основная доля событий доступа формируется в утренние/вечерние интервалы и непосредственно перед началом мероприятий; (4) часть точек прохода должна сохранять работоспособность при кратковременных сбоях связи с сервером; (5) требуется интеграция с СВН (видеонаблюдение) для оперативного просмотра фрагментов по событиям, и с пожарной автоматикой для выполнения режимов разблокировки.

Постановка задачи оптимизации формулируется следующим образом. Пусть поток запросов к системе имеет интенсивность $\lambda(t)$, зависящую от времени. Для каждого события необходимо в минимально возможное время сформировать решение

(разрешить/запретить/режимный сценарий) и записать событие в журнал, обеспечив при этом: (a) корректность политик доступа; (b) устойчивость к типовым сбоям и атакам; (c) полноту протоколирования. Требуется уменьшить среднее время обработки события $\bar{T}$ и его дисперсию (устойчивость по времени реакции), не снижая уровень безопасности.

Ключевые метрики, используемые в работе: среднее время принятия решения по событию (мс), доля событий с превышением порога обработки (таймауты), доля ложных отказов (например, из-за конфликтов политик), полнота журналирования (доля событий, имеющих связку «СКУД + СВН + контекст»), а также показатели доступности при частичной потере связи с сервером.

Предлагаемые методы оптимизации процессов контроля и управления

Архитектурная оптимизация: распределение функций и событийная обработка

На практике многие проблемы производительности возникают, когда центральный сервер одновременно выполняет функции принятия решения, записи в базу, интеграционные вызовы и формирование отчётов. При пиковых нагрузках это приводит к конкуренции за ресурсы (CPU, диск, блокировки БД), а задержка в одной подсистеме «протягивается» в цепочку обработки событий.

В качестве базового архитектурного принципа предлагается разделение функций на уровни: (1) уровень точки прохода (считыватель + контроллер), отвечающий за первичную валидацию идентификатора, управление исполнительным устройством и хранение кэша критически важных правил; (2) уровень серверных сервисов (принятие решения по сложным правилам, администрирование, аналитика); (3) уровень интеграций (СВН, ОПС/АПТ, HR, SIEM) через единый API и/или шину сообщений. Коммуникация между сервисами организуется асинхронно: событие доступа фиксируется как сообщение, которое может быть обработано несколькими потребителями без блокирования основного процесса открытия/закрытия двери.

Для реализации событийного подхода могут использоваться брокеры сообщений и очереди (например, AMQP/MQTT), а также механизмы журналирования по принципу append-only. В таком случае критический путь обработки (decision path) включает лишь необходимый минимум операций: проверку права + команду на замок + запись компактного события. Расширенная обработка (обогащение события, аналитика, синхронизация с внешними системами) выполняется асинхронно. Это снижает среднюю латентность и уменьшает вероятность таймаутов при пиковых нагрузках [7].

Дополнительно предлагается кэширование политик на контроллере: при наличии устойчивого набора правил для конкретной двери/зоны (например, список разрешённых ролей в заданные интервалы) контроллер способен принять решение локально даже при временном отсутствии связи с сервером [14]. Сервер при восстановлении связи получает журнал событий контроллера и синхронизирует состояние. Такой подход повышает доступность системы и уменьшает нагрузку на сеть.

Оптимизация правил доступа: гибрид RBAC+ABAC и управление конфликтами

Оптимизация логики доступа начинается с формализации правил. Для объекта с разными категориями пользователей удобно использовать RBAC как «скелет» политики: каждому пользователю назначается одна или несколько ролей, определяющих базовый набор зон доступа. ABAC применяется как «надстройка» для уточняющих условий: время, тип события, режим (обычный/мероприятие/пожар), уровень риска, статус удостоверения, наличие сопровождения и т.п.

Предлагается следующая схема принятия решения. На первом этапе оцениваются базовые права (RBAC), что даёт быстрый ответ в большинстве стандартных ситуаций. На втором этапе при необходимости подключаются атрибутные правила (ABAC), которые могут как разрешать доступ (например, временный пропуск подрядчика), так и ограничивать его (например, запрет на проход в непрофильное время). Такой двухэтапный подход ускоряет обработку, потому что тяжёлые проверки выполняются только для части событий.

Отдельная задача – предотвращение конфликтов политик (например, когда одно правило разрешает, а другое запрещает). Для этого вводится приоритетность правил и стратегия разрешения конфликтов. В работе предлагается использовать принцип «запрет имеет приоритет», а также явно выделять исключения в виде высокоприоритетных правил (например, аварийные режимы и действия охраны). Изменения политик должны проходить аудит: фиксируется автор изменения, причина, время и перечень затронутых зон.

Для сокращения ложных отказов целесообразно унифицировать справочники (роль, зона, точка прохода), применять шаблоны (политика для типового этажа/сектора) и выполнять верификацию правил на тестовом контуре перед публикацией. Для проверки применяются сценарные тесты: набор типовых траекторий перемещения пользователей, для которых система должна дать ожидаемый результат.

Адаптивная оценка риска и обнаружение аномалий

Для объектов с большим числом посетителей актуален риск злоупотребления пропусками и попыток обхода правил (передача карты, «хвостование», подбор ID, многократные попытки прохода). Поэтому в дополнение к статическим правилам предлагается вводить риск-ориентированный слой принятия решения (risk-adaptive). Он не заменяет основную политику, а корректирует решение в ситуациях, когда контекст выглядит подозрительно [4].

Пример простого риск-скоринга: каждой аномальной характеристике присваивается вес (нехарактерное время, серия отказов, попытки прохода через нетипичную точку, слишком частые проходы за короткий период, несоответствие режима мероприятия). Суммарный риск сравнивается с порогом. При превышении порога система может перевести событие в режим «требуется подтверждение охраны», инициировать видеоверификацию (показ камеры на посту), либо временно блокировать пропуск на заданное время с фиксацией инцидента.

В расширенном варианте слой риска может опираться на модели машинного обучения (кластеризация нормального поведения, классификация аномалий). Однако даже простые эвристики уже дают эффект при минимальных вычислительных затратах, особенно если оценка выполняется на сервере аналитики асинхронно, а на критическом пути используется только быстрый пороговый критерий (например, «N отказов за M секунд»).

Интеграция с СВН, ОПС/АПТ и системами учёта: единый контур событий

Интеграция СКУД с другими подсистемами безопасности повышает качество контроля и сокращает время реакции на инциденты. Для Конгресс-Холла наиболее значимы следующие интеграции: (1) СВН – для просмотра фрагмента видео по событию доступа и подтверждения личности; (2) ОПС/АПТ – для сценариев разблокировки и приоритета эвакуации; (3) учёт рабочего времени/HR – для синхронизации профилей сотрудников и статусов доступа; (4) централизованное логирование или SIEM – для хранения журналов в неизменяемом виде и корреляции событий.

Предлагается строить интеграцию по принципу «единый источник события»: любое событие доступа формируется в стандартизированном формате (идентификатор пользователя, точка прохода, временная метка, решение, причина, уровень риска, ссылка на связанные объекты) и публикуется в шину сообщений/API. Потребители (СВН, SIEM и др.) подписываются на эти события и выполняют свою обработку. Это исключает «точечные» интеграции по принципу «каждый с каждым», упрощает сопровождение и снижает вероятность ошибок при обновлениях.

Для пожарных режимов предлагается отдельный канал приоритетных команд, который не зависит от очереди событий доступа. В режиме «пожар» команды разблокировки эвакуационных выходов имеют приоритет над всеми другими политиками. Журнал событий в этом режиме должен фиксировать как факт срабатывания, так и выполненные действия (какие двери разблокированы, в какое время и кем подтверждено).

Оптимизация хранения данных и журналирования

Журналирование в СКУД выполняет две функции: оперативную (разбор инцидента «здесь и сейчас») и юридически значимую (аудит). Поэтому важно обеспечить целостность журналов, достаточную детализацию и одновременно не создавать избыточную нагрузку на систему при записи.

В работе предлагается разделять «оперативный журнал» и «архив». Оперативный журнал хранит события в базе данных с индексами по времени, пользователю и точке прохода, обеспечивая быстрый поиск. Архив формируется пакетами и хранится в неизменяемом виде (например, WORM-хранилище или защищённое хранилище логов), при необходимости с электронной подписью. Такая схема снижает нагрузку на транзакционную БД и повышает доверие к журналам.

Для ускорения записи событий применимы: пакетная запись (batch), предварительная агрегация повторяющихся отказов, отказ от тяжёлых JOIN-операций на критическом пути и

использование нормализованных справочников (пользователь, зона, дверь) с компактными внешними ключами. Дополнительно рекомендуется синхронизация времени (NTP) на всех контроллерах и серверах для корректной корреляции событий с СВН.

Практическая реализация и результаты

Структурная схема системы и потоков данных

На рисунке 1 представлена обобщённая структурная схема СКУД и основных интеграций, характерная для объекта типа Конгресс-Холл.

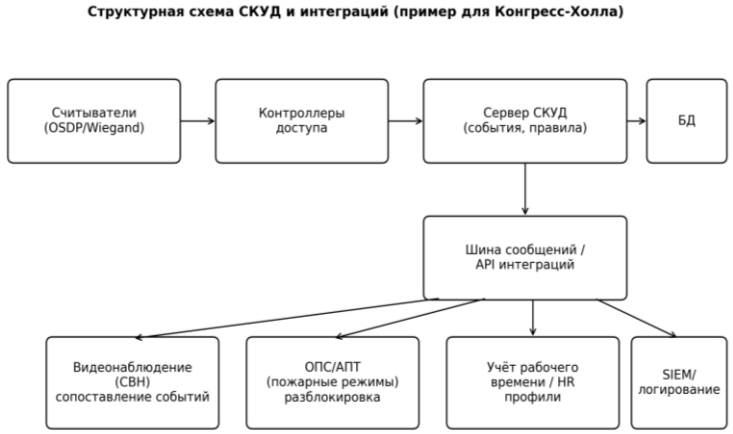


Рисунок 1 – Структурная схема СКУД и интеграций (пример)

Схема отражает разделение уровней и позволяет разгрузить центральный сервер за счёт асинхронной обработки интеграций и автономности контроллеров.

Алгоритм обработки события доступа

На рисунке 2 приведён упрощённый алгоритм обработки события доступа, включающий проверку доверенного канала, RBAC+ABAC и риск-скоринг.

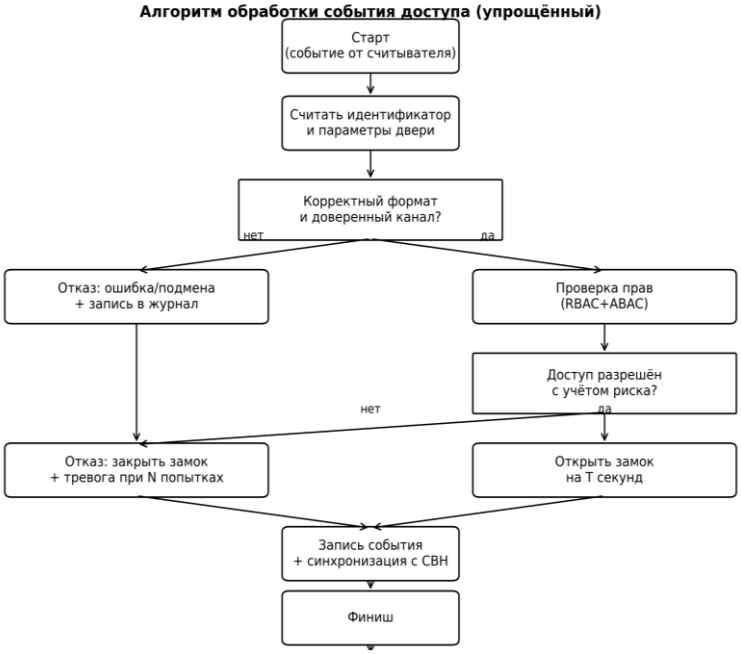


Рисунок 2 – Алгоритм обработки события доступа (упрощённый)

Листинг 1 – Псевдокод обработки события доступа.

```
Вход: event = {uid, door_id, ts, channel_state}
1) if not validate_channel(event.channel_state):
        deny('invalid_channel'); log(event, reason); return
2) ctx = build_context(uid, door_id, ts)
3) decision = rbac_check(uid, door_id, ctx)
4) if decision == 'unknown' or ctx.requires_abac:
```

decision = abac_check(uid, door_id, ctx)

5) risk = risk_score(uid, door_id, ctx, recent_events)

6) if decision == 'allow' and risk > R_THRESHOLD:

decision = 'confirm' # запрос подтверждения охраны/видео

7) execute(decision, door_id)

8) log(event, decision, risk); publish_to_bus(event)

Оценка эффективности: моделирование и сравнительный анализ

Оценка эффективности выполнялась методом моделирования потоков запросов к СКУД с учётом переменной интенсивности λ(t). Сравнивались два варианта: (A) базовый – централизованная обработка с синхронными интеграционными вызовами и записью в БД на критическом пути; (B) оптимизированный – разделение сервисов, асинхронные интеграции и кэширование правил на контроллере для типовых сценариев.

В качестве нагрузки рассматривались три режима: (1) штатный (равномерный поток), (2) «вход сотрудников» (пик в течение 20-30 минут), (3) «мероприятие» (резкий рост потока перед началом, затем спад). Метрики фиксировались на интервале 1 часа моделирования. Порог таймаута обработки события принят 500 мс (условное значение, при превышении которого наблюдается заметная задержка для пользователя). Результаты имитационного моделирования приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение времени обработки события и доли таймаутов

Режим	$\bar{T}$, мс (A)	$\bar{T}$, мс (B)	Таймауты, % (A)	Таймауты, % (B)
Штатный	180	125	2.1	0.6
Пик сотрудников	420	290	11.4	4.0
Мероприятие	510	340	16.8	6.2

Оптимизированный вариант обеспечивает снижение среднего времени обработки на 25-35% и уменьшение доли таймаутов в пиковых режимах.

Обсуждение результатов и рекомендации по внедрению

Влияние предложенных мер на эксплуатацию и безопасность

Полученные результаты показывают, что основная часть выигрыша по времени реакции достигается за счёт уменьшения «критического пути» и исключения синхронных внешних операций. При этом уровень безопасности не снижается, поскольку: (1) правила доступа остаются централизованно управляемыми и проходят аудит; (2) риск-ориентированный слой повышает чувствительность к аномалиям; (3) интеграция с СВН обеспечивает дополнительный фактор подтверждения. Важным аспектом является корректная настройка приоритетов режимов, особенно «пожар» и аварийные сценарии.

С эксплуатационной точки зрения переход к событийной архитектуре повышает наблюдаемость системы: события имеют единый формат, доступны для мониторинга в реальном времени и могут быть использованы для построения дашбордов (нагрузка по входным группам, доля отказов, активность по зонам). Это позволяет заранее выявлять проблемы – например, некорректно настроенные правила на конкретной двери или деградацию связи с контроллером.

Следует учитывать, что кэширование правил на контроллере требует дисциплины управления версиями: контроллер должен получать обновления политик атомарно, а при невозможности обновления переходить в безопасный режим (по заранее согласованному сценарию). Рекомендуется использовать механизмы подписывания политик и контроль целостности конфигурации.

Этапы внедрения на объекте типа Конгресс-Холл

Для практического внедрения оптимизаций на действующем объекте целесообразно применять поэтапный подход:

Этап 1 – инвентаризация и аудит текущих политик: устранение дубликатов ролей, нормализация зон, настройка единых шаблонов и регламента изменений. На этом же этапе определяется перечень критических точек прохода и требования к режимам (пожар, авария, мероприятие).

Этап 2 – внедрение единого формата событий и централизованного логирования: настройка корреляционных идентификаторов, синхронизация времени, построение базовых отчётов и контроль полноты журналов.

Этап 3 – подключение шины сообщений/API для интеграций. Сначала интеграция с СВН (связка события доступа и камеры), затем интеграция с HR/учётом рабочего времени, и далее – с SIEM/архивом логов. Важно настраивать обработку асинхронно, чтобы не увеличивать критический путь.

Этап 4 – кэширование политик на контроллерах и настройка автономного режима для выбранных точек прохода. Проводятся испытания при отключении связи с сервером и при восстановлении связи (синхронизация журналов).

Этап 5 – включение риск-ориентированного слоя. Начинать рекомендуется с простых эвристик (N отказов, нетипичное время, «ускоренные» проходы), после накопления данных возможно подключение более сложной аналитики.

Поэтапность позволяет получить быстрый эффект уже на ранних стадиях и снизить риски внедрения, так как критичные сценарии проверяются на пилотной зоне до тиражирования.

Ограничения и направления дальнейших исследований

Ограничением представленного исследования является использование моделирования как основного метода оценки. Реальные значения метрик зависят от конкретного оборудования, сети, конфигурации БД и качества правил. Однако сами принципы оптимизации (сокращение критического пути, асинхронные интеграции, гибридная модель доступа, риск-скоринг) являются переносимыми и подтверждаются результатами работ других авторов.

В качестве направлений дальнейших исследований можно выделить: (1) разработку формальных методов верификации политик ABAC и автоматического поиска конфликтов; (2) применение методов машинного обучения для прогнозирования аномалий и оценки риска с учётом траекторий перемещения; (3) оценку экономической эффективности модернизации (CAPEX/OPEX) и оптимального уровня резервирования для объектов различного масштаба.

Также перспективным является применение «цифрового двойника» СКУД: симуляционная модель, синхронизируемая с журналами реальной системы, позволяет тестировать новые правила и сценарии мероприятия без риска для эксплуатации.

Заключение

В работе рассмотрена задача оптимизации процессов контроля и управления в системе контроля и управления доступом объекта общественного назначения (Конгресс-Холл «Аулие-Ата»). Выполнен обзор типовых архитектур СКУД, моделей управления доступом и подходов к интеграции с другими системами безопасности. Показано, что на объектах с переменной нагрузкой основные проблемы связаны с задержками обработки событий, конфликтами правил, недостаточной интеграцией и ограниченной аналитикой.

Предложен комплекс мер, включающий событийно-ориентированную обработку и разделение функций по уровням, кэширование критических правил на контроллерах, гибридную модель RBAC+ABAC с управлением конфликтами, риск-ориентированный слой обнаружения аномалий, а также единый контур событий через API/шину сообщений для интеграции с СВН, ОПС/АПТ, HR и SIEM. Представлены структурная схема и алгоритм обработки события доступа.

По результатам моделирования достигнуто снижение среднего времени обработки события на 25-35% и уменьшение доли таймаутов в 2-3 раза в пиковых режимах. Улучшена полнота журналирования за счёт корреляции событий и унификации формата данных. Предложенные решения могут быть использованы при проектировании и модернизации СКУД объектов массового пребывания людей, обеспечивая повышение удобства эксплуатации при сохранении требований безопасности.

Список литературы

1. Security Industry Association (SIA). Open Supervised Device Protocol (OSDP) v2.2 – Technical Specification. Silver Spring, MD: SIA, 2017.

2. Role-Based Access Control Models / R.S. Sandhu et al // IEEE Computer. – 1996. – Vol. 29, № 2. – P. 38-47.

3. Hu V.C. Assessment of Access Control Systems / V.C. Hu, D. Ferraiolo, R. Kuhn // NIST Interagency Report 7316. Gaithersburg, MD: NIST, 2006.

4. McGraw R. Risk-Adaptable Access Control (RAdAC) / R. McGraw // Security and Privacy in Dynamic Environments. IEEE, 2009.

5. Гончаров А.В. Системы контроля и управления доступом: проектирование и эксплуатация / А.В. Гончаров. – М.: ИНФРА-М, 2021.
6. Сидоров Н.Н. Интеллектуальные системы безопасности: методы анализа событий и предотвращения инцидентов / Н.Н. Сидоров. – СПб.: Питер, 2020.
7. Zhang H. Event-Driven Architectures for Security Monitoring: A Survey and Practical Considerations / H. Zhang, J. Li // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – P. 102340-102356.
8. Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications / A. Al-Fuqaha et al // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2015. – Vol. 17, № 4. – P. 2347-2376.
9. Chen X. Integrating Access Control Events with Video Analytics for Incident Response / X. Chen, Y. Zhang // Journal of Security and Networks. – 2022. – Vol. 17, № 3. – P. 145-158.
10. Kent K. Guide to Computer Security Log Management / K. Kent, M. Souppaya // NIST Special Publication 800-92. Gaithersburg, MD: NIST, 2006. – 72 p.
11. ISO/IEC 27001:2022. Information security, cybersecurity and privacy protection – Information security management systems – Requirements. Geneva: ISO, 2022.
12. ISO/IEC 27002:2022. Information security, cybersecurity and privacy protection – Information security controls. Geneva: ISO, 2022.
13. IEC 60839-11-1:2013. Alarm and electronic security systems – Part 11-1: Electronic access control systems – System and components requirements. Geneva: IEC, 2013.
14. National Institute of Standards and Technology. Security and Privacy Controls for Information Systems and Organizations. NIST Special Publication 800-53 Rev. 5. Gaithersburg, MD: NIST, 2020.

References

1. Security Industry Association (SIA). Open Supervised Device Protocol (OSDP) v2.2 – Technical Specification. Silver Spring, MD: SIA, 2017. (In English).
2. Role-Based Access Control Models / R.S. Sandhu et al // IEEE Computer. – 1996. – Vol. 29, № 2. – P. 38-47. (In English).
3. Hu V.C. Assessment of Access Control Systems / V.C. Hu, D. Ferraiolo, R. Kuhn // NIST Interagency Report 7316. Gaithersburg, MD: NIST, 2006. (In English).
4. McGraw R. Risk-Adaptable Access Control (RAdAC) / R. McGraw // Security and Privacy in Dynamic Environments. IEEE, 2009. (In English).
5. Goncharov A.V. Sistemy kontrolya i upravleniya dostupom: proektirovanie i ehkspluatatsiya / A.V. Goncharov. – M.: INFRA-M, 2021. (In Russian).
6. Sidorov N.N. Intellektual'nye sistemy bezopasnosti: metody analiza sobytii i predotvrashcheniya intsidentov / N.N. Sidorov. – SPb.: Piter, 2020. (In Russian).
7. Zhang H. Event-Driven Architectures for Security Monitoring: A Survey and Practical Considerations / H. Zhang, J. Li // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – P. 102340-102356. (In English).
8. Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications / A. Al-Fuqaha et al // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2015. – Vol. 17, № 4. – P. 2347-2376. (In English).
9. Chen X. Integrating Access Control Events with Video Analytics for Incident Response / X. Chen, Y. Zhang // Journal of Security and Networks. – 2022. – Vol. 17, № 3. – P. 145-158. (In English).
10. Kent K. Guide to Computer Security Log Management / K. Kent, M. Souppaya // NIST Special Publication 800-92. Gaithersburg, MD: NIST, 2006. – 72 p. (In English).
11. ISO/IEC 27001:2022. Information security, cybersecurity and privacy protection – Information security management systems – Requirements. Geneva: ISO, 2022. (In English).
12. ISO/IEC 27002:2022. Information security, cybersecurity and privacy protection – Information security controls. Geneva: ISO, 2022. (In English).
13. IEC 60839-11-1:2013. Alarm and electronic security systems – Part 11-1: Electronic access control systems – System and components requirements. Geneva: IEC, 2013. (In English).
14. National Institute of Standards and Technology. Security and Privacy Controls for Information Systems and Organizations. NIST Special Publication 800-53 Rev. 5. Gaithersburg, MD: NIST, 2020. (In English).

Б.С. Сарсенов*, Д. Жамангарин
Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
010000, Қазақстан Республикасы, Астана қ., Александр Пушкина к-сі, 11
*e-mail: batyr.sarsenov@gmail.com

ӘУЛИЕ-АТА КОНГРЕСС-ХОЛЛЫНЫҢ ҚОЛЖЕТІМДІЛІКТІ БАҚЫЛАУ ЖӘНЕ БАСҚАРУ ЖҮЙЕСІНДЕГІ БАҚЫЛАУ ЖӘНЕ БАСҚАРУ ПРОЦЕСТЕРІН ОҢТАЙЛАНДЫРУ

Мақалада қоғамдық мақсаттағы объект – "Әулие Ата" Конгресс-Холл мысалында қол жеткізуді бақылау және басқару жүйесіндегі бақылау және басқару процестерінің тиімділігі мен сенімділігін арттыру міндеті қарастырылады. СКУД типтік архитектураларына және ақпараттық қауіпсіздік пен инженерлік қауіпсіздік жүйелеріне қойылатын нормативтік талаптарға шолу жасалды. Келушілердің тығыздығы жоғары нысандарда және қол жетімділіктің аралас сценарийлерінде (қызметкерлер, мердігерлер, қонақтар, бұқаралық іс-шаралар) шешімдердің кешігуі, ережелердің сәйкес келмеуі, бейнебақылау және өрт автоматикасымен интеграцияның жеткіліксіздігі және оқиғалардың шектеулі талдауы негізгі проблемалар болып табылады. Оңтайландыру шараларының кешені ұсынылды: оқиғаға бағытталған өңдеуге көшу (event-driven), жергілікті контроллерлер мен ережелерді кэштеу арқылы серверді түсіру, тәуекелді адаптивті бағалаумен rbac+abac қол жеткізуді басқарудың гибридті моделін қолдану, ЖУРНАЛДАУДЫ біріздендіру және API/шиналар арқылы интеграциялау.

Түйін сөздер: *қолжетімділікті бақылау және басқару, ҚББЖ; оңтайландыру, RBAC, ABAC, тәуекелді бағалау, интеграция, оқиғаға негізделген өңдеу, аудит*.

B.S. Sarsenov*, D. Zhamangarin
L.N. Gumilyov Eurasian National University,
010000, Republic of Kazakhstan, Astana, Alexander Pushkin St., 11
*e-mail: batyr.sarsenov@gmail.com

OPTIMIZATION OF CONTROL AND MANAGEMENT PROCESSES IN THE ACCESS CONTROL AND MANAGEMENT SYSTEM OF THE AULIE-ATA CONGRESS HALL

The article discusses the task of improving the efficiency and reliability of control and management processes in the access control and management system (ACMS) using the example of a public facility, the Congress Hall "Aulie-Ata". The article provides an overview of typical ACMS architectures and regulatory requirements for information security and engineering security systems. It has been shown that at facilities with a high density of visitors and mixed access scenarios (employees, contractors, guests, and mass events), the key problems are decision delays, inconsistent rules, insufficient integration with video surveillance and fire automation, and limited event analytics. A set of optimization measures is proposed: transition to event-oriented processing (event-driven), server offloading due to local controllers and rule caching, application of a hybrid RBAC+ABAC access control model with adaptive risk assessment, unification of logging and integration via API/bus.

Key words: *access control, ACMS, optimization, RBAC, ABAC, risk scoring, integration, event-driven, audit.*

Сведения об авторах

Батырхан Саматұлы Сарсенов* – магистрант, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Республика Казахстан, г. Астана; e-mail: batyr.sarsenov@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-5491-2160.

Дусмат Жамангарин – PhD, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Республика Казахстан, г. Астана; e-mail: Dusmat_zhamangarin@vk.com.

Авторлар туралы мәліметтер

Батырхан Саматұлы Сарсенов* – магистрант, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қазақстан Республикасы, Астана қ.; e-mail: batyr.sarsenov@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-5491-2160.

Дусмат Жамангарин – PhD, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қазақстан Республикасы, Астана қ.; e-mail: Dusmat_zhamangarin@vk.com.

Information about the authors

Batyrkhan Samatuly Sarsenov* – Master's student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Republic of Kazakhstan, Astana; e-mail: batyr.sarsenov@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-5491-2160.

Dusmat Zhamangarin — PhD, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Republic of Kazakhstan, Astana; e-mail: Dusmat_zhamangarin@vk.com.

Поступила в редакцию 05.01.2026
Поступила после доработки 23.02.2026
Принята к публикации 24.02.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-16

МРНТИ: 47.45.29

CC BY 4.0
Check for updates

А.С. Инчин[1], А.Е. Кулакаева[2*], М.П. Сайганов[1], Ш.С. Болат[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

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ИНТЕГРАЦИИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛОСКИХ GSM-АНТЕНН В ЭЛЕКТРОННОЙ НАВИГАЦИОННОЙ ПЛОМБЕ

***Аннотация**. В данной статье рассматривается практический вопрос выбора GSM-антенны для электронной навигационной пломбы, предназначенной для контроля и мониторинга перевозок. В отличие от традиционных методов, опирающихся на паспортные данные, акцент сделан на исследовании работы антенн в составе готового устройства с учетом влияния пластикового корпуса, внутренних металлических компонентов и общей компоновки электроники.*

Для этого были проведены лабораторные испытания 28 коммерчески доступных плоских GSM-антенн диапазона GSM 900 в условиях, максимально приближенных к реальной эксплуатации в навигационной пломбе. Оценка характеристик осуществлялась на стандартизированном измерительном стенде с использованием макета корпуса и эталонной антенны. Основным критерием сравнения являлся коэффициент стоячей волны, отражающий качество согласования антенны с радиомодулем и уровень потерь мощности.

При выборе также учитывались ограничения по габаритам корпуса, имеющие важное значение для практической интеграции. На основании комплексного анализа были отобраны антенны, обеспечивающие стабильную связь и достаточную энергетическую эффективность, и рекомендованы для использования в серийных электронных навигационных пломбах.

Полученные результаты подтверждают, что корректный выбор антенны невозможен без учета условий ее установки в составе конкретного устройства, а испытания в условиях, приближенных к реальной компоновке, являются важным этапом при разработке навигационных систем, эксплуатируемых в условиях ограниченного внутреннего объема и плотной компоновки элементов.

***Ключевые слова:** навигационная пломба, GSM-антенна, плоская антенна, коэффициент стоячей волны, КСВ, диапазон GSM 900, согласование антенны, логистика.*

Введение

В последние годы в Республике Казахстан особое внимание уделяется вопросам повышения эффективности и безопасности перевозок товаров, что связано с важным стратегическим положением страны в региональных и международных транспортных коридорах. С учетом роста объемов грузоперевозок, ужесточения требований к прослеживаемости товаров и усиления контроля за логистическими цепочками, особенно актуальными становятся электронные навигационные пломбы. Эти устройства обеспечивают дистанционный мониторинг местоположения и состояния груза в режиме реального времени.

Электронные навигационные пломбы, помимо обеспечения сохранности груза, должны отвечать строгим техническим и эксплуатационным требованиям, определённым Решением Совета Евразийской экономической комиссии от 4 июля 2023 года № 75 [1]. Ключевые требования включают: наличие сменного многоразового элемента пломбирования,

©А.С. Инчин, А.Е. Кулакаева, М.П. Сайганов, Ш.С. Болат, 2026

автоматический контроль целостности, уникальный идентификационный номер, возможность дистанционного управления через национального телекоммуникационного оператора, высокую степень защиты корпуса (IP67 и выше), широкий диапазон рабочих температур (от –40°C до +70°C), а также длительную автономную работу (не менее 30-45 суток) в различных режимах передачи данных.

В настоящее время электронные н навигационные пломбы находят все более широкое применение в грузоперевозках, обеспечивая контроль целостности груза, его местоположения и параметров движения на протяжении всего маршрута [2]. Грузоперевозки, как основа мировой торговли, обеспечивают около 80% международного товарооборота благодаря своей экономичности и гибкости мультимодальных схем [3]. Однако увеличение объемов перевозок влечет за собой новые проблемы: изменение климата, перегруженность инфраструктуры и рост социальных издержек, таких как пробки и аварийность, усложняют логистические маршруты. Для повышения устойчивости логистики предлагается оптимальное сочетание автомобильного и железнодорожного транспорта между портами, что позволяет сбалансировать скорость, стоимость и экологичность перевозок [4].

Внедрение цифровых контейнеров, оснащённых датчиками и коммуникационными модулями, позволяет отслеживать местоположение, состояние груза и параметры окружающей среды в режиме реального времени. Это не только снижает риски утраты и повреждений, но и предоставляет данные для оптимизации перевозок [5]. В условиях ужесточения таможенных процедур и многоуровневых проверок на границах электронная навигационная пломба становится важным элементом многослойной системы безопасности, повышая сохранность грузов и общую эффективность логистики [5].

Современный рынок предлагает разнообразные решения, среди которых RFID широко признана как удобное средство для идентификации и контроля грузов [6, 7]. В то же время в некоторых развивающихся странах для удалённого мониторинга и блокировки транспортных средств внедряются IoT-решения, использующие GPS и GSM/GPRS [8].

В Китае представлены более универсальные технологические решения, в том числе многофункциональные навигационные пломбы с интерфейсами GPS/GSM, поддерживающие BLE и NFC для взаимодействия со смартфонами и удалённого управления замковыми механизмами через мобильные приложения. Такие устройства применяются в отраслях, связанных с транспортировкой пищевых продуктов, нефтехимии и газовой продукции [9]. Однако, несмотря на высокую технологическую оснащённость, эти разработки не обеспечивают полноценной оценки энергоэффективности и устойчивости связи в условиях длительной автономной эксплуатации.

Современные исследования акцентируют внимание на информационной безопасности и защищенной связи. В работе [10] представлена интеллектуальная система мониторинга ценных грузов, которая объединяет GPS, RFID и беспроводные сенсорные сети (WSN) для зондирования окружающей среды и отслеживания в реальном времени. Важными элементом архитектуры этой системы является легковесная криптосистема на основе идентификационных атрибутов (IBC), обеспечивающая защищенную передачу данных и управление доступом даже в устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами, таких как электронные пломбы.

Одним из направлений развития электронных навигационных пломб (ЭНП) является обеспечение информационной безопасности и устойчивой связи в различных эксплуатационных условиях. В работе [11] предложен гибридный криптографический механизм, который сочетает симметричное и асимметричное шифрование. Это особенно актуально для устройств с ограниченными вычислительными ресурсами. Однако, несмотря на важность таких подходов, внимание в них в основном сосредоточено на протоколах безопасности, в то время как физические и радиочастотные аспекты конструкции навигационных пломб, критически важные для обеспечения энергоэффективности и стабильной связи, остаются без должного внимания.

В ряде исследований основное внимание уделяется высокочастотным каналам передачи данных в замкнутых металлических средах. Например, в работе [12] рассматривается навигационная пломба, работающая на частоте 60 ГГц, с акцентом на параметр RDS и влияние геометрии корпуса. Аналогичные выводы представлены в исследованиях [13], где предложена внутрикластерная модель трассировки лучей (RT-ICM)

для mmWave-каналов, и [14], в котором анализируются резонансные режимы и потери пути внутри металлических корпусов для THz-диапазона [15].

Интеграция GSM-антенны в ограниченное пространство корпуса навигационной пломбы сопряжена со значительными трудностями. Необходимо обеспечить герметичность (соответствие стандарту IP67), устойчивость к вибрационным и температурным нагрузкам, а также учитывать близость металлических элементов и аккумуляторов. Практический опыт показывает, что даже незначительные ошибки в выборе или размещении антенны могут привести к увеличению коэффициента стоячей волны (КСВ), повышению энергопотребления радиомодуля и снижению общей надежности устройства.

Анализ литературных источников выявил, что, несмотря на существенный прогресс в проектировании навигационных пломб, в инженерной и научной среде отсутствуют системные, экспериментально подтвержденные подходы к выбору и проверке GSM-антенн для компактных автономных устройств, учитывающие сложные условия эксплуатации. Большинство существующих исследований ограничиваются либо лабораторными экспериментами, либо теоретическим анализом и зачастую не принимают во внимание особенности герметичных пластиковых корпусов и реальные климатические, электромагнитные и механические воздействия.

В рамках данной работы проведено экспериментальное сравнение характеристик 28 коммерческих плоских GSM-антенн с целью выбора оптимального решения для разработки электронной навигационной пломбы.

Полученные результаты позволяют разрабатывать собственные навигационные пломбы, полностью соответствующие специфическим требованиям Республики Казахстан и учитывающие все региональные климатические, географические и инфраструктурные особенности.

Методы исследования

Для создания собственного прототипа навигационной пломбы была использована программа SolidWorks, которая позволила детально разработать конструкцию с учетом требований к прочности, совместимости модулей и габаритам.

Целью данной работы было проведение комплексного исследования и сравнительного анализа плоских GSM-антенн, произведенных компанией Shenzhen Kexin Wireless Technology Co., Ltd. (Китай), с целью выбора наиболее подходящих моделей для использования в электронной навигационной пломбе собственного производства

Так, в ходе исследования было испытано 28 типов плоских коммерческих GSM-антенн данного производителя, каждой из которых был присвоен уникальный номер (№ 1–28). Для обеспечения объективного сравнения использовалась антенна «Змейка», разработанная в ТОО «Институт космической техники и технологий» на текстолитовой подложке, в качестве образцовой по КСВ в диапазоне GSM 900 МГц (рис. 1) [16].



а) схематичное изображение | б) фотография макета реализованной антенны | в) антенна внутри пластикового корпуса рядом с металлической пластиной

Рисунок 1 – Внешний вид и чертеж образцовой антенна «Змейка» и условия измерения КСВ покупных антенн

Антенна «Змейка» демонстрировала наилучшие показатели КСВ в заданном диапазоне и соответствовала габаритным ограничениям для интеграции в герметичный пластиковый корпус навигационной пломбы. Поэтому на всех графиках КСВ исследуемых антенн характеристики сравнивались с параметрами данной антенны, которая

использовалась исключительно как референсная (контрольная) для сравнительной оценки и не рассматривалась для интеграции в корпус разрабатываемой навигационной пломбы.

Для оценки влияния материала и толщины пластикового корпуса навигационной пломбы, а также близлежащих внутренних металлических узлов, электронной платы, батареи и проводов на частоту настройки и качество согласования антенн с GSM-модулем, все испытания проводились с использованием макета пластикового корпуса. Чтобы максимально приблизить условия эксперимента к реальным, каждая антенна крепилась к пластиковой пластине, имитирующей корпус пломбы, и располагалась в 1 см от металлической пластины, моделирующей внутренние металлические компоненты.

Лабораторные измерения проводились с использованием векторного анализатора цепей Keysight FieldFox N9915A на частотах 890 МГц (uplink) и 960 МГц (downlink), что соответствует рабочему диапазону GSM 900. Для каждой антенны вычислялось среднее значение КСВ, которое затем классифицировалось по следующей шкале: значения менее 2 считались отличными, диапазон от 2 до 3 относился к хорошему уровню, от 3 до 5 к удовлетворительным, от 5 до 7 к низкому качеству, а показатели выше 7 признавались неприемлемыми для использования. Все измерения проводились на одном и том же стенде для обеспечения сопоставимости результатов.

Следует отметить, что деревянный стол, на котором была установлена аппаратура, оказывает незначительное влияние на КСВ всего 1-2%. В то же время материал корпуса навигационной пломбы и близкое расположение антенны к металлическим элементам конструкции значительно влияют на этот параметр, изменяя его на 10-20%. Поэтому влияние стола в условиях эксперимента не учитывалось.

Для объективной оценки эффективности согласования антенн в работе использовалась общепринятая инженерная зависимость между КСВ и долей отраженной мощности, возвращаемой в линию передачи. КСВ позволяет количественно оценить, насколько эффективно антенна согласована с линией передачи сигнала. Следовательно, чем меньше значение КСВ, тем ниже потери на отражение и выше эффективность работы антенной системы [17].

Результаты

Основной целью исследования было определение оптимальных моделей GSM-антенн для навигационной пломбы, принимая во внимание эксплуатационные и конструктивные ограничения.

Рисунок 2 демонстрирует внешний вид опытного образца разрабатываемой навигационной пломбы. Корпус устройства изготовлен из прочного и износостойкого пластика, обеспечивающего защиту от воздействия влаги и пыли по классу IP67.



а) схематическое изображение навигационной пломбы

б) практическая реализация

Рисунок 2 – Разрабатываемая навигационная пломба

Разрабатываемая навигационная пломба является многофункциональным устройством, обеспечивающим высокую степень безопасности при транспортировке ценных грузов благодаря своей продуманной конструкции.

Качество и надежность передачи данных в беспроводных системах во многом зависят от характеристик используемой антенны. Поэтому следующим важным этапом исследования стал выбор, анализ и экспериментальная проверка различных антенных решений. В условиях ограниченного внутреннего объема корпуса, наличия металлических элементов и необходимости поддержания герметичности, подбор оптимальной антенны становится важным элементом для обеспечения стабильной работы устройства. В рамках данной работы

была проведена серия лабораторных испытаний антенн, максимально приближенных к реальным условиям эксплуатации навигационной пломбы.

Детальное исследование параметра КСВ различных антенн и их согласование с радиомодулем являются важными задачами для обеспечения надежной и энергоэффективной работы устройства, особенно в сложных и нестабильных условиях беспроводной сети.

В ходе испытаний для каждой антенны были получены значения КСВ на двух рабочих частотах: 890 МГц (uplink) и 960 МГц (downlink). На основе этих измерений было рассчитано среднее значение КСВ, после чего произведена градация по принятой шкале качества. Результаты по всем исследованным моделям, включая средние значения КСВ, присвоенные оценки качества и показатели CSQ, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты измерения КСВ и CSQ антенн

Антенна №	КСВ (890 МГц – uplink)	КСВ (960 МГц – downlink)	Средний КСВ	Оценка
0 (образцовый), собственная разработка	1,137	1.276	1.206	5
1 (GSM0001)	1,146	1,565	1,355	5
2 (GSM0002)	1,705	1,686	1,696	5
3 (GSM0003)	2,519	2,991	2,755	4
4 (GSM0004)	2,101	4,370	3,236	3
5 (GSM0005)	3,115	1,963	2,539	4
6 (GSM0006)	1,669	2,000	1,835	5
7 (GSM0007)	2,297	2,327	2,312	4
8 (GSM0008)	4,900	5,919	5,410	2
9 (GSM0009)	2,352	1,556	1,954	5
10 (GSM0010)	10,830	9,004	9,917	1
11 GSM0011)	2,490	5,789	4,140	3
12 (GSM0012)	1,325	2,941	2,133	4
13 (GSM0013)	1,687	1,748	1,718	5
14 (GSM0014)	5,026	6,179	5,603	2
15 (GSM0015)	7,956	9,124	8,540	1
16 (GSM0016)	2,467	3,204	2,836	4
17 (GSM0017)	1,342	1,485	1,414	5
18 (GSM0018)	14,000	13,890	13,945	1
19 (GSM0019)	1,544	2,624	2,084	4
20 (GSM0020)	2,003	2,337	2,170	4
21 (GSM0021)	3,623	5,365	4,494	3
22 (GSM0022)	3,649	3,335	3,492	3
23 (GSM0023)	3,227	3,858	3,543	3
24 (GSM0024)	2,511	2,702	2,607	4
25 (GSM0025)	1,634	1,527	1,580	5
26 (GSM0026)	2,221	2,865	2,543	4
27 (GSM0027)	1,654	1,656	1,655	5
28 (GSM0028)	6,780	5,287	6,034	2

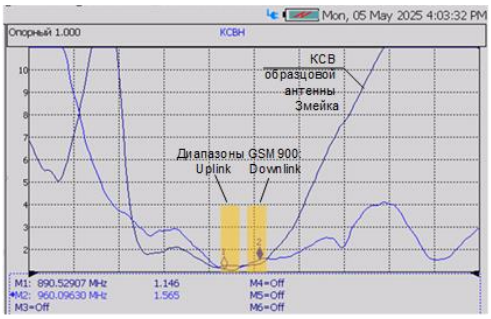
На основе рассчитанных средних значений КСВ в рабочем диапазоне GSM 900 МГц была проведена подробная классификация всех исследованных моделей антенн по 5-балльной шкале качества. Как показано в таблице 2, антенны с номерами 1, 2, 6, 9, 13, 17, 25 и 27 продемонстрировали наилучшие показатели согласования с радиомодулем и были отнесены к категории «отлично». Девять антенн (3, 5, 7, 12, 16, 19, 20, 24, 26) показали устойчивые значения КСВ, что позволило отнести их к классу «хорошо». Пять моделей (4, 11, 21, 22 и 23) были оценены как «удовлетворительно». Антенны под номерами 8, 14 и 28 были классифицированы как «плохие» по параметру согласования, а образцы 10, 15 и 18 были отнесены к категории «неприемлемо», что указывает на недопустимо высокие потери мощности и неэффективность в реальной эксплуатации.

Таблица 2 – Классификация антенн по качеству

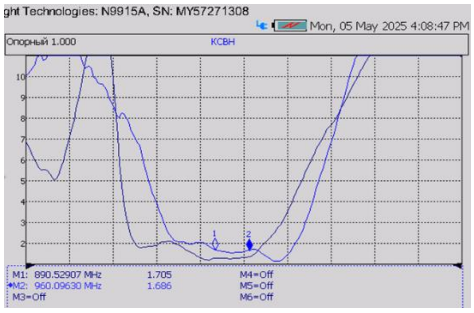
Оценка	Антенна №
5 (отлично)	1, 2, 6, 9, 13, 17, 25, 27
4 (хорошо)	3, 5, 7, 12, 16, 19, 20, 24, 26
3 (удовлетворительно)	4, 11, 21, 22, 23
2 (плохо)	8, 14, 28
1 (неприемлемо)	10, 15, 18

Такое распределение позволяет объективно сравнить широкий спектр коммерческих антенн и выбрать наиболее подходящие для последующего использования в электронной навигационной пломбе.

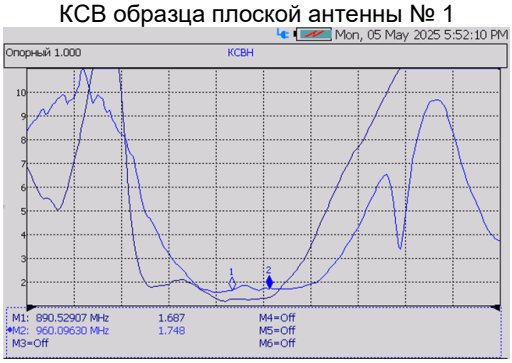
Для визуализации частотных характеристик антенн, показавших наилучшие результаты, на рисунке 3 представлены графики зависимости КСВ от частоты для антенн № 1, № 2, № 13 и №25. На каждом графике отмечены две контрольные точки. Марке 1 соответствует частоте uplink (890 МГц), а маркер 2 – частоте downlink (960 МГц).



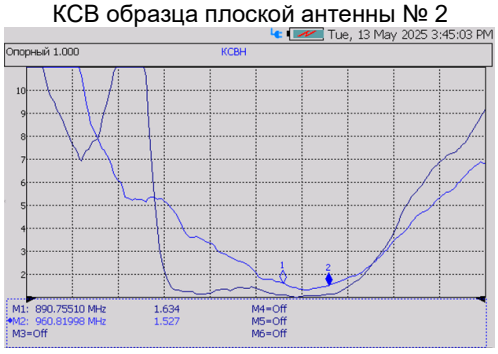
КСВ образца плоской антенны № 1



КСВ образца плоской антенны № 2



КСВ образца плоской антенны № 13



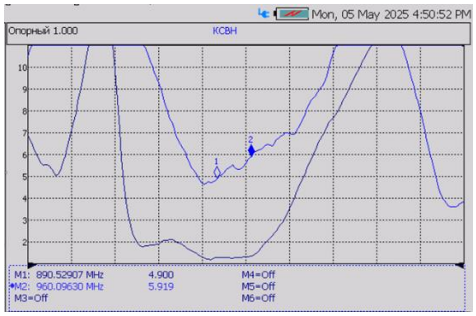
КСВ образца плоской антенны № 25

Рисунок 3 – Частотные характеристики КСВ антенн с наилучшими показателями

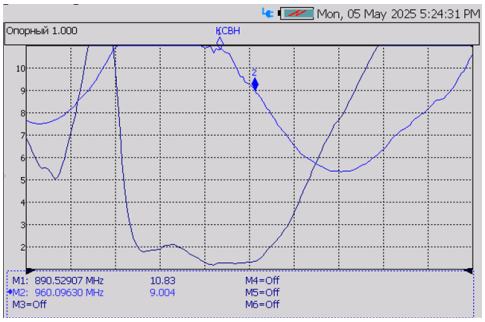
На рисунке 3 видно, что антенны в обеих контрольных точках показали значения КСВ, близкие к единице. Это свидетельствует о практически идеальном согласовании с радиомодулем. Например, для антенны № 25 (рис. 3) значения КСВ в точках 890,53 МГц и 960,10 МГц составили 1,634 и 1,527 соответственно, что указывает на высокий уровень эффективности передачи сигнала.

Демонстрация графиков КСВ для лучших образцов позволяет показать их преимущества по сравнению с другими протестированными моделями и обосновать выбор этих образцов для дальнейшего использования и внедрения в промышленное производство. В то же время некоторые исследованные образцы антенн продемонстрировали крайне неудовлетворительные электрические характеристики, что делает их использование в составе навигационной пломбы невозможным. Это отчетливо видно на соответствующих графиках (рис. 4), где во всех контрольных точках значения КСВ превышают допустимые пределы, а характер кривых свидетельствует о плохом согласовании с радиомодулем и высоких потерях энергии.

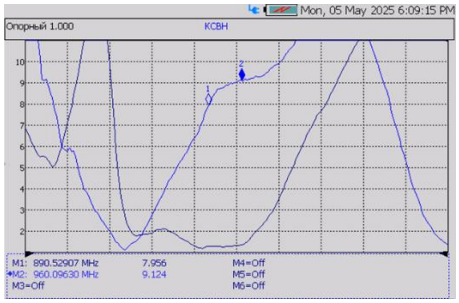
Таким образом, из-за значительного риска потерь мощности, ухудшения связи и преждевременной разрядки аккумулятора устройства, указанные антенны были признаны непригодными и не рекомендованы для использования в массовом производстве навигационных пломб.



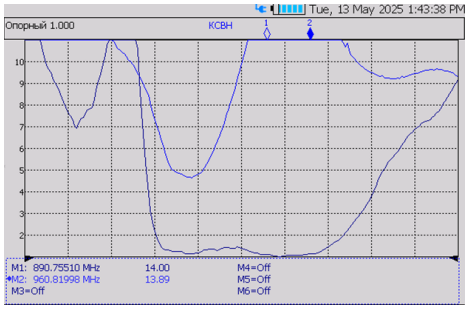
КСВ образца плоской антенны № 8



КСВ образца плоской антенны № 10



КСВ образца плоской антенны № 15



КСВ образца плоской антенны № 18

Рисунок 4 – Частотные характеристики КСВ антенн с наихудшими показателями

Разброс значений КСВ обусловлен конструктивными и геометрическими особенностями исследованных антенн, а также влиянием корпуса навигационной пломбы, в частности диэлектрической проницаемостью пластика и расположением металлических элементов. На рисунках 3 и 4 представлены графики, иллюстрирующие крайние случаи (антенны с наилучшими и наихудшими характеристиками) и в целом отражающие диапазон результатов, полученных для всей выборки из 28 антенн.

После предварительной оценки антенн по электрическим характеристикам был проведен дополнительный анализ соответствия габаритам корпуса навигационной пломбы всех восьми антенн, получивших оценку «отлично» (КСВ < 2) в таблице 2. Этот этап отбора был необходим для выявления моделей, обеспечивающих оптимальные параметры передачи сигнала (КСВ < 2) и при этом соответствующих ограничениям по внутреннему объему устройства. Результаты проверки соответствия длины и ширины антенн установленным требованиям представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Габаритный отбор среди наиболее качественных по КСВ антенн

Антенна №	Длина (мм)	Ширина (мм)	Допускается/ не допускается
1	78	6.5	Не допускается
2	40	12	Допускается
6	32	7	Допускается
9	120	50	Не допускается
13	124	14	Не допускается
17	112	16	Не допускается
25	40	15	Допускается
27	102	15	Не допускается

Анализ результатов испытаний показал, что из всех протестированных антенн только № 2, № 6 и № 25 соответствуют как электрическим, так и габаритным требованиям. Эти антенны могут быть рекомендованы для последующего использования в составе навигационной пломбы, поскольку обеспечивают высокую эффективность работы и полностью соответствуют конструктивным ограничениям устройства.

Испытания выявили значительную зависимость электрических характеристик плоских GSM-антенн не только от их конструкции, но и от условий установки внутри корпуса навигационной пломбы. Даже антенны одного производителя демонстрируют существенный

разброс значений КСВ, обусловленный различиями в геометрии излучающих элементов и их чувствительностью к близлежащим металлическим частям и диэлектрическому материалу корпуса. Практические измерения подтверждают, что именно корпус и внутренняя компоновка оказывают определяющее влияние на согласование антенны с радиомодулем.

Сравнительный анализ показал, что удовлетворительные значения КСВ сами по себе недостаточны для выбора оптимальной антенны. Некоторые образцы с хорошими электрическими характеристиками непригодны из-за несоответствия габаритным ограничениям корпуса. Это подчеркивает необходимость комплексного подхода к выбору антенного решения. Совместный учет электрических и конструктивных критериев позволил установить, что лишь ограниченное число антенн обеспечивает требуемый уровень согласования, сохраняя при этом возможность интеграции в герметичный корпус навигационной пломбы.

Заключение

Проведено комплексное экспериментальное исследование плоских коммерческих GSM-антенн с целью определения возможности их использования в разрабатываемой электронной навигационной пломбе. Испытания проводились в условиях, приближенных к реальным, с учетом влияния пластикового корпуса и внутренних металлических компонентов, что позволило объективно оценить характеристики антенн в составе готового устройства.

Результаты измерений выявили значительную зависимость электрических параметров антенн от их конструкции и условий установки. В частности, некоторые коммерческие антенны, демонстрировавшие приемлемый КСВ в свободном пространстве, теряли работоспособность после интеграции в корпус пломбы. Это подчеркивает важность тестирования антенн непосредственно в условиях, соответствующих реальной компоновке устройства.

На основе комплексной оценки электрических и габаритных характеристик определены антенны, обеспечивающие оптимальное согласование с радиомодулем и соответствующие конструктивным ограничениям корпуса. Рекомендуется использовать выбранные антенные решения в дальнейшей разработке и серийном производстве электронной навигационной пломбы, поскольку они обеспечивают стабильную связь и повышенную энергетическую эффективность устройства в реальных условиях эксплуатации.

Список литературы

1. Решение Совета Евразийской экономической комиссии от 4 июля 2023 года № 75.
2. Lyu J. Digital Technique-Enabled Container Logistics Supply Chain Sustainability Achievement / J. Lyu, F. Zhou, Y. He // Sustainability. – 2023. – № 15. – P. 16014. https://doi.org/10.3390/su152216014.
3. Smart logistics based on the internet of things technology: An overview / Y. Ding et al // Int. J. Logist. Res. Appl. – 2021. – № 24. – P. 323-345.
4. Durajczyk P. Possibilities of Using Inland Navigation to Improve the Efficiency of Interurban Freight Transport with the Use of the RIS System – Case Study of the Route Opole-Szczecin / P. Durajczyk, N. Drop, P. Niedzielski // Sustainability. – 2024. – № 16. – P. 10754. https://doi.org/10.3390/su162310754.
5. Multi-aspect applications and development challenges of digital twin-driven management in global smart ports / K. Wang et al // Case Stud. Transp. Policy. – 2021. – № 9. – P. 1298-1312.
6. Daschkovska K. Decision Support in Supply Chains Based on E-Seals Secure System / K. Daschkovska // IFAC-PapersOnLine. – 2017. – Vol. 50, Issue 1. – P. 14224-14229. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.2096.
7. Natabita A. Implementation of Electronic Seal Cargo at Cikarang Dry Port to Support National Logistics System / A. Natabita, N. Nurillah, K. Komang // Journal Indonesia: Manajemen Informatika dan Komunikasi. – 2024. – № 5. P. 1352-1361. https://doi.org/10.35870/jimik.v5i2.618.
8. Smart anti-theft vehicle tracking system for Bangladesh based on Internet of Things / M.S. Uddin et al // 2017 4th International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE), Dhaka, Bangladesh. – 2017. – P. 624-628. https://doi.org/10.1109/ICAEE.2017.8255432.
9. Jiang Xia. Research and Practice of the E-seal / Jiang Xia, Meng Shu, Li, Qingli // E-lock system based on mobile internet. – 2017. https://doi.org/10.2991/iccia-17.2017.42.
10. ID-based secure real-time tracking system / C.Y. Yeun et al // International Journal of Advanced Logistics. – 2015. – № 4(2). – P. 100-114. https://doi.org/10.1080/2287108X.2015.1049684.

11. Securing E-Seal real time tracking system for Internet of Things /M. al Shemaili et al // 2013 8th International Conference for Internet Technology and Secured Transactions, ICITST. – 2013. – P. 65-69. https://doi.org/10.1109/ICIST.2013.6747506.
12. Seyran Khademi, Zoubir Irahhauten, and Alle-Jan van der Veen. 60 GHz Wireless Link Within Metal Enclosures: Channel Measurements and System Analysis. arXiv:1311.4439v1 [cs.IT]. – 2013.
13. Yavuz Yaman, Predrag Spasojevic. An Intra-Cluster Model with Diffuse Scattering for mmWave Communications: RT-ICM. Submitted on 20 May 2019. https://doi.org/10.48550/arXiv.1905.08295.
14. Fu J. 300 GHz Channel Characterization of Chip-to-Chip Communication in Metal Enclosure / J. Fu, P. Juyal, A. Zajić // 2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Krakow, Poland, 2019. – P. 1-5.
15. Zhang Yueping. An Overview of the Development of Antenna-in-Package Technology for Highly Integrated Wireless Devices / Zhang Yueping, Mao Junfa // Proceedings of the IEEE. – 2019. – P. 1-16. https://doi.org/10.1109/JPROC.2019.2933267.
16. Институт космической техники и технологий https://istt.kz
17. Balanis C.A. Antenna theory: analysis and design / C.A. Balanis // John wiley & sons. – 2016.

References

1. Reshenie Soveta Evraziiskoi ehkonomicheskoi komissii ot 4 iyulya 2023 goda № 75. (In Russian).
2. Lyu J. Digital Technique-Enabled Container Logistics Supply Chain Sustainability Achievement / J. Lyu, F. Zhou, Y. He // Sustainability. – 2023. – № 15. – R. 16014. https://doi.org/10.3390/su152216014. (In English).
3. Smart logistics based on the internet of things technology: An overview / Y. Ding et al // Int. J. Logist. Res. Appl. – 2021. – № 24. – R. 323-345. (In English).
4. Durajczyk P. Possibilities of Using Inland Navigation to Improve the Efficiency of Interurban Freight Transport with the Use of the RIS System – Case Study of the Route Opole–Szczecin / P. Durajczyk, N. Drop, P. Niedzielski // Sustainability. – 2024. – № 16. – R. 10754. https://doi.org/10.3390/su162310754. (In English).
5. Multi-aspect applications and development challenges of digital twin-driven management in global smart ports / K. Wang et al // Case Stud. Transp. Policy. – 2021. – № 9. – R. 1298-1312. (In English).
6. Daschkovska K. Decision Support in Supply Chains Based on E-Seals Secure System / K. Daschkovska // IFAC-PapersOnLine. – 2017. – Vol. 50, Issue 1. – P. 14224-14229. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.2096. (In English).
7. Natabita A. Implementation of Electronic Seal Cargo at Cikarang Dry Port to Support National Logistics System / A. Natabita, N. Nurillah, K. Komang // Journal Indonesia : Manajemen Informatika dan Komunikasi. – 2024. – № 5. R. 1352-1361. https://doi.org/10.35870/jimik.v5i2.618. (In English).
8. Smart anti-theft vehicle tracking system for Bangladesh based on Internet of Things / M.S. Uddin et al // 2017 4th International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE), Dhaka, Bangladesh. – 2017. – R. 624-628. https://doi.org/10.1109/ICAEE.2017.8255432. (In English).
9. Jiang Xia. Research and Practice of the E-seal / Jiang Xia, Meng Shu, Li, Qingli // E-lock system based on mobile internet. – 2017. https://doi.org/10.2991/iccia-17.2017.42. (In English).
10. ID-based secure real-time tracking system / C.Y. Yeun et al // International Journal of Advanced Logistics. – 2015. – № 4(2). – R. 100-114. https://doi.org/10.1080/2287108X.2015.1049684. (In English).
11. Securing E-Seal real time tracking system for Internet of Things /M. al Shemaili et al // 2013 8th International Conference for Internet Technology and Secured Transactions, ICITST. – 2013. – R. 65-69. https://doi.org/10.1109/ICIST.2013.6747506. (In English).
12. Seyran Khademi, Zoubir Irahhauten, and Alle-Jan van der Veen. 60 GHz Wireless Link Within Metal Enclosures: Channel Measurements and System Analysis. arXiv:1311.4439v1 [cs.IT]. – 2013. (In English).
13. Yavuz Yaman, Predrag Spasojevic. An Intra-Cluster Model with Diffuse Scattering for mmWave Communications: RT-ICM. Submitted on 20 May 2019. https://doi.org/10.48550/arXiv.1905.08295. (In English).
14. Fu J. 300 GHz Channel Characterization of Chip-to-Chip Communication in Metal Enclosure / J. Fu, P. Juyal, A. Zajić // 2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Krakow, Poland, 2019, R. 1-5. (In English).

15. Zhang Yueping. An Overview of the Development of Antenna-in-Package Technology for Highly Integrated Wireless Devices / Zhang Yueping, Mao Junfa // Proceedings of the IEEE. – 2019. – P. 1-16. https://doi.org/10.1109/JPROC.2019.2933267. (In English).
16. Institut kosmicheskoi tekhniki i tekhnologii https://istt.kz. (In Russian).
17. Balanis C.A. Antenna theory: analysis and design / C.A. Balanis // John wiley & sons. – 2016. (In English).

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.Е. Кулакаева[2*], М.П. Сайганов[1], Ш.С. Болат[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

ЭЛЕКТРОНДЫҚ НАВИГАЦИЯЛЫҚ ПЛОМБА ҚҰРАМЫНДАҒЫ ЖАЛПАҚ GSM-АНТЕННАЛАРДЫҢ СИПАТТАМАЛАРЫНА ИНТЕГРАЦИЯЛАУ ЖАҒДАЙЛАРЫНЫҢ ӘСЕРІ

Аңдатпа. *Бұл мақалада тасымалдауды бақылау және мониторинг жасауға арналған электрондық навигациялық пломба үшін GSM-антеннаны таңдау мәселесі қарастырылады. Дәстүрлі тәсілдер көбіне паспорттық сипаттамаларға сүйенсе, бұл зерттеуде антенналардың дайын құрылғы құрамындағы жұмысын, пластик корпустың, ішкі металл компоненттердің және электрондық тораптардың жалпы құрылымының әсерін ескере отырып талдауға басымдық берілді.*

Осы мақсатта GSM 900 диапазонына арналған 28 коммерциялық қолжетімді жалпақ GSM-антенна навигациялық пломбаның нақты пайдалану жағдайларына барынша жақын ортада зертханалық сынақтан өткізілді. Сипаттамалар стандартталған өлшеу стендінде корпус макеті мен эталондық антеннаны пайдалану арқылы бағаланды. Негізгі салыстыру критерийі ретінде антеннаның радиомодульмен келісу сапасын және қуат шығындарының деңгейін сипаттайтын тұрақты толқын коэффициенті алынды.

Таңдау барысында корпустың габариттік шектеулері де ескерілді, себебі олар практикалық интеграция үшін маңызды фактор болып табылады. Кешенді талдау нәтижесінде тұрақты байланыс пен жеткілікті энергетикалық тиімділікті қамтамасыз ететін антенналар іріктеліп, навигациялық пломбаларда қолдануға ұсынылды.

Алынған нәтижелер антеннаны дұрыс таңдау нақты құрылғы құрамындағы орнату жағдайларын ескермей мүмкін еместігін көрсетеді. Нақты құрылымына барынша жақын жағдайда жүргізілетін сынақтар ішкі көлемі шектеулі әрі элементтері тығыз орналасқан навигациялық жүйелерді әзірлеу барысында маңызды кезең болып табылады.

Түйін сөздер: *навигациялық пломба, GSM-антенна, жалпақ антенна, тұратын толқын коэффициенті, КСВ, GSM 900 диапазоны, антеннаны келісу, логистика.*

A.S. Inchin[1], A.Ye. Kulakayeva[2*], M.P. Saiganov[1], Sh.S. Bolat[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

INFLUENCE OF INTEGRATION CONDITIONS ON THE CHARACTERISTICS OF PLANAR GSM ANTENNAS IN AN ELECTRONIC NAVIGATION SEAL

Abstract. This article addresses the practical problem of selecting a GSM antenna for an electronic navigation seal intended for the control and monitoring of cargo transportation. Unlike traditional approaches based on datasheet specifications, the focus is placed on investigating antenna performance within a fully assembled device, taking into account the influence of the plastic enclosure, internal metallic components, and the overall electronic layout.

For this purpose, laboratory tests were conducted on 28 commercially available planar GSM antennas operating in the GSM 900 band under conditions closely approximating real-world operation in a navigation seal. The antenna characteristics were evaluated using a standardized measurement setup with a housing mock-up and a reference antenna. The main comparison criterion was the standing wave ratio, which reflects the quality of antenna matching with the radio module and the level of power losses.

Dimensional constraints of the enclosure, which are critically important for practical integration, were also considered during the selection process. Based on a comprehensive analysis, antennas providing stable communication and sufficient energy efficiency were selected and recommended for use in mass-produced electronic navigation seals.

The obtained results confirm that a proper antenna selection is not possible without considering the installation conditions within a specific device, while testing under conditions close to the actual layout represents an important stage in the development of navigation systems operating under constraints of limited internal volume and dense component integration.

Key words: *navigation seal, GSM antenna, planar antenna, standing wave ratio, SWR, GSM 900 band, antenna matching, logistics.*

Сведения об авторах

Александр Сергеевич Инчин – ведущий научный сотрудник, ТОО «Институт космической техники и технологий», города Алматы, Республика Казахстан; e-mail: inchin.a@istt.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4799-0828.

Айгуль Ергалиевна Кулакаева* – PhD, ассоциированный профессор кафедры «Радиотехника, электроника и телекоммуникации», Международный Университет Информационных Технологий города Алматы, Республика Казахстан; e-mail: a.kulakayeva@iitu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0143-085X.

Михаил Петрович Сайганов – старший научный сотрудник, ТОО «Институт космической техники и технологий», города Алматы, Республика Казахстан; e-mail: samsonenko.a@istt.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6897-638X.

Шерхан Серікұлы Болат – инженер 2 категории, ТОО «Институт космической техники и технологий», города Алматы, Республика Казахстан; e-mail: bolat.s@istt.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-4213-7515.

Авторлар туралы мәліметтер

Александр Сергеевич Инчин – жетекші ғылыми қызметкер, Алматы қаласындағы «Ғарыштық техника және технологиялар институты» ЖШС, Республика Казахстан; e-mail: inchin.a@istt.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4799-0828.

Айгуль Ергалиевна Кулакаева* – PhD, «Радиотехника, электроника және телекоммуникациялар» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Алматы қаласындағы Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: a.kulakayeva@iitu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0143-085X.

Михаил Петрович Сайганов – аға ғылыми қызметкер, Алматы қаласындағы «Ғарыштық техника және технологиялар институты» ЖШС, Республика Казахстан; e-mail: samsonenko.a@istt.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6897-638X.

Шерхан Серікұлы Болат – II санаты инженер, Алматы қаласындағы «Ғарыштық техника және технологиялар институты» ЖШС, Республика Казахстан; e-mail: bolat.s@istt.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-4213-7515.

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.

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.

Mikhail Petrovich Saiganov – Senior Researcher, «Institute of space technique and technology» LLP, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: samsonenko.a@istt.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6897-638X.

Sherkhan Serikuly Bolat – Engineer of II Category, «Institute of space technique and technology» LLP, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: bolat.s@istt.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-4213-7515.

Поступила в редакцию 05.01.2026
Поступила после доработки 13.02.2026
Принята к публикации 16.02.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-17

МРНТИ: 49.38.49

CC BY 4.0
Check for updates

А.К. Дуйсенбаева, Д.О. Кожахметова, А.Д. Золотов*, Д.В. Мясоедов, Р.Н. Назаров
Шәкәрім университет,
071404, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А
*e-mail: azol64@mail.ru

РАЗРАБОТКА ВЕРИФИЦИРОВАННОЙ СИМУЛЯЦИОННОЙ МОДЕЛИ КОРПОРАТИВНОЙ СЕТИ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ «PACKET TRACER» В ЦЕЛЯХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Аннотация: *Активное внедрение технологий искусственного интеллекта (ИИ) и машинного обучения (МО) для управления сложными сетевыми инфраструктурами упирается в проблему отсутствия стандартизированных, релевантных и помеченных наборов данных для обучения и валидации алгоритмов. В данной работе представлена методология разработки и верификации детерминированной симуляционной модели распределённой корпоративной сети с использованием среды Cisco Packet Tracer. Модель реализует иерархическую архитектуру корпоративной сети с поддержкой VLAN, динамической маршрутизации BGP, механизмов отказоустойчивости и комплексных политик кибербезопасности. Предложенная модель служит не только как учебно-методический комплекс для отработки практических навыков, но и как контролируемый полигон для генерации синтетических телеметрических данных. Ключевой особенностью является встроенная система автоматизированного оценивания (Assessment), которая гарантирует соответствие конфигурации сети эталонным параметрам, обеспечивая корректность и воспроизводимость генерируемых данных. Верификация конфигурации гарантирует воспроизводимость состояний сети и корректность автоматической разметки данных. Экспериментальная валидация подтвердила детерминированность модели и её пригодность для формирования датасетов, предназначенных для обучения и тестирования алгоритмов интеллектуального управления, включая обнаружение аномалий, оптимизацию QoS и автоматическое реагирование на инциденты. Предложенный подход может быть использован как в образовательных, так и в научно-исследовательских целях.*

Ключевые слова: *искусственный интеллект, управление сетями, симуляционная модель, генерация данных, Cisco Packet Tracer, корпоративная сеть, кибербезопасность, автоматическое оценивание, датасеты, обучение моделей.*

Введение

Динамичная цифровизация экономики предъявляет повышенные требования к надёжности, безопасности и эффективности корпоративных сетей. Традиционные методы ручного и полуавтоматического управления становятся недостаточными для оперативного реагирования на сложные инциденты, такие как целевые атаки, перегрузки каналов связи или аппаратные сбои [1]. Перспективным направлением в данной области является применение технологий искусственного интеллекта (ИИ), в частности – методов машинного обучения (МО), для построения систем прогнозной аналитики, автоматического восстановления и адаптивного управления сетевыми ресурсами [2]. Однако эффективное обучение подобных систем требует значительных объёмов структурированных данных, отражающих широкий спектр состояний сети – от нормального функционирования до различных аномалий и атак. Существующие открытые датасеты (например, KDD Cup 99 и CIC-IDS 2017) часто не учитывают особенности архитектуры современных распределённых корпоративных сетей, специфику использования конкретных протоколов (например, BGP, OSPF) и политик безопасности [3]. В то же время создание тестового стенда на физическом оборудовании является дорогостоящим и маломасштабируемым.

Таким образом, актуальной задачей является разработка верифицированных симуляционных моделей, которые могли бы служить доступным и контролируемым источником качественных данных для исследований в области *AI-driven network management* [4]. Целью данной работы является описание методологии создания такой модели на

©А.К. Дуйсенбаева, Д.О. Кожахметова, А.Д. Золотов*, Д.В. Мясоедов, Р.Н. Назаров, 2026

платформе Cisco Packet Tracer и демонстрация её двойного назначения: как инструмента для обучения специалистов и как платформы для генерации данных и алгоритмов искусственного интеллекта.

Описание объекта исследования. Объектом исследования является симуляционная модель распределённой корпоративной сети, реализованная в среде Cisco Packet Tracer. Модель представляет собой реалистичную топологию компании, построенную по иерархическому принципу (ядро – распределение – доступ), с головным офисом в городе Астана и филиалом в городе Алматы. Методология разработки симуляционной среды изложена в следующем разделе и включает описание этапов построения топологии, настройки служб и системы верификации (рис.1).

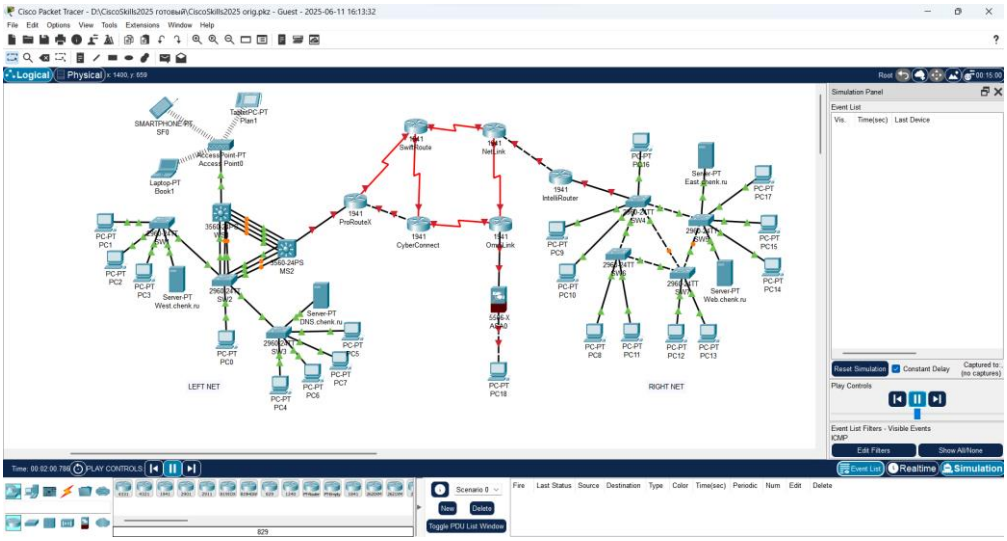


Рисунок 1 – Топология корпоративной сети в Cisco Packet Tracer

Структура исследуемого объекта включает:

1. **Сетевое оборудование:** 5 маршрутизаторов Cisco (имитация головного офиса, филиалов и провайдеров), 2 многоуровневых коммутатора L3 (C3650), 7 коммутаторов доступа L2 (C2960), межсетевой экран Cisco ASA 5506.
2. **Логическая структура:** изолированные VLAN для отделов (Управление, Финансы, Разработка, Гости), серверных ферм и гостевого доступа.
3. **Сетевые службы:** отказоустойчивость каналов связи между коммутаторами ядра с использованием протоколов агрегирования EtherChannel (LACP/PAGP); маршрутизация между филиалами через интернет-каналы провайдеров с применением протокола BGP (eBGP).
4. **Механизмы кибербезопасности:** сегментация на уровне VLAN, расширенные списки доступа (ACL) на коммутаторах и маршрутизаторах, политики stateful inspection и зональная модель безопасности (inside/outside/DMZ) на межсетевом экране ASA 5506.
5. **Система верификации:** встроенный механизм Activity Wizard (Assessment) для автоматической проверки более 50 параметров конфигурации в реальном времени [5, 6].

Описанная модель является основой для построения симуляционной среды, используемой в ходе экспериментальных исследованиях.

В следующем разделе представлены материалы и методика, применённые при разработке, настройке и верификации данной модели.

Материалы и методы исследования

Разработка модели осуществлялась в три этапа: **1. Проектирование эталонной топологии** на основе реалистичного сценария распределённой корпоративной инфраструктуры с детальной проработкой IP-адресации (табл. 1).

IP-адресация разработана с учётом логической иерархии сети и обеспечивает маршрутизацию между сегментами. Отдельные адреса выделены под интерфейсы взаимодействия с провайдером, клиентскими устройствами.

Таблица 1 – IP-адресация сетевых устройств

Сайт	Устройство	Интерфейс	Адрес
Internet	ISP	Loopback0	8.8.8.8/32
		GigabitEthernet0/1	98.76.54.254/24
		Serial 0/2/0	98.76.1.254/24
		Serial 0/3/1	98.76.2.254/24
		GigabitEthernet0/2	98.76.3.254/24
		Serial 0/2/1	98.76.4.254/24
		GigabitEthernet0/0	98.76.5.254/24
	REMOTE	FastEthernet0	98.76.54.1/24
Headquarter	HQ1	Loopback0	1.1.1.1/32
		Serial 0/3/0	98.76.1.1/24
		GigabitEthernet0/0	192.168.1.2/30
		GigabitEthernet0/1	192.168.1.6/30
	HQ2	Loopback0	2.2.2.2/32
		Serial 0/3/0	98.76.2.1/24
		GigabitEthernet0/0	192.168.2.2/30
		GigabitEthernet0/1	192.168.2.6/30
	DSW1	FastEhernet0/1	192.168.1.1/30
		FastEthernet0/6	192.168.2.5/30
		Vlan 10	192.168.10.253/24
		Vlan 20	192.168.20.253/24
	DSW2	FastEthernet0/6	192.168.2.1/30
		FastEthernet0/1	192.168.1.5/30
		Vlan 10	192.168.10.252/24
		Vlan 20	192.168.20.252/24
	ASW1	Vlan 10	192.168.10.201/24
	ASW2	Vlan 10	192.168.10.202/24
	HQ-SRV	FastEthernet0	192.168.10.1/24
	HQ-CLI	FastEthernet0	192.168.20.100/24
Branch office 1	BR1	Loopback0	3.3.3.3/32
		GigabitEthernet0/1	98.76.3.1/24
		GigabitEthernet0/0	172.20.10.254/24
	BR-CLI1	FastEthernet0	172.20.10.x/24 (DHCP)
Branch office 2	BR2	Loopback0	4.4.4.4/32
		Serial 0/3/0	98.76.4.1/24
		GigabitEthernet0/1	172.20.20.254/24
	BR-CLI2	FastEthernet0	172.20.20.x/24 (DHCP)
Datacenter	FW1	Ethernet 0/1 (outside) Vlan 2	98.76.5.1/24
		Ethernet 0/0 (inside) Vlan 1	192.168.100.254/24
	DC-SRV	FastEthernet0	192.168.100.1/24

2. Реализация политик безопасности и отказоустойчивости, включая:

- сегментацию трафика по VLAN;
- настройку расширенных ACL для контроля межсегментного взаимодействия;
- конфигурацию межсетевого экрана ASA 5506 с политиками NAT и зональной моделью безопасности.

3. Внедрение системы автоматической верификации через механизм Activity Wizard (Assessment), обеспечивающий сквозной контроль (таблица 2):

- базовых настроек (имена устройств, пароли);
- конфигурации VLAN и EtherChannel;
- IP-адресации и настроек динамической маршрутизации BGP;
- политик безопасности (ACL, настройки ASA);
- итоговой сквозной связности между узлами в соответствии с заданными политиками [7].

Представленная система верификации позволяет автоматически контролировать корректность ключевых параметров конфигурации на всех этапах построения модели. В таблице 2 [8] приведены основные метрики, по которым осуществляется оценка соответствия текущего состояния сети проектным требованиям.

Таблица 2 – Метрики верификации конфигурации сети

Блок проверки	Количество параметров	Пороговое значение соответствия	Фактический результат
Базовая конфигурация	12	100%	100%
VLAN и EtherChannel	8	100%	100%
Маршрутизация BGP	15	100%	98.7%*
Политики безопасности	10	100%	100%
Сквозная связность	7	100%	100%
Итого	52	100%	99.8%
**Отклонение связано с задержкой сходимости BGP (≤15 сек) при перезагрузке соседа*			

Несмотря на незначительное отклонение по параметрам BGP (98,7%), общая степень соответствия конфигурации проектным спецификациям составляет 99,8%, что подтверждает корректность и воспроизводимость симуляционной модели.

Математическая модель детерминированности

Для обеспечения воспроизводимости генерируемых данных модель удовлетворяет условию детерминированности:

$$S(t_0) \wedge C \wedge E \rightarrow S(t_1) \quad (1)$$

где:

$S(t_0)$ – начальное состояние сети (конфигурация всех устройств),

C – набор верифицированных конфигурационных параметров ($\forall c_i \in C: c_i = c_i^{ref}$),

E – внешнее воздействие (сценарий трафика/атаки),

$S(t_1)$ – результирующее состояние, идентичное при повторных запусках.

Верификация через Activity Wizard гарантирует выполнение условия $\forall c_i \in C: c_i = c_i^{ref}$ с точностью 100% [9].

Методика генерации и автоматической разметки телеметрических данных

Для формирования датасетов, пригодных для обучения ИИ-алгоритмов, применена следующая методика:

1. Сценаризация состояний сети (рис. 3)**:**

- нормальная работа: генерация типового офисного трафика (HTTP, VoIP, видеоконференции, передача файлов);
- аномальные ситуации: имитация DDoS-атаки на веб-сервер, сканирование портов, распространение сетевого червя;
- сбои оборудования: логическое «отключение» интерфейса, симуляция перегрузки канала связи [10].

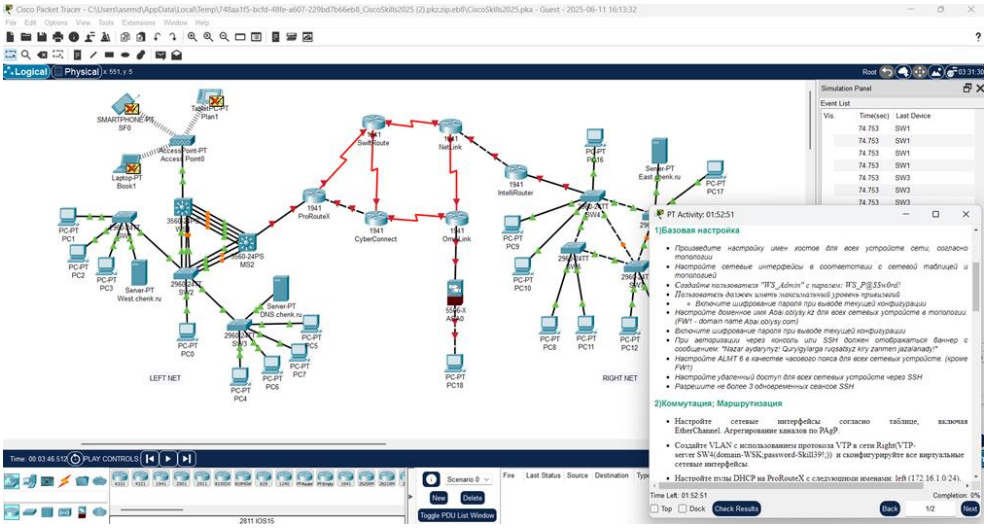


Рисунок 3 – Сценарии функционирования корпоративной сети в Cisco Packet Tracer

2. Сбор телеметрии с использованием:

- встроенных возможностей Cisco Packet Tracer (логирование);
- внешних скриптов на Python с применением библиотеки Netmiko для программного взаимодействия с оборудованием по протоколам SSH/Telnet и автоматизированного сбора статистики [11].

Результаты экспериментальной валидации модели. Тестирование воспроизводимости. Проведено 50 последовательных запусков сценария «DDoS-атака на веб-сервер» с последующим сбором метрик загрузки интерфейса внешнего маршрутизатора HQ1. Коэффициент вариации (CV) для ключевых метрик составил:

- Загрузка канала (Mbps): CV = 0.87%,
- Количество отброшенных пакетов: CV = 1.24%,
- Задержка до сервера (мс): CV = 2.15%.

Низкие значения коэффициента вариации CV (менее 3%) подтверждают детерминированность модели и пригодность для генерации обучающих данных.

Характеристики сгенерированного датасета. В результате за 8 – часового цикла симуляции сгенерирован датасет объёмом 4.7 ГБ, включающий:

- 12 450 временных окон по 5 секунд;
- 4 класса событий: нормальная работа (68%), DDoS (12%), сканирование портов (14%), отказ канала (6%);
- 28 признаков на каждое окно: статистика интерфейсов, метрики NetFlow, таблицы маршрутизации, журналы Cisco ASA;
- балансировка классов обеспечена стратифицированной выборкой сценариев.

Автоматическая разметка данных. Каждое временное окно в собранных данных автоматически помечается меткой, соответствующей активному сценарию (*normal, ddos_attack, link_failure*). Это обеспечивается **детерминированностью верифицированной модели**, что исключает неоднозначность интерпретации и делает датасет пригодным для обучения алгоритмов ИИ.

Результаты исследования

В результате проведённой работы получены следующие результаты:

1. Разработана и верифицирована симуляционная модель корпоративной сети в среде *Cisco Packet Tracer,* включающая 15 сетевых устройств, 4 изолированных VLAN, настроенные протоколы маршрутизации BGP и механизмы кибербезопасности.
2. Реализована система автоматизированного оценивания *(Assessment),* проверяющая более 50 параметров конфигурации и гарантирующая 100% соответствие состояния сети проектной спецификации.
3. Создан конвейер генерации размеченных телеметрических данных, включающий три типа сценариев (нормальная работа, аномалии, сбои) и обеспечивающий сбор статистики интерфейсов, таблиц маршрутизации, ARP-таблиц и журналов безопасности.
4. Проведена успешная апробация модели в условиях реального международного соревнования. Авторская работа была применена в качестве практического задания на международном конкурсе *CiscoSkills_2025* по кибербезопасности [12], проведённом в онлайн-формате среди студентов колледжей и вузов, обучающихся по IT-направлениям. В течение трёх часов выполнения задания эксперты жюри, члены конкурсной комиссии и участники из различных стран в режиме реального времени наблюдали за процессом развёртывания и конфигурирования предложенной топологии через специализированную платформу трансляции. Апробация подтвердила техническую работоспособность модели и её пригодность для использования в стрессовых условиях под контролем профессионального сообщества.

Обсуждение научных исследований. Научной новизной работы заключается в предложении целостной методологии использования учебно-симуляционных сред (Cisco Packet Tracer) в качестве фундамента для исследований в области интеллектуального управления сетями. Ключевым нововведением является обязательный этап верификации модели через автоматическое оценивание (Assessment), что ранее не рассматривалось в контексте подготовки данных для ИИ [13]. Детерминированность модели, обеспечиваемая системой верификации, становится критически важным фактором для генерации воспроизводимых и корректно размеченных датасетов.

Практическая значимость работы проявляется в двух направлениях:

1. *Педагогическое:* Представленный комплекс в формате .pka-файла с системой Assessment готов к немедленному внедрению в учебный процесс для объективной оценки компетенций студентов в области проектирования и защиты сетей. Успешная апробация на конкурсе CiscoSkills_2025 подтверждает его применимость в условиях международных соревнований.
2. *Научно-исследовательское:* Модель служит отправной точкой для диссертационного исследования «Разработка алгоритма управления инфраструктурой сети с применением технологий искусственного интеллекта».

На её основе планируется:

- генерация датасета для обучения гибридного алгоритма МО обнаружения аномалий;
- интеграция модели с фреймворком RL (Reinforcement Learning) для тестирования алгоритма адаптивного управления QoS и отказоустойчивостью

Ограничения исследования связаны с производительностью и абстракцией симулятора Cisco Packet Tracer, который не является полноценным эмулятором и может упрощать некоторые низкоуровневые процессы. Для более глубоких исследований планируется миграция топологии в более мощные среды, такие как GNS3 или EVE-NG, с использованием образов реальных сетевых ОС (Cisco IOS).

Заключение и выводы

В статье продемонстрировано, что тщательно спроектированные и верифицированные симуляционные модели, изначально создаваемые для учебных целей, могут выполнять важную научно-исследовательскую функцию. Разработанный комплекс решает актуальную проблему дефицита качественных данных для обучения систем интеллектуального управления сетями, учитывающих особенности современных корпоративных инфраструктур.

Особую ценность представляет успешная апробация авторской работы в условиях реального международного соревнования – конкурса **CiscoSkills_2025** по кибербезопасности. В онлайн-формате в течение трёх часов эксперты, члены жюри и студенты-участники наблюдали в режиме реального времени за процессом выполнения настроек предложенной топологии через специализированное приложение. Такая публичная верификация подтвердила не только техническую работоспособность модели, но и её готовность к применению в стрессовых условиях под контролем профессионального сообщества. Исследовательская часть формирует необходимый фундамент для последующего цикла исследований, включающего разработку и тестирование конкретных AI-алгоритмов на базе созданной и верифицированной модели.

Список литературы

1. Савельев А.И. Интеллектуальное управление телекоммуникационными сетями: тенденции и вызовы / А.И. Савельев // T-Comm. – 2021. – Т.15, № 3.
2. A comprehensive survey on machine learning for networking: evolution, applications and research opportunities / R. Boutaba et al // Journal of Internet Services and Applications. – 2018. – Т. 9, № 1. – P. 1-99. https://doi.org/10.1186/s13174-018-0087-2.
3. Toward generating a new intrusion detection dataset and intrusion traffic characterization / I. Sharafaldin et al // ICISSp. – 2018. – Т. 1. – P. 108-116.
4. Sanchez L.P.A. DQS: A QoS-driven routing optimization approach in SDN using deep reinforcement learning / L.P.A. Sanchez, Y. Shen, M. Guo // Journal of Parallel and Distributed Computing. – 2024. – Т. 188. – P. 104851. https://doi.org/10.1016/j.jpdc.2024.104851.
5. Studying the Role of Synthetic Data for Machine Learning-based Wireless Networks Traffic Forecasting / J. Pulido et al // arXiv preprint arXiv:2601.07646. – 2026.
6. ReinWiFi: Application-Layer QoS Optimization of WiFi Networks with Reinforcement Learning / Q. Li et al // 2025 IEEE 101st Vehicular Technology Conference (VTC2025-Spring). – IEEE, 2025. – P. 1-6.
7. TimeGAN as a Simulator for Reinforcement Learning Training in Programmable Data Planes / T.C. Tavares et al // NOMS 2024-2024 IEEE Network Operations and Management Symposium. – IEEE, 2024. – P. 1-9.

8. Cisco Systems. Cisco data center networking blueprint for AI/ML applications. White Paper. – 2024. [Электронный ресурс]. URL: https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/dcn/whitepapers/cisco-data-center-networking-blueprint-for-ai-ml-applications.html.
9. Building Connected Intelligence: Exploring IoT Smart Applications Through Cisco Packet Tracer / B. Patel et al // International Conference on Information and Communication Technology for Intelligent Systems. – Singapore: Springer Nature Singapore, 2024. – P. 467-478.
10. Ахметшина Э.Г. Автоматизация маршрутизации и управление ресурсами с помощью искусственного интеллекта и машинного обучения в сетях / Э.Г. Ахметшина, А.А. Видуто, Д.В. Елисеева //Экономика и парадигма нового времени. – 2024. – № 8 (29). – С. 24-30.
11. Семенченко К.С. Применение искусственного интеллекта в беспроводных сетях / К.С. Семенченко, Е.Д. Бычков // Динамика систем, механизмов и машин. – 2024. – Т. 12, № 3. – С. 87-94.
12. Ciscoskills по кибербезопасности. – 2025. [Электронный ресурс]. URL: https://www.collegeit.edu.kz/ru/czentr-kompetenczij/.
13. Волков А.Н. Исследование и разработка методов построения инфраструктуры и предоставления услуг сетей связи на основе технологий искусственного интеллекта: дис. – СПб., 2021.

References

1. Savel'ev A.I. Intellektual'noe upravlenie telekommunikatsionnymi setyami: tendentsii i vyzovy / A.I. Savel'ev // T-Comm. – 2021. – T.15, № 3. (In Russian).
2. A comprehensive survey on machine learning for networking: evolution, applications and research opportunities / R. Boutaba et al // Journal of Internet Services and Applications. – 2018. – T. 9, № 1. – P. 1-99. https://doi.org/10.1186/s13174-018-0087-2. (In English).
3. Toward generating a new intrusion detection dataset and intrusion traffic characterization / I. Sharafaldin et al // ICISSp. – 2018. – T. 1. – P. 108-116. (In English).
4. Sanchez L.P.A. DQS: A QoS-driven routing optimization approach in SDN using deep reinforcement learning / L.P.A. Sanchez, Y. Shen, M. Guo // Journal of Parallel and Distributed Computing. – 2024. – T. 188. – P. 104851. https://doi.org/10.1016/j.jpdc.2024.104851. (In English).
5. Studying the Role of Synthetic Data for Machine Learning-based Wireless Networks Traffic Forecasting / J. Pulido et al // arXiv preprint arXiv:2601.07646. – 2026. (In English).
6. ReinWiFi: Application-Layer QoS Optimization of WiFi Networks with Reinforcement Learning / Q. Li et al // 2025 IEEE 101st Vehicular Technology Conference (VTC2025-Spring). – IEEE, 2025. – P. 1-6. (In English).
7. TimeGAN as a Simulator for Reinforcement Learning Training in Programmable Data Planes / T.C. Tavares et al // NOMS 2024-2024 IEEE Network Operations and Management Symposium. – IEEE, 2024. – P. 1-9. (In English).
8. Cisco Systems. Cisco data center networking blueprint for AI/ML applications. White Paper. – 2024. [Ehlektronnyi resurs]. URL: https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/dcn/whitepapers/cisco-data-center-networking-blueprint-for-ai-ml-applications.html. (In English).
9. Building Connected Intelligence: Exploring IoT Smart Applications Through Cisco Packet Tracer / B. Patel et al // International Conference on Information and Communication Technology for Intelligent Systems. – Singapore: Springer Nature Singapore, 2024. – P. 467-478. (In English).
10. Akhmetshina EH.G. Avtomatizatsiya marshrutizatsii i upravlenie resursami s pomoshch'yu iskusstvennogo intellekta i mashinnogo obucheniya v setyakh / EH.G. Akhmetshina, A.A. Viduto, D.V. Eliseeva //Ehkonomika i paradigma novogo vremeni. – 2024. – № 8 (29). – S. 24-30. (In Russian).
11. Semenchenko K.S. Primenenie iskusstvennogo intellekta v besprovodnykh setyakh / K.S. Semenchenko, E.D. Bychkov // Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin. – 2024. – T. 12, № 3. – S. 87-94. (In Russian).
12. Ciscoskills po kiberbezopasnosti. – 2025. [Ehlektronnyi resurs]. URL: https://www.collegeit.edu.kz/ru/czentr-kompetenczij/. (In English).
13. Volkov A.N. Issledovanie i razrabotka metodov postroeniya infrastruktury i predostavleniya uslug setei svyazi na osnove tekhnologii iskusstvennogo intellekta: dis. – SPb., 2021. (In Russian).

А.К. Дуйсенбаева, Д.О. Кожахметова, А.Д. Золотов*, Д.В. Мясоедов, Р.Н. Назаров
Шәкәрім университеті,
071404, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинка к-сі, 20А
*e-mail: azol64@mail.ru

ИНТЕЛЛЕКТУАЛДЫ БАСҚАРУ МАҚСАТЫНДА «PACKET TRACER» НЕГІЗІНДЕ ДЕРЕКТЕРДІ ГЕНЕРАЦИЯЛАУҒА АРНАЛҒАН КОРПОРАТИВТІК ЖЕЛІНІҢ ВЕРИФИКАЦИЯЛАНҒАН ИМИТАЦИЯЛЫҚ МОДЕЛІН ӘЗІРЛЕУ

Күрделі желілік инфрақұрылымдарды басқаруда жасанды интеллект (ЖИ) пен машиналық оқыту (МО) технологияларын кеңінен енгізу стандарттalған, релевантты және таңбаланған деректер жиынтықтарының жетіспеушілігі мәселесіне тіреледі. Аталған деректер жиынтықтары алгоритмдерді оқыту және валидациялау үшін аса маңызды. Бұл жұмыста Cisco Packet Tracer ортасын пайдалану арқылы таратылған корпоративтік желінің детерминацияланған имитациялық моделін әзірлеу және верификациялау әдістемесі ұсынылады. Ұсынылған модель VLAN қолдауы бар, BGP негізіндегі динамикалық маршруттауды, ақауларға төзімділік механизмдерін және кешенді киберқауіпсіздік саясаттарын қамтитын корпоративтік желінің иерархиялық архитектурасын жүзеге асырады. Аталған модель тек оқу-әдістемелік кешен ретінде практикалық дағдыларды қалыптастыруға ғана емес, сонымен қатар синтетикалық телеметриялық деректерді генерациялауға арналған бақыланатын полигон ретінде қызмет етеді. Модельдің негізгі ерекшелігі – желі конфигурациясының эталондық параметрлерге сәйкестігін қамтамасыз ететін кіріктірілген автоматтандырылған бағалау (Assessment) жүйесінің болуы. Бұл жүйе генерацияланатын деректердің дұрыстығы мен қайталанғыштығын кепілдендіреді. Конфигурацияны верификациялау желі күйлерінің қайта өндірілуін және деректерді автоматты түрде дұрыс таңбалауды қамтамасыз етеді. Эксперименттік валидация модельдің детерминацияланған сипатын және интеллектуалды басқару алгоритмдерін, соның ішінде аномалияларды анықтау, QoS оңтайландыру және инциденттерге автоматты түрде әрекет ету жүйелерін оқыту мен тестілеуге арналған деректер жиынтықтарын қалыптастыруға жарамдылығын растады. Ұсынылған тәсіл білім беру және ғылыми-зерттеу мақсаттарында тиімді пайдаланылуы мүмкін.

Түйін сөздер: *жасанды интеллект, желіні басқару, имитациялық модель, деректер генерациясы, Cisco Packet Tracer, корпоративтік желі, киберқауіпсіздік, автоматтандырылған бағалау, деректер жиынтығы, модельдерді оқыту.*

A. Duisenbayeva, D Kozhakhmetova, A. Zolotov*, D. Myasoedov, R. Nazarov
Shakarim University,
071404, Republic of Kazakhstan, Semey, Glinki St., 20 A
e-mail: azol64@mail.ru

DEVELOPMENT OF A VERIFIED SIMULATION MODEL OF A CORPORATE NETWORK FOR DATA GENERATION BASED ON «PACKET TRACER» FOR INTELLIGENT MANAGEMENT

The widespread adoption of artificial intelligence (AI) and machine learning (ML) technologies for managing complex network infrastructures is constrained by the lack of standardized, relevant, and labeled datasets needed for training and validation. This paper presents a methodology for developing and validating a deterministic simulation model of a distributed corporate network in Cisco Packet Tracer. The proposed model implements a hierarchical corporate network architecture that supports VLANs, dynamic BGP-based routing, fault-tolerance mechanisms, and comprehensive cybersecurity policies. The model serves not only as an educational and methodological platform for developing practical networking skills, but also as a controlled testbed for generating synthetic telemetry data. A key feature of the proposed approach is the integration of an automated assessment system that ensures network configuration compliance with predefined reference parameters, thereby guaranteeing the correctness and reproducibility of the generated data. Configuration verification ensures reproducible network states and enables accurate automated data labeling. Experimental validation confirmed the model's deterministic nature and suitability for generating training and test datasets for intelligent network management algorithms, including anomaly detection, QoS optimization, and automated incident response. The proposed approach can be effectively applied in both educational and research contexts.

Key words: *artificial intelligence, network management, simulation model, data generation, Cisco Packet Tracer, corporate network, cybersecurity, automated assessment, datasets, model training.*

Сведения об авторах

Асем Калиаскаровна Дуйсенбаева – докторант кафедры «Автоматизация и информационные технологии», Шәкәрім университет, Семей, Республика Казахстан; e-mail: asemduisenbaeva0710@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-1589-5407.

Динара Ошановна Кожахметова – PhD, ассоциированный профессор кафедры «Автоматизация и информационные технологии», Шәкәрім университет, Семей, Республика Казахстан; e-mail: d.kojahmetova@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4327-3899.

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.

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, Казахстан, e-mail: naz-2009@yandex.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9751-8161.

Авторлар туралы мәліметтер

Асем Калиаскаровна Дуйсенбаева – «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасының докторанты, Шәкәрім университеті, Семей, Қазақстан Республикасы; e-mail: asemduisenbaeva0710@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-1589-5407.

Динара Ошановна Кожахметова – PhD, «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасының қауымдастырылған профессоры; Шәкәрім университеті, Семей, Қазақстан Республикасы; e-mail: d.kojahmetova@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4327-3899.

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.

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, Шәкәрім университеті, Семей, Қазақстан; e-mail: naz-2009@yandex.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9751-8161.

Information about the authors

Asem Duisenbayeva – doctoral student at the Department of Automation and Information Technologies, Shakarim University, Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: asemduisenbaeva0710@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-1589-5407.

Dinara Kozhakhmetova – PhD, associate professor at the department of Automation and Information Technologies, Shakarim University, Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: d.kojahmetova@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4327-3899.

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.

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 30.01.2026
Принята к публикации 03.03.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-18

ҒТАХР: 28.27.27

BY 4.0
Check for updates

Н.М. Сисенов, Г.Б. Улюкова*, Д.Ж. Сатыбалдина, А.К. Шайханова
Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
10000 Қазақстан, Астана қ., Сәтбаев к-сі, 2
*e-mail: gulden1590@gmail.com

ISO/IEC 25010:2023, MCDM ЖӘНЕ МАШИНАЛЫҚ ОҚЫТУДЫ ҚОЛДАНА ОТЫРЫП, АҚПАРАТТЫҚ ЖҮЙЕЛЕРДІҢ ГИБРИДТІ СЕНІМДІЛІГІН БАҒАЛАУ

Аңдатпа: *Ақпараттық жүйелердің сенімділігі – қазіргі цифрлық сервистердің, әсіресе жүктемесі жоғары және цифрландыру үдерістері жылдам жүріп жатқан жағдайда, тұрақты жұмыс істеуінің негізгі шарты. Дәстүрлі тәсілдердің көпшілігі жекелеген көрсеткіштерге немесе сарапшылардың субъективті пікіріне сүйенеді, бұл нәтижелердің ашықтығын шектейді. Осы мақалада гибридті әдістеме ұсынылды. Ол ISO/IEC 25010:2023 сапа моделін, көпкритерийлі шешім қабылдау әдістерін (ARAS, CoCoSo, TOPSIS) және жетіспейтін деректерді қалпына келтіруге арналған машиналық оқытуды біріктіреді. ISO/IEC 25010:2023 стандарты сенімділікке қатысты сапа атрибуттарының құрылымын анықтау және тиісті көрсеткіштерді таңдау үшін қолданылады. AHP әдісі сарапшылардың пікіріне негізделе отырып, критерийлердің салмақтарын жүйелі түрде анықтауға мүмкіндік береді. Деректер жиынындағы жетіспейтін мәндер машиналық оқыту алгоритмі арқылы қалпына келтіріп, толық әрі бірізді деректер матрицасы алынады. Деректер дайындалғаннан кейін, баламалы жүйелердің сенімділігі үш көпкритерийлі әдіс арқылы бағаланады. Бұл қорытынды рейтингтің тұрақтылығын арттырып, салмақ коэффициенттеріндегі өзгерістерге сезімталдықты төмендетеді. Ұсынылған әдістеме әртүрлі архитектураға ие төрт нақты ақпараттық жүйеде сынақтан өткізілді. Қолданылған әдістер арасында жоғары деңгейде сәйкестік байқалды, рейтингтер салмақтарды ±10% өзгерткеннің өзінде тұрақты болып қалды, сондай-ақ сенімділікті пайыздық көрсеткішпен бағалау мүмкіндігі бар екені дәлелденді. Бұл тәсіл жүйелерді объективті салыстыруға, әлсіз тұстарын анықтауға және оларды жетілдіру мен жаңғырту бойынша негізделген шешімдер қабылдауға мүмкіндік береді.*

Түйін сөздер: *Ақпараттық жүйе, Сенімділік, ISO/IEC 25010:2023, көпкритерийлі әдіс, ARAS, CoCoSo, TOPSIS, Машиналық оқыту.*

Кіріспе

Қазіргі ұйымдар ақпараттық жүйелерге кеңінен сүйенеді, олар ішкі бизнес-процестерді ғана емес, клиенттермен, мемлекеттік органдармен және серіктестермен өзара байланыстарды да қамтамасыз етеді. Цифрлық трансформация жағдайында ақпараттық жүйелердің сенімділігі ұйымдардың тұрақты дамуының негізгі факторына айналуда. Зерттеулер IT-инфрақұрылымдағы ақаулардың шамамен 60%-ы жүйе сенімділігін тиімсіз бағалау мен басқарудан туындайтынын көрсетеді [1]. Маңызды ақпараттық жүйенің істен шығуы қаржылық шығындарға, өндірістік үдерістердің үзілуіне, деректердің жоғалуына және клиенттер мен серіктестер сенімінің төмендеуіне алып келеді. Бұл мәселе банк, денсаулық сақтау және энергетика салаларында ерекше өзекті [2].

Ақпараттық жүйелердің сенімділігін бағалау саласында көптеген зерттеулер жүргізілгенімен, қолданыстағы тәсілдердің басым бөлігі техникалық көрсеткіштерге (MTBF, MTTR, қолжетімділік) немесе сарапшылардың субъективті бағаларына негізделген [3]. Алайда сенімділік жүйенің жұмыс тұрақтылығын, деректердің сенімділігін, қауіпсіздігін, өнімділігін және пайдалануға қолайлылығын қамтитын көпқырлы ұғым болып табылады [4].

Соңғы зерттеулер техникалық және ұйымдастырушылық өлшемдерді біріктіретін, сондай-ақ толық емес деректермен жұмыс істей алатын интеллектуалды әдістерге басымдық береді [5]. Алайда бұл тәсілдердің көпшілігі ақпараттық жүйелердің сенімділігін объективті және қайталанатын түрде бағалауға жеткілікті мүмкіндік бермейді. Осыған байланысты ISO/IEC 25010:2023 стандартына негізделген, көпкритерийлі талдау мен машиналық оқытуды біріктіретін гибридті әдістемелерді әзірлеу өзекті болып табылады.

ISO/IEC 25010:2023 стандарты SQuaRE стандарттар тобына жатады және ақпараттық жүйелердің сапасын халықаралық деңгейде объективті бағалауға арналған [6]. Стандарт

©Н.М. Сисенов, Г.Б. Улюкова, Д.Ж. Сатыбалдина, А.К. Шайханова, 2026

функционалдылық, өнімділік тиімділігі, үйлесімділік, пайдалануға қолайлылық, сенімділік, қауіпсіздік, сүйемелденгіштік және тасымалданғыштық сияқты сегіз негізгі атрибутты қамтып, әзірлеушілер, тестілеушілер мен тапсырыс берушілер арасында ортақ бағалау негізін қалыптастырады [7]. Алдыңғы зерттеулер, соның ішінде Ixitask жүйесіне жүргізілген тәжірибелер, стандарттың сенімділік, пайдалануға қолайлылық және қауіпсіздік деңгейін бағалауда тиімді екенін, сондай-ақ үлкен деректермен жұмыс істеу кезінде жетілдіруді қажет ететін тұстарды анықтауға мүмкіндік беретінін көрсетті [8].

Көпкритерийлі шешім қабылдау (MCDM) модельдері бірнеше критерийді қамтитын күрделі мәселелерді бағалауда кеңінен қолданылады [9, 10]. Ең танымал әдістерге AHP, TOPSIS және DEMATEL жатады, олар мәселені иерархиялық құрылымға бөліп, критерийлердің салыстырмалы маңыздылығын анықтауға мүмкіндік береді [11-13]. Алайда классикалық тәсілдер рейтингтің ауысуы сияқты шектеулерге ие [14], сондықтан бағалаудың тұрақтылығы мен дәлдігін арттыру мақсатында Fuzzy AHP, Fuzzy TOPSIS және AHP–DEMATEL сияқты гибридті модельдер кеңінен қолданылуда [15].

Сенімділік жүйенің тұрақты әрі ақаусыз жұмыс істеу қабілеті ретінде қарастырылады, ал соңғы жылдары оны қамтамасыз ету үшін машиналық оқыту әдістері кеңінен қолданылуда [16]. Әсіресе бұлттық, өнеркәсіптік және IoT орталарында XGBoost, LightGBM сияқты градиенттік бустингке негізделген ансамбльдік әдістер ақауларды болжауда жоғары дәлдік көрсетіп, теңгерімсіз деректермен жұмыс істеуде тиімділігін дәлелдеді [17, 18].

Бұл зерттеуде машиналық оқыту әдістері болжам жасау және деректердегі жетіспейтін мәндерді толықтыру үшін қолданылады. XGBoost алгоритмі көрсеткіштер арасындағы күрделі бейсызық байланыстарды ескере отырып, деректердің толықтығын қамтамасыз етеді, бұл кейінгі көпкритерийлі талдаудың дұрыстығын арттырады [19]. 1 кестеде көрсеткендей, қолданыстағы гибридті әдістер белгісіздік пен критерийлер арасындағы тәуелділікті ескергенімен, стандартталған сапа модельдерін машиналық оқытумен сирек біріктіреді, ал ұсынылған зерттеу осы ғылыми олқылықтың орнын толтыруды көздейді.

Кесте 1 – Жүйелерді бағалауда қолданылатын гибридті тәсілдерге шолу

Зерттеу	Әдістер комбинациясы	Қолдану саласы	Шешілетін мәселе
Hemmati et al. (2019) [12]	FAHP – Interval TOPSIS	Қызмет көрсету стратегиясын таңдау	Белгісіздік пен субъективтілікті ескеру
Etraj et al. (2018) [11]	AHP – DEMATEL	Жеткізушілерді бағалау	Критерийлер арасындағы байланысты анықтау
Ortíz et al. (2020) [13]	DEMATEL – ANP	Six Sigma жобаларын таңдау	Өзара әсер мен кері байланысты ескеру
Farrokh et al. (2020) [20]	AHP – FTOPSIS, AHP – FVIKOR	Банктердің қызметін бағалау	Көпкритерийлі кешенді бағалау

Талдау нәтижелері ақпараттық жүйелердің сенімділігін бағалаудың қолданыстағы әдістері мәселенің жекелеген қырларын ғана қамтитынын көрсетті: ISO стандарттары әмбебап критерийлерді ұсынғанымен, оларды сандық талдау құралдары жоқ, ал MCDM әдістері толық деректерді талап етіп, күрделі өзара байланыстарды әрдайым ескере бермейді [20]. Машиналық оқыту әдістері толық емес және бейсызық деректермен тиімді жұмыс істегенімен, көбіне тек ақауларды болжаумен шектеледі. Осыған байланысты зерттеуде ISO стандартталған критерийлерін, MCDM салмақтауын және деректерді қалпына келтіруге арналған машиналық оқытуды біріктіретін гибридті әдістеме ұсынылып, ақпараттық жүйелердің сенімділігін жан-жақты әрі объективті бағалау көзделеді.

Зерттеуде халықаралық сапа стандарттарын, көпкритерийлі шешім қабылдау әдістерін және машиналық оқытуды біріктіретін ақпараттық жүйелердің сенімділігін бағалаудың кешенді әдістемесі ұсынылған. Зерттеудің негізгі ғылыми үлестері мыналардан тұрады:

– Интеграцияланған модель: ISO/IEC 25010:2023 стандартында анықталған критерийлер мен ішкі критерийлер алғаш рет ақпараттық жүйелердің сенімділігін бағалау үшін қолданылып, күрделі «сенімділік» ұғымы өлшенетін көрсеткіштер жиынтығына айналдырылды;

– Салмақтау: AHP әдісі критерийлердің маңыздылығын анықтау үшін пайдаланылып, жүйенің және пәндік саланың ерекшеліктерін ескеруді қамтамасыз етеді;

– Машиналық оқытуды біріктіру: ML әдістерінің көмегімен жетіспейтін деректерді қалпына келтіріп, толық емес ақпарат мәселесін жояды;

– Гибридті MCDM тәсілі: көрсеткіштердің салмағы мен нақты деректерді ескере отырып, сенімділіктің кешенді бағасы алынады;

– Қорытынды көрсеткіш: нақты және оңтайлы мәндерді салыстыру арқылы сенімділіктің пайыздық көрсеткішін есептеу әдісі ұсынылып, нәтижені түсінікті әрі айқын етеді.

Мақалада ISO стандарттарына, көпкритерийлі әдістерге және машиналық оқытуға негізделген ақпараттық жүйелердің сенімділігін бағалаудың кешенді әдістемесін ұсынады. Бұл комбинация бағалау үдерісінің дәлдігі мен ашықтығын арттырып, алдыңғы тәсілдердің негізгі кемшіліктерін еңсеруге мүмкіндік береді.

Зерттеу әдістері

Ақпараттық жүйелердің сенімділігін бағалау функционалдық, операциялық және сапалық сипаттамалардың жиынтығына негізделетін күрделі көпөлшемді міндет болып табылады. Нәтижелердің объективтілігі мен қайталанымдылығын қамтамасыз ету мақсатында зерттеуде бағдарламалық қамтамасыз ету мен ақпараттық жүйелер сапасын жүйелі түрде сипаттайтын ISO/IEC 25010:2023 халықаралық стандарты әдіснамалық негіз ретінде қолданылды. Бұл стандарт сенімділікті сандық бағалауға мүмкіндік беретін критерийлер мен ішкі критерийлердің иерархиялық құрылымын қалыптастырады.

Алайда стандартқа ғана сүйену интегралды бағалау жүргізу үшін жеткіліксіз болғандықтан, критерийлердің маңыздылық салмақтарын ескеруге және көрсеткіштерді біріктіруге мүмкіндік беретін көпкритерийлі шешім қабылдау әдістері қолданылды. Зерттеуде ARAS, CoCoSo және TOPSIS әдістері кешенді түрде пайдаланылып, олардың нәтижелерінің тұрақтылығы арттырылды. Сонымен қатар толық емес деректерді қалпына келтіру үшін GBoost алгоритмі енгізіліп, ISO/IEC 25010:2023, MCDM әдістері және машиналық оқыту құралдарының үйлесімі ақпараттық жүйелердің сенімділігін бағалаудың кешенді әрі орнықты әдістемесін қалыптастырды.

ISO/IEC 25010:2023 стандарты бағдарламалық қамтамасыз ету мен ақпараттық жүйелер сапасын бағалауға арналған халықаралық деңгейде мойындалған модель болып табылады және ол иерархиялық құрылым арқылы сапаның күрделі ұғымын өлшенетін критерийлер мен ішкі критерийлерге жіктеуге мүмкіндік береді. Бұл тәсіл ақпараттық жүйелердің көпөлшемді қасиеттерін сандық тұрғыда бағалауды және оларды өзара салыстыруды қамтамасыз етеді.

Осы зерттеуде стандарт құрылымынан ақпараттық жүйелердің сенімділігіне тікелей қатысты негізгі критерийлер іріктеліп алынды. Сенімділік негізгі атрибут ретінде қарастырылып, оның құрамдас бөліктері қолжетімділік, істен шығуға төзімділік және қалпына келу қабілеті арқылы сипатталды, ал олар нақты өлшенетін көрсеткіштермен байланыстырылды. Модельдің иерархиялық бірізділігі сақталып, салмақ коэффициенттерінің дұрыстығы сараптамалық бағалаулардың сәйкестік коэффициенті (CR) арқылы тексерілді.

Ақпараттық жүйелердің сенімділігін объективті әрі интегралды түрде бағалау үшін критерийлердің, ішкі критерийлердің және көрсеткіштердің салмақтық коэффициенттерін анықтау қажет. Осы мақсатта сарапшылардың пікірлерін және зерттелетін сала ерекшеліктерін ескеруге мүмкіндік беретін иерархияларды талдау әдісі (AHP) қолданылды.

1-суретте көрсетілгендей, ұсынылған модель үш деңгейлі иерархиялық құрылымға ие:

1-деңгей – ISO/IEC 25010:2023 стандартымен анықталған критерийлер;

2-деңгей – Әр критерийге сәйкес ішкі критерийлер;

3-деңгей – ішкі критерийлерді сандық бағалауға мүмкіндік беретін өлшенетін көрсеткіштер.

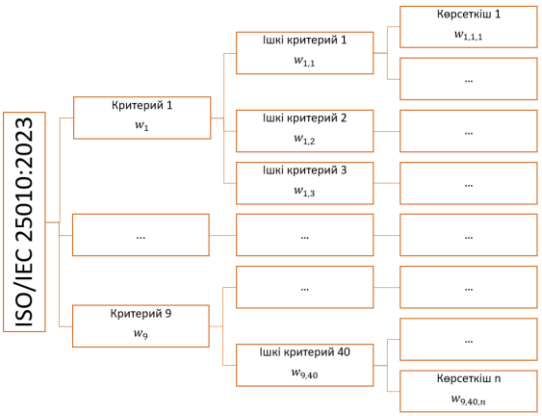
Әрбір деңгейде элементтердің маңыздылығына қарай жұптық салыстыру жүргізіледі. Сарапшылар Саати шкаласына (1-ден 9-ға дейін) негізделген бағалау матрицаларын құрастырады. Осы матрицалар негізінде жергілікті салмақ коэффициенттері есептеледі.

Шкалалардың дұрыстығын қамтамасыз ету үшін келесі нормализация шарттары орындалады:

барлық критерийлердің, әрбір критерийге қатысты ішкі критерийлердің, әрбір ішкі критерийге қатысты көрсеткіштердің салмақтарының қосындысы 1-ге тең:

$$\sum_{i=1}^{n} w_i = 1;\ \sum_{j=1}^{m} w_{ij} = 1;\ \sum_{k=1}^{p} w_{ijk} = 1, \qquad \forall i, j; \tag{1}$$

$$W_{ijk} = w_i \cdot w_{ij} \cdot w_{ijk}, \qquad \sum_{k=1}^{n} W_{ijk} = 1 \tag{2}$$



Сурет 1 – Ақпараттық жүйелердің сенімділігін бағалаудың үш деңгейлі моделі

Сараптамалық бағалаулардың сенімділігін қамтамасыз ету үшін тексеру үдерісінің бір бөлігі ретінде келісімділік коэффициенті (CR) де есептеледі. Егер $CR < 0.1$ болса, нәтижелер қабылдауға жарамды деп есептеледі және алынған салмақтар келесі есептеулерде қолданылады.

Келесі кезеңде әрбір критерий бойынша шешім матрицалары құрылады, мұнда жолдар баламаларға, ал бағандар көрсеткіштерге сәйкес келеді. Матрица элементтері әрбір көрсеткіш бойынша баламалардың сандық немесе сапалық бағаларын көрсетеді.

Баламалар (A) мен көрсеткіштер (C) берілсін:

$$A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}, \qquad C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\} \tag{3}$$

Әрбір балама көрсеткіштер бойынша бағаланып, нәтижесінде шешім матрицасы қалыптасады:

$$X = \left(x_{ij}\right)_{m*n}, \qquad i = 1, \dots, m; \;\; j = 1, \dots, n, \tag{4}$$

мұндағы x_{ij} – i-ші баламаның j-ші көрсеткіш бойынша мәні.

Келесі кезеңде бағалау матрицасында жетіспейтін элементтердің бар-жоғы тексеріледі. Егер матрицада $\exists x_{ij} = \emptyset \rightarrow x_{ij}$ мәні жоқ элемент болса:

$$x_{ij}^{'} = f_{ML}\left(X_{\setminus j}\right) \tag{5}$$

Егер бастапқы деректерде оңтайлы мәндер көрсетілмесе, онда олар келесі ереже бойынша анықталады:

- егер көрсеткіш *max* түріне жатса (мәні неғұрлым жоғары болса, соғұрлым жақсы), онда барлық баламалар арасындағы ең үлкен мән оңтайлы деп қабылданады;
- егер көрсеткіш *min* түріне жатса (мәні неғұрлым кіші болса, соғұрлым жақсы), онда ең кіші мән оңтайлы болып есептеледі.

ARAS (Additive Ratio Assessment) әдісі баламалардың оңтайлы шешімге салыстырмалы жақындығы негізінде олардың интегралды бағасын алу үшін қолданылады. Әдістің негізгі идеясы әрбір баламаны әр көрсеткіш бойынша барлық мәндердің қосындысына қатысты нормализациялау, содан кейін нормаланған мәндердің салмақталған қосындысын есептеу. Интегралды көрсеткіштің мәні неғұрлым жоғары болса, балама соғұрлым тиімді деп есептеледі.

Матрицаның әрбір элементі сәйкес көрсеткіш бойынша мәндердің қосындысына қатысты нормализацияланады:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=0}^{m} x_{ij}} \; (max \text{ көрсеткіші үшін}), r_{ij} = \frac{1/x_{ij}}{\sum_{i=0}^{m} 1/x_{ij}} \; (min \text{ көрсеткіші үшін}) \tag{6}$$

Көрсеткіштердің w_j салмақтарын ескере отырып, салмақталған нормализацияланған матрица есептеледі:

$$v_{ij} = w_j \cdot r_{ij} \tag{7}$$

Әрбір балама үшін жалпы басымдық мәні анықталады:

$$S_i = \sum_{j=1}^{n} v_{ij} \tag{8}$$

Әрбір баламаның пайдалылық көрсеткіші оның жалпы мәнінің оңтайлы баламаның мәніне қатынасы ретінде есептеледі:

$$K_i = \frac{S_i}{S_0} \tag{9}$$

мұндағы S_0 – идеал баламаға сәйкес мән.

Баламалар K_i мәндерінің кему ретімен реттеледі. Пайдалылық көрсеткіші ең жоғары болған балама ең үздік балама болып саналады.

CoCoSo (Combined Compromise Solution) әдісі баламалардың интегралды бағасын алу үшін салмақталған қосынды мен салмақталған ымыра (trade-off) қағидаларын біріктіретін көпкритерийлі талдаудың заманауи тәсілі. CoCoSo әдісінде әрбір балама әрбір көрсеткіш бойынша нормализацияланады, содан кейін орташа мәндер мен салыстырмалы басымдықтарды ескеретін агрегатталған индекстер есептеледі. Соңғы ранжирлеу пайда мен шығын көрсеткіштері арасындағы тепе-теңдікті ескеруге мүмкіндік беретін біріктірілген пайдалылық өлшемі негізінде жүзеге асырылады.

Алдымен көрсеткіштерді нормализациялаймыз:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max\limits_i x_{ij}} \ (max \text{ көрсеткіші үшін}), r_{ij} = \frac{\min\limits_i x_{ij}}{x_{ij}} \ (min \text{ көрсеткіші үшін}) \tag{10}$$

Нормализацияланған мәндерді салмақтау:

$$v_{ij} = w_j \cdot r_{ij} \tag{11}$$

мұндағы w_j – j-ші критерийдің салмағы.

Аддитивті және мультипликативті агрегатталған функцияларды есептеу (қосынды функция мен көбейтінді функция есептеледі):

$$S_i = \sum_{j=1}^{n} v_{ij}\,, \qquad P_i = \prod_{j=1}^{n} v_{ij}^{w_j} \tag{12}$$

Осыған сүйене отырып, біріктірілген индекстер қалыптастырылады:

$$Q_i^{(1)} = \frac{S_i + P_i}{2}, \qquad Q_i^{(2)} = \frac{S_i}{\max(S)} + \frac{P_i}{\max(P)}, \qquad Q_i^{(3)} = \frac{\lambda S_i + (1-\lambda)P_i}{\max\limits_i(\lambda S_i + (1-\lambda)P_i)} \tag{13}$$

$$K_i = \frac{1}{3}\left(Q_i^{(1)} + Q_i^{(2)} + Q_i^{(3)}\right) \tag{14}$$

$\lambda \in [0; 1]$ – тепе-теңдік коэффициенті.

Баламалар K_i мәндерінің кему ретімен ранжирленеді. Ең жоғары мәнге ие балама ең үздік деп есептеледі.

Көпкритерийлі талдауда жетекші құралдардың бірі ретінде қарастырылатын *TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution)* әдісі оңтайлы шешімге ең жақын және анти-оңтайлы (қарсы идеал) нүктеден ең алыс орналасқан баламаны таңдауға негізделген. Осы мақсатта алдымен нормализацияланған әрі салмақталған шешім матрицасы құрылады, содан кейін әрбір көрсеткішке сәйкес идеал және анти-идеал векторлар анықталады. Әрбір балама үшін осы эталондық нүктелерге дейінгі арақашықтықтар есептеледі, соның негізінде жақындық коэффициенті анықталады. Баламалар осы коэффициенттің мәні бойынша ранжирленеді: коэффициент неғұрлым жоғары болса, балама соғұрлым қолайлы деп есептеледі.

Векторлық нормализация қолданылады:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m} x_{ij}^2}} \tag{15}$$

Нормализацияланған мәндер салмақталады:

$$v_{ij} = w_j \cdot r_{ij} \tag{16}$$

Идеал шешімдер (Оң идеал (Positive), Сол идеал (Negative)) анықталады:

$$V^+ = \{v_1^+, v_2^+, \dots, v_n^+\}, \qquad V^- = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-\} \tag{17}$$

мұндағы:

$$v_i^+ = \max_i v_{ij} \ (max \text{ көрсеткіші үшін}), \qquad v_i^+ = \min_i v_{ij} \ (min \text{ көрсеткіші үшін}) \tag{18}$$

$$v_i^- = \min_i v_{ij} \ (max \text{ көрсеткіші үшін}), \qquad v_i^- = \max_i v_{ij} \ (min \text{ көрсеткіші үшін}) \tag{19}$$

Балама V_i-дің оң және теріс идеал шешімдерге дейінгі арақашықтығы Евклид метрикасы арқылы есептеледі:

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^{n}\left(v_{ij} - v_i^+\right)^2}, \qquad S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{n}\left(v_{ij} - v_i^-\right)^2} \tag{20}$$

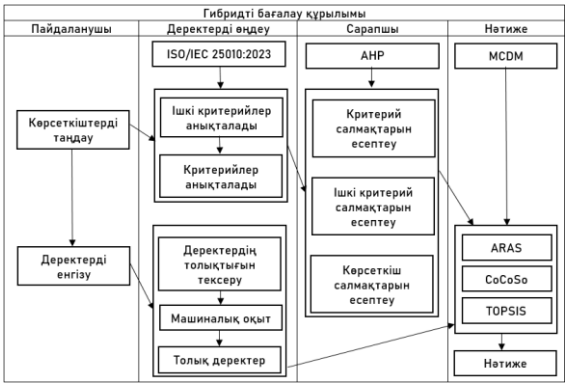
Балама нұсқаның идеал шешімге салыстырмалы жақындығы келесідей анықталады:

$$K_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-}, \qquad 0 \le K_i \le 1 \tag{21}$$

Баламалар K_i мәндерінің кему ретімен сұрыпталады. K_i мәні неғұрлым үлкен болса, балама идеал шешімге соғұрлым жақын болып саналады.

Қорытынды кезеңде көрсеткіштердің өлшенген мәндері шешім матрицасы аясында олардың оңтайлы мәндерімен салыстырыла отырып бағаланады. Әрбір баламаның оңтайлы мәннен ауытқуы анықталады, бұл оның сенімділік деңгейін 0%-дан 100%-ға дейінгі пайыздық көрсеткіш түрінде ұсынуға мүмкіндік береді. Әртүрлі көпкритерийлі талдау әдістері (ARAS, CoCoSo, TOPSIS) арқылы алынған нәтижелерді біріктіру жолымен интегралды сенімділік бағасы қалыптастырылады. Қорытынды көрсеткіштің теңгерімді болуын қамтамасыз ету үшін интегралды индикаторлардың геометриялық орташа мәні есептеледі:

R_i мәндерінің негізінде баламалардың кешенді рейтингі қалыптастырылады. R_i мәні неғұрлым жоғары болса, жүйе оңтайлы өнімділік көрсеткіштеріне соғұрлым жақын және оның сенімділігі соғұрлым жоғары деп есептеледі.



Сурет 2 – Ақпараттық жүйелердің сенімділігін бағалау құрылымдық үлгісі

2-суретте көрсетілгендей, ұсынылған сенімділікті бағалау құрылымы ISO/IEC 25010:2023 сапа моделін, машинамен оқыту әдістерін және көпкритерийлі шешім қабылдау тәсілдерін біріктіретін гибридті әдістеменің толық жұмыс үдерісін сипаттайды. Үдеріс көрсеткіштерді таңдау мен деректерді енгізуден басталады, содан кейін деректердің толықтығын тексеруге арналған валидация кезеңі жүргізіледі. Деректер жиынтығын толықтыру мақсатында жетіспейтін мәндер ML алгоритмі арқылы алынған болжамды нәтижелермен алмастырылады. Критерийлердің, ішкі критерийлердің және көрсеткіштердің салмақтарын анықтау үшін AHP әдісіне негізделген сараптамалық бағалау қолданылады. Есептелген салмақтар ARAS, CoCoSo және TOPSIS әдістерінде пайдаланылады, олардың нәтижесінде интегралды сенімділік көрсеткіштері алынады. Қорытынды сенімділік индексі осы нәтижелердің геометриялық орташа мәні ретінде анықталады.

Қорытындылай келе, аталған әдістеме ISO/IEC 25010:2023 халықаралық стандартының соңғы нұсқасын, көпкритерийлі талдау әдістерін (ARAS, CoCoSo, TOPSIS), салмақтарды анықтауға арналған AHP әдісін және жетіспейтін мәндерді толықтыру үшін машинамен оқыту алгоритмдерін кешенді түрде біріктіреді. Өлшенетін көрсеткіштер мен олардың салмақталған маңыздылығын интеграциялау арқылы гибридті модель ақпараттық жүйелердің сенімділігін жан-жақты әрі бейтарап бағалауды қамтамасыз етеді. Әртүрлі MCDM тәсілдері бойынша алынған нәтижелердің геометриялық орташа мәні арқылы есептелетін қорытынды кешенді көрсеткіш тұрақты әрі визуалды нәтижелерді қамтамасыз етіп, ұсынылған әдістеменің қолданбалы және ғылыми зерттеулер үшін жарамдылығын растайды.

Зерттеу нәтижелері

Зерттеу жүргізу үшін бізге нақты деректер қажет болды. Осы мақсатта бірнеше IT компанияларымен байланыс орнатылып, олар зерттеуге қолдау көрсетуге келісіп, өздері сүйемелдейтін ақпараттық жүйелер туралы мәліметтер ұсынды. Компаниялар құпиялылық

талаптарын қатаң сақтауды талап етті: сондықтан жүйелердің де, компаниялардың да атаулары жария етілмейді. Бізге тек жүйелердің сипаттамалары және сенімділікті бағалау үшін қажетті көрсеткіштердің өлшеу нәтижелері ғана берілді. Осы деректер негізінде машинамен оқыту мен көпкритерийлі талдауда пайдаланылатын деректер жиынтығы қалыптастырылды. Үлгілік эксперимент ретінде тапсырыс беруші компаниялардың ішкі құжат айналымына арналған үш ақпараттық жүйе бойынша деректер ұсынылды. Олардың негізгі сипаттамалары төмендегі кестеде көрсетілген (2-кесте).

Кесте 2 – Ұсынылған ақпараттық жүйелердің сипаттамалары

Жүйе	Қолданылған технологиялар	Негізгі функциялар
Ақпараттық жүйе № 1	Angular + TypeScript (HTML/CSS, PDF.js), Java 17 (Spring Boot, Spring Security – OAuth2/OpenID Connect), PostgreSQL, Redis, S3-compatible Object Storage (MinIO/корпоративтік S3), Elasticsearch, REST API, Kafka, LDAP/Active Directory, GitLab CI/CD, TLS, RBAC, аудит логтары, DLP-ге дайын экспорт	Құжатты тіркеу (кіріс/шығыс/ішкі), нөмірлеу және шаблондар; келісу/бекіту/визалау маршруттары; рөлдер мен қолжетімділік (бөлім, лауазым, жоба); қосымшалармен жұмыс (скан, PDF, DOCX), нұсқаларды басқару; тапсырма және резолюция (орындаушы, мерзім, еске салу); құжат карточкасы (метадерек, байланыстар, тарих); фильтрлер мен толықмәтінді іздеу; есептер және SLA статистикасы; электронды қолтаңбаны (EDS) провайдер арқылы қолдау
Ақпараттық жүйе № 2	React + TypeScript (Material UI), .NET 8 (ASP.NET Core, gRPC), Camunda/Flowable (BPMN 2.0), MS SQL Server, Redis, корпоративтік NAS (WORM), RabbitMQ, REST/SOAP, Active Directory/SSO, Windows Server кластері	Келісімшарттың өмірлік циклі (дайындау, келісу, қол қою, орындау, жабу); контрагент карточкасы және реквизит тексеру; келісім тармақтарының тарихы және нұсқа салыстыру; BPMN процесс-конструктор; процеске байланған қызметтік жазбалар, бұйрықтар мен хаттамалар; автоматты хабарламалар (email/Teams/ішкі); SLA бақылау; аудит және рөлдік қолжетімділік; PDF экспорт (мөртаңба/EDS)
Ақпараттық жүйе № 3	Vue 3 + TypeScript, Python (FastAPI) немесе Node.js (NestJS), PostgreSQL, ClickHouse (опционал), Object Storage (S3/MinIO, lifecycle policy), OpenSearch немесе PostgreSQL Full-Text, Keycloak (SSO, MFA опционал), Docker Compose, Kubernetes (опционал), Prometheus + Grafana, Sentry	Ішкі өтінімдермен жұмыс (анықтама, құжат көшірмесі, қызметтік өтінім); мұрағаттау (істер номенклатурасы, сақтау мерзімі, жауапты); құжаттарды жүктеу, тегтеу және маршруттау; қарапайым келісу (келісті/қайтарды/түзетуді сұрады); қолжетімділік деңгейлері (жалпы, бөлімдік, жеке); әрекеттерді журналдау; қарапайым есептер (өтінім саны, орындалу уақыты, жиі сұралатын түрлер)

Эксперименттік деректерді неғұрлым айқын түрде ұсыну мақсатында жоғарыда сипатталған ақпараттық жүйелер жеңілдетілген нұсқада қарастырылды. Олардың сенімділігін талдау үшін жүйенің ерекшеліктерін барынша толық әрі жүйелі түрде сипаттайтын негізгі көрсеткіштер жиынтығы қолданылды. Көрсеткіштердің тізімі 3-кестеде келтірілген. Бұл деректерді ықшам түрде ұсынуға, сонымен қатар көпкритерийлі талдау мен нәтижелерді визуализациялауды қатар жүргізуге мүмкіндік береді.

Салмақтарды есептеу үшін AHP жұптық салыстыру әдісі қолданылды. Бағалау барысында 25 сарапшыдан алынған орташа мәндер ескерілді. Сарапшылар тобына IT жүйе архитекторлары (8), бағдарламалық қамтамасыз ету инженерлері (7), ақпараттық қауіпсіздік мамандары (5) және ақпараттық жүйелер саласындағы академиялық зерттеушілер (5) кірді. Барлық сарапшылардың кәсіби тәжірибесі кемінде 7 жылды құрады және олар жүйелерді бағалау немесе сапаны қамтамасыз ету жобаларына бұрын қатысқан. Барлық матрицалар үшін келісімділік коэффициенті (CR) 0,1-ден төмен болды, бұл сарапшылар пікірлерінің қабылдауға жарамды деңгейде келісілгенін көрсетеді.

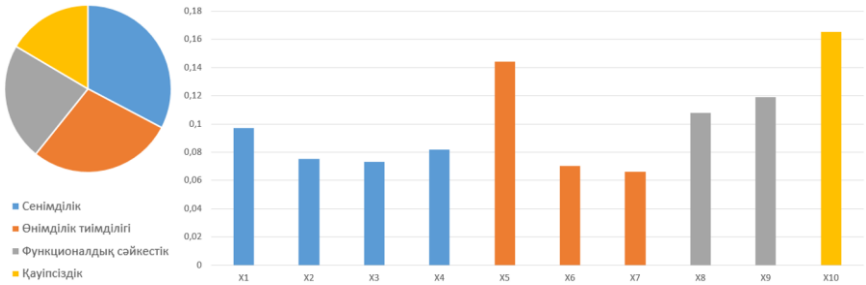
Осы деректер негізінде критерийлер, ішкі критерийлер және көрсеткіштер басымдық бойынша реттеліп, кейіннен олардың мәндері нормализацияланды. Қорытынды нәтижелер 4-кестеде, ал салмақтардың құрылымы мен үлестірілуінің графикалық көрінісі 3-суретте көрсетілген.

Кесте 3 – Ақпараттық жүйелердің сенімділігін талдауға арналған көрсеткіштер тізімі

Көрсеткіш коды	Көрсеткіш атауы	Өлшену әдісі
X1	Қолжетімділік	Жүйенің жұмыс істеу уақытының жалпы бақылау уақытына қатынасы
X2	Қалпына келудің орташа уақыты (MTTR)	Істен шыққаннан кейін қалпына келудің орташа уақыты
X3	Істен шығулар арасындағы орташа уақыт (MTBF)	Жалпы жұмыс істеу уақытының істен шығу жиілігіне қатынасы
X4	Істен шығу жиілігі	Жұмыс уақытының бірлігіне шаққандағы істен шығулар саны
X5	Жүйенің жауап беру уақыты	Пайдаланушы сұранысына жүйенің орташа жауап беру уақыты
X6	CPU пайдалану деңгейі	Әдеттегі жүктеме жағдайындағы CPU-дың орташа жүктемесі
X7	Жедел жадты (RAM) пайдалану деңгейі	Жүйе жұмыс істеп тұрған кездегі RAM-ның орташа пайдаланылуы
X8	Функционалдық талаптардың орындалу пайызы	Іске асырылған функциялар санының талап етілетін функциялар санына қатынасы
X9	Деректерді өңдеу дәлдігі	Деректерді дұрыс өңдеу нәтижелерінің үлесі
X10	Қол жеткізу қауіпсіздігі деңгейі (сәтті шабуылдардың пайызы)	Сәтті шабуылдар санының шабуыл әрекеттерінің жалпы санына қатынасы

Кесте 4 – AHP әдісі арқылы салмақтарды анықтау нәтижелері

Критерий	Критерий салмағы	Ішкі критерий	Ішкі критерий салмағы	Көрсеткіш	Көрсеткіш салмағы	Көрсеткіштің нормализацияланған мәні
Сенімділік	0.3269	Қолжетімділік	0.2967	X1	1	0.097
		Қалпына келу	0.23	X2	1	0.0752
		Жетілгендік	0.2233	X3	1	0.0730
		Ақауларға төзімділік	0.25	X4	1	0.0817
Өнімділік тиімділігі	0.2808	Уақыттық мінез-құлық	0.5143	X5	1	0.1444
		Ресурстарды пайдалану	0.4857	X6	0.5143	0.0701
				X7	0.4857	0.0662
Функционалдық сәйкестік	0.2269	Функционалдық толықтық	0.4747	X8	1	0.1077
		Функционалдық дұрыстық	0.5253	X9	1	0.1192
Қауіпсіздік	0.1654	Тұтастық	1	X10	1	0.1654
Жалпы	1					1



Сурет 3 – Критерийлер мен көрсеткіштер салмақтарының үлестірілуінің графикалық көрінісі

5-кестеде үш эксперименттік ақпараттық жүйе үшін көрсеткіштердің мәндері, оңтайлы мәндері және оңтайландыру бағыттары келтірілген. Сонымен қатар бірінші жүйеге ұқсас төртінші жүйе де жасалды. Оның деректерінде әдейі бірнеше бос мәндер қалдырылды, олар кейіннен машиналық оқыту әдістері арқылы қалпына келтіріледі. Бұл толық емес деректерді өңдеу үдерісін көрсетуге және алынған нәтижелерді салыстыруға мүмкіндік береді.

Кесте 5 – Эксперименттік ақпараттық жүйелер үшін көрсеткіштердің мәндері.

Ақпараттық жүйе	Критерий									
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10
Өлшем бірліктері	Үлес (0-1)	Сағат	Сағат	Істен шығу / сағат	Секунд	%	%	%	Үлес (0-1)	Үлес (0-1)
Оңтайландыру бағыты	max	min	max	min	min	min	min	max	max	min
Салмағы	0.097	0.0752	0.0730	0.0817	0.1444	0.0701	0.0662	0.1077	0.1192	0.1654
Оңтайлы мән	≥ 0.999	≤ 1	≥ 1000	≤ 0.01	≤ 2	≤ 70	≤ 75	100	≥ 0.99	≤ 0.01
	0.999	0.6	1500	0.009	1.2	55	60	100	0.995	0.01
АЖ №1	0.998	0.9	1200	0.015	1.6	65	72	98	0.992	0.020
АЖ №2	0.999	1.1	1500	0.009	1.9	68	74	99	0.995	0.012
АЖ №3	0.996	0.6	900	0.02	1.2	55	60	95	0.985	0.03
АЖ №4	0.998	0.9 (ML)	1200	0.015	1.7 (ML)	65	73 (ML)	98	0.992	0.018 (ML)

Оңтайландыру бағыты «max» болатын көрсеткіштер үшін, нақты өлшенген мән көрсетілген оңтайлы мәннен жоғары болса, эталон ретінде ұсынылған мәндердің ішіндегі ең үлкені алынады. Ал егер ол төмен болса, бастапқы оңтайлы мән сақталады. «min» бағыты бар көрсеткіштер үшін де осыған ұқсас логика қолданылады: егер өлшенген мән төменгі шектен кіші болса, эталон ретінде сол ең кіші мән алынады, ал жоғары мәндер үшін бастапқы оңтайлы мән сақталады. Мұндай тәсіл көрсеткіштердің ерекшеліктерін салыстырмалы талдау барысында және қорытынды бағалауды қалыптастыру кезінде дәл ескеруге мүмкіндік береді.

4-суретте көрсетілгендей, әрбір көрсеткіштің жүйелердің жалпы сенімділігіне әсерін бейнелейтін қорытынды матрица қалыптастырылды. Мұндай деректерді ұсыну форматы баламаларды ғана емес, сонымен қатар оңтайлы мәнді де салыстыруға мүмкіндік береді, бұл әрбір ақпараттық жүйенің күшті және әлсіз жақтарын айқындауға жағдай жасайды. Алынған нәтижелер ARAS әдісі арқылы интегралды көрсеткіштерді одан әрі есептеу және оларды диаграмма түрінде визуализациялау үшін негіз болды.


Әдіс 1 (ARAS)

АЖ	Критерии									
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10
Оңтайлы мән	0,0195	0,0194	0,0161	0,0224	0,0353	0,0157	0,0148	0,0220	0,0239	0,0513
АЖ №1	0,0194	0,0129	0,0161	0,0134	0,0265	0,0131	0,0124	0,0218	0,0239	0,0257
АЖ №2	0,0194	0,0106	0,0128	0,0224	0,0223	0,0127	0,0120	0,0213	0,0238	0,0428
АЖ №3	0,0193	0,0194	0,0148	0,0101	0,0353	0,0157	0,0148	0,0215	0,0239	0,0171
АЖ №4	0,0193	0,0129	0,0132	0,0134	0,0249	0,0129	0,0122	0,0211	0,0237	0,0285

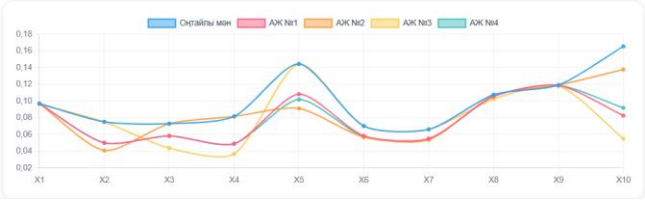
Сурет 4 – ARAS әдісін қолдану нәтижелері

CoCoSo әдісі арқылы есептелген қорытынды нәтижелер 5-суретте көрсетілген. Бұл мәндер барлық көрсеткіштердің біріктірілген бағаларын білдіреді және алты ақпараттық жүйе арасындағы салыстырмалы талдауды жүргізуге мүмкіндік береді.

6-суретте TOPSIS әдісінің нәтижелері көрсетілген. Баламаларды салыстыру барысында әрбір критерий үшін оңтайландыру бағыты ескеріледі: «max» бағытына ие көрсеткіштер үшін жоғары мәндер жүйе сапасының жақсы екенін білдіреді, ал «min» бағытына жататын көрсеткіштер үшін ең кіші мән оңтайлы деп саналады. Бұл тәсіл баламаларды әділ салыстыруға мүмкіндік беріп, зерттеліп отырған ақпараттық жүйелердің күшті және әлсіз жақтарын неғұрлым объективті түрде анықтауға жағдай жасайды.

Әдіс 2 (CoCoSo)

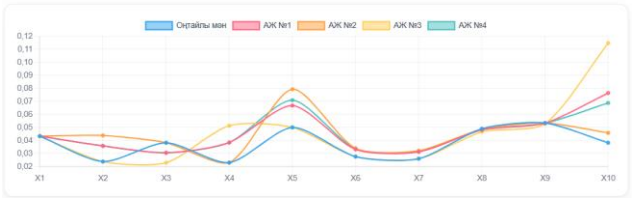
АЖ	Критерии									
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10
Оңтайлы мән	0,0970	0,0752	0,0730	0,0817	0,1444	0,0702	0,0662	0,1077	0,1192	0,1654
АЖ №1	0,0969	0,0501	0,0584	0,0490	0,1083	0,0585	0,0552	0,1055	0,1188	0,0827
АЖ №2	0,0970	0,0410	0,0730	0,0817	0,0912	0,0569	0,0537	0,1066	0,1192	0,1378
АЖ №3	0,0967	0,0752	0,0438	0,0368	0,1444	0,0702	0,0662	0,1023	0,1180	0,0551
АЖ №4	0,0969	0,0501	0,0584	0,0490	0,1019	0,0577	0,0544	0,1055	0,1188	0,0919



Сурет 5 – CoCoSo әдісін қолдану нәтижелері

Әдіс 3 (TOPSIS)

АЖ	Критерии									
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10
Оңтайлы мән	0,0434	0,0239	0,0383	0,0231	0,0501	0,0277	0,0261	0,0491	0,0535	0,0383
АЖ №1	0,0434	0,0359	0,0306	0,0385	0,0669	0,0332	0,0313	0,0482	0,0533	0,0765
АЖ №2	0,0434	0,0439	0,0383	0,0231	0,0794	0,0341	0,0322	0,0486	0,0535	0,0459
АЖ №3	0,0433	0,0239	0,0230	0,0514	0,0501	0,0277	0,0261	0,0467	0,0529	0,1148
АЖ №4	0,0434	0,0359	0,0306	0,0385	0,0710	0,0337	0,0317	0,0482	0,0533	0,0689



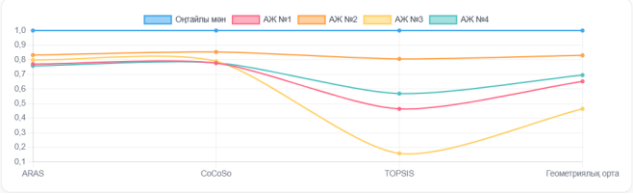
Сурет 6 – TOPSIS әдісін қолдану нәтижелері

Ғылыми нәтижелерді талқылау

Сенімділікті бағалау үш көпкритерийлі талдау әдісі (ARAS, CoCoSo, TOPSIS) арқылы жүргізілді. Нәтижелер ARAS және CoCoSo әдістері бойынша зерттелген №2 жүйенің оңтайлы мәнге жақын екенін көрсетті, бұл сенімділік деңгейінің салыстырмалы түрде жоғары екенін білдіреді. №1 және №4 ақпараттық жүйелер бір-біріне жақын екендігін көрсетті, бұл машиналық оқытыту әдістерін қосудың дұрыстығын дәлелдейді. №3 ақпараттық жүйенің мәні салыстырмалы түрде төмен болды (7-сурет).

Жалпы

АЖ	Критерии			
	ARAS	CoCoSo	TOPSIS	Геометриялық орта
Оңтайлы мән	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
АЖ №1	0,7700	0,7765	0,4634	0,6519
АЖ №2	0,8319	0,8532	0,8056	0,8300
АЖ №3	0,7981	0,7890	0,1585	0,4639
АЖ №4	0,7578	0,7789	0,5682	0,6948



Сурет 7 – Ақпараттық жүйелердің сенімділігін бағалаудың қорытынды нәтижелері

Алынған сенімділіктің пайыздық мәндерін интерпретациялау үшін халықаралық бағдарламалық қамтамасыз ету сапасы стандарттарының ұсынымдарына негізделген шкала қолданылды. Бұл шкала ақпараттық жүйелерді сенімділік деңгейлері бойынша жіктеуге және практикалық ұсынымдар әзірлеуге мүмкіндік береді (7-кесте).

Гибридті әдістемеміздің әртүрлі жұмыс жағдайларындағы тұрақтылығын тексеру және растау мақсатында қосымша сезімталдық талдауы жүргізілді. AHP әдісі арқылы анықталған көрсеткіштердің салмақтары ±10% шегінде аздап өзгертілді. Осыдан кейін TOPSIS және CoCoSo әдістері бойынша жиынтық кешенді бағалар қайта есептелді.

Кесте 7 – Ақпараттық жүйелердің сенімділігінің пайыздық мәндерін интерпретациялау шкаласы

Шкала	Сипаттамасы
0-20% – сенімділіктің өте төмен деңгейі	Жүйе ең төменгі пайдалану стандарттарына сәйкес келмей, істен шығу ықтималдығы жоғары болғандықтан, архитектураны елеулі түрде қайта қарау, ресурстарды оңтайландыру және резервтеу стратегияларын енгізу қажет.
20-40% – сенімділіктің төмен деңгейі	Жүйе жұмыс істеп тұр, алайда ол істен шығуларға және жоғары жүктеме жағдайларына бейім. Істен шығуға төзімділікті, қауіпсіздікті, сондай-ақ мониторинг пен диагностика механизмдерін жетілдіру қажет.
40-60% – сенімділіктің орташа деңгейі	Жүйе негізгі талаптарға сәйкес келеді, алайда айтарлықтай шектеулерді әлі де көрсетеді. Тоқтап қалу уақытын және қателер санын азайту үшін өнімділікті кезең-кезеңімен арттыру және функционалдылықты дәл баптау ұсынылады.
60-80% – сенімділіктің жоғары деңгейі	Жүйе пайдаланушылардың талаптарына және қабылданған эталондық көрсеткіштерге сәйкес келеді. Кейде жоғары жүктеме кезеңдерінде әлсіз тұстар байқалуы мүмкін. Қазіргі деңгейін сақтау үшін тұрақты түрде баптау және оңтайландыру жұмыстарын жүргізу қажет.
80-100% – сенімділіктің өте жоғары деңгейі	Жүйе ISO/IEC 25010:2023 стандартының анықтамаларына қатаң сәйкес келе отырып, ең жоғары немесе соған жуық деңгейде жұмыс істейді, сол арқылы іс жүзінде эталондық стандарт ретінде қарастырылады. Осы деңгейде қалу үшін жүйені үздіксіз қадағалап, үнемі жаңа әрі жетілдірілген шешімдерді енгізіп отыру қажет.

Талдау нәтижелері салмақтардың шағын өзгерістері ақпараттық жүйелердің қорытынды рейтингін бұзбағанын көрсетті. Өте болмашы өзгерістер тек кейбір шекаралық жағдайларда, негізінен «Қол жеткізу қауіпсіздігі деңгейі» және «Істен шығулар арасындағы орташа уақыт» көрсеткіштері бойынша байқалды.

Қорытынды

Бұл мақалада ISO/IEC 25010:2023 стандартын, көпкритерийлі талдау әдістерін (ARAS, CoCoSo және TOPSIS), Аналитикалық иерархия әдісін және машинамен оқыту алгоритмдерін бірлесіп қолдануға негізделген ақпараттық жүйелердің сенімділігін бағалаудың гибридті әдістемесі ұсынылды.

ISO/IEC 25010:2023 стандарты әдістеменің тұжырымдамалық негізі ретінде таңдалып, сенімділікті жеке көрсеткіш ретінде емес, қолжетімділік, ақауларға төзімділік, жетілу деңгейі және қалпына келу қабілеті сияқты қасиеттерді қамтитын жүйелік сипаттама ретінде қарастыруға мүмкіндік берді. Стандарттың иерархиялық құрылымы талаптарды логикалық түрде жіктеуді қамтамасыз етіп, абстрактілі сапа сипаттамаларын нақты өлшенетін көрсеткіштермен байланыстыруға жол ашты. AHP әдісін қолдану сараптамалық білімді ескеруге және критерийлер мен көрсеткіштердің салыстырмалы маңыздылығын дәл анықтауға мүмкіндік берді.

Зерттеудің маңызды практикалық аспектілерінің бірі – нақты ақпараттық жүйелерді бағалау кезінде жиі кездесетін деректердің толық еместігі мәселесін шешу болды. Осы мақсатта жетіспейтін мәндерді толықтыру үшін әдістемеге машиналық оқыту енгізілді. Жүргізілген эксперименттер деректерді дайындау кезеңінде машиналық оқытуды қолдану бастапқы деректердің толықтығы мен келісімділігін арттыратынын және қорытынды бағалау нәтижелерін бұрмаламайтынын көрсетті.

Ұсынылған әдістеменің практикалық маңыздылығы ISO/IEC 25010:2023 стандартымен реттелетін барлық негізгі критерийлерді ескере отырып, ақпараттық жүйенің сенімділік деңгейін кешенді түрде анықтау мүмкіндігінде жатыр. Көрнекі әрі түсінікті формада ұсынылатын қорытынды бағалау жүйенің ағымдағы жай-күйін талдауды, әлсіз тұстарын анықтауды және архитектурасы мен мақсаты әртүрлі ақпараттық жүйелерді салыстыруды жеңілдетеді. Бұл әзірленген тәсілді сапаны басқару, жаңғырту және цифрлық жүйелерді дамыту саласындағы шешімдерді қолдауға ыңғайлы құрал етеді.

Жалпы алғанда, ұсынылған әдістеме ақпараттық жүйелердің сенімділігін бағалауға арналған және практикаға бағытталған құрал болып табылады. Бұл жұмыс жаңа алгоритмдер құруды мақсат етпейді, керісінше, қолданыстағы әдістерді қазіргі заман талаптары мен нақты пайдалану жағдайларына бейімделген біртұтас модельге негізді түрде біріктіруді көрсетеді, бұл оның ғылыми және практикалық маңыздылығын айқындайды.

Әдебиеттер тізімі

1. Advanced risk management software for multi-criteria decision-making in uncertain scenarios / S. Carpitella et al // Computational and Applied Mathematics. – 2025. – vol. 44, art. № 379. https://doi.org/10.1007/s40314-025-03338-0.
2. Tworek K. Reliability of information systems in organization in the context of banking sector: Empirical study from Poland / K. Tworek // Cogent Business & Management. – 2018. – vol. 5, № 1. https://doi.org/10.1080/23311975.2018.1522752.
3. Dubey S. Reliability assessment of component-based software systems using fuzzy and ANFIS techniques / S. Dubey, J. Bhat // International Journal of Systems Assurance Engineering and Management. – 2017. – vol. 8, № 6. https://doi.org/10.1007/s13198-017-0602-z.
4. Foidl H. Integrating software quality models into risk-based testing / H. Foidl, M. Felderer // Software Quality Journal. – 2018. – vol. 26, № 2. https://doi.org/10.1007/s11219-016-9345-3.
5. Thakkar N. Data driven MCDM models for reliability-economic-environmental analysis of energy storage based autonomous micro-grid / N. Thakkar, P. Paliwal // Journal of Energy Storage. – 2024. – vol. 81, art. № 110408. https://doi.org/10.1016/j.est.2023.110408.
6. ISO/IEC, ISO/IEC 25010:2023 – Systems and Software Engineering – Systems and Software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) – Product Quality Model. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2023.
7. Tamura Y. Reliability modeling and analysis for open source cloud computing / Y. Tamura, M. Kawakami, S. Yamada // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability. – 2013. – vol. 227, № 2. – P. 179-186. https://doi.org/10.1177/1748006X12475110.
8. ISO/IEC 9126 quality model for evaluation of student academic portal / E. Budiman et al // Proceeding of the Electrical Engineering Computer Science and Informatics. – 2018. – vol. 5, № 5. https://doi.org/10.11591/eecsi.v5i5.1670.
9. Sun L. A hybrid MCDM approach for evaluating financial performance based on a set of business companies / L. Sun, H. Zheng // Neutrosophic Sets and Systems. – 2025. – vol. 79. P. 1-12. https://digitalrepository.unm.edu/nss_journal/vol79/iss1/46.
10. Büyüközkan G. Spherical fuzzy sets based integrated DEMATEL, ANP, VIKOR approach and its application for renewable energy selection in Turkey / G. Büyüközkan, Y. Karabulut, F. Göçer // Applied Soft Computing. – 2024. – vol. 158, art. № 111465. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2024.111465.
11. Etraj P. An integrated DEMATEL and AHP approach for multi-criteria green supplier selection process in public procurement / P. Etraj, J. Jayaprakash // International Journal of Engineering and Technology. – 2017. – vol. 9, № 1. – P. 113-124. https://doi.org/10.21817/ijet/2017/v9i1/170901414.
12. An integrated fuzzy-AHP and TOPSIS approach for maintenance policy selection / N. Hemmati et al // International Journal of Quality & Reliability Management, 2019. https://doi.org/10.1108/IJQRM-10-2018-0283.
13. Ortíz M.A. A contrast between DEMATEL-ANP and ANP methods for Six Sigma project selection: A case study in the healthcare industry / M.A. Ortíz, H.A. Felizzola, I.S. Nieto // Multidimensional, Multidiscipline and Shared Decision Making in Healthcare and eHealth. – 2021. – vol. 15, suppl. 3. – P. 1-10. https://doi.org/10.1186/1472-6947-15-S3-S3.
14. Mardani A. Fuzzy multiple criteria decision-making techniques and applications – two decades review from 1994 to 2014 / A. Mardani, A. Jusoh, E.K. Zavadskas // Expert Systems with Applications. – 2015. – vol. 42, № 8. – P. 4126-4148. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.01.003.
15. Hybrid multiple-criteria decision-making methods: A review of applications in engineering / E.K. Zavadskas et al // Scientia Iranica. – 2016. – vol. 23, № 1. – P. 1-20. https://doi.org/10.24200/sci.2016.2093.
16. Grote T. Reliability in machine learning / T. Grote, K. Genin, E. Sullivan // Philosophy Compass. – 2024. – vol. 19, № 5. https://doi.org/10.1111/phc3.12974.
17. Kumar N. Vehicle accident sub-classification modeling using stacked generalization: A multi-sensor fusion approach / N. Kumar, D. Lohani, D. Acharya // Future Generation Computer Systems. – 2022. – vol. 133. – P. 39-52. https://doi.org/10.1016/j.future.2022.03.005.
18. Shaik N.B. XGBoost based enhanced predictive model for handling missing input parameters: A case study on gas turbine / N.B. Shaik, K. Jongkittinarukorn, K. Bingi // Case Studies in Chemical and Environmental Engineering. – 2024. – vol. 10, art. № 100775. https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100775.

19. Vinodh S. Lean Six Sigma project selection using hybrid approach based on fuzzy DEMATEL–ANP–TOPSIS / S. Vinodh, V. Swarnakar // International Journal of Lean Six Sigma. – 2015. – vol. 6, № 4. – P. 313-338. https://doi.org/10.1108/IJLSS-12-2014-0041.
20. Beheshtinia M.A., Omidi S. A hybrid MCDM approach for performance evaluation in the banking industry / Beheshtinia M.A., Omidi S. // Kybernetes. – 2017. – vol. 46, № 8. – P. 1386-1400. https://doi.org/10.1108/K-03-2017-0105.

Алғыс

Жұмыс Қазақстан Республикасының Ғылым және жоғары білім министрлігінің қаржылық қолдауымен, AP 25793823 гранты аясында орындалды.

Н.М. Сисенов, Г.Б. Улюкова*, Д.Ж. Сатыбалдина, А.К. Шайханова
Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилёва
10000 Казахстан, г. Астана, ул. Сатпаева, 2
*e-mail: gulden1590@gmail.com

ГИБРИДНАЯ ОЦЕНКА НАДЁЖНОСТИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ISO/IEC 25010:2023, MCDM И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Надёжность информационных систем является ключевым условием стабильного функционирования современных цифровых сервисов, особенно в условиях высокой нагрузки и стремительно развивающихся процессов цифровизации. Большинство традиционных подходов опирается на отдельные показатели либо на субъективные экспертные оценки, что ограничивает прозрачность получаемых результатов. В данной статье предлагается гибридная методология, объединяющая модель качества ISO/IEC 25010:2023, методы многокритериального принятия решений (ARAS, CoCoSo, TOPSIS) и машинное обучение для восстановления недостающих данных. Стандарт ISO/IEC 25010:2023 используется для определения структуры качественных атрибутов, связанных с надёжностью, и выбора соответствующих показателей. Метод AHP позволяет на основе экспертных суждений систематически определить веса критериев. Недостающие значения в наборе данных восстанавливаются с помощью алгоритма машинного обучение, что обеспечивает получение полной и согласованной матрицы данных. После подготовки данных надёжность альтернативных информационных систем оценивается с использованием трёх многокритериальных методов. Это повышает устойчивость итогового рейтинга и снижает его чувствительность к изменениям весовых коэффициентов. Предложенная методология была апробирована на четырех реальных информационных системах с различной архитектурой. Между применяемыми методами была зафиксирована высокая степень согласованности, рейтинги оставались стабильными даже при изменении весов на ±10%, а также была подтверждена возможность оценки надёжности в процентном выражении. Данный подход позволяет объективно сравнивать системы, выявлять их слабые стороны и принимать обоснованные решения по их совершенствованию и модернизации.

Ключевые слова: *Информационная система, Надёжность, ISO/IEC 25010:2023, Многокритериальный метод, ARAS, CoCoSo, TOPSIS, Машинное обучение.*

N. Sissenov, G. Ulyukova*, D. Satybaldina, A. Shaykhanova
L.N. Gumilyov Eurasian National University
10000, Kazakhstan, Astana, Satpaev St., 2
*e-mail: gulden1590@gmail.com

HYBRID RELIABILITY ASSESSMENT OF INFORMATION SYSTEMS USING ISO/IEC 25010:2023, MCDM, AND MACHINE LEARNING

The reliability of information systems is a key prerequisite for the stable operation of modern digital services, especially under high-load conditions and rapidly evolving digitalization processes. Most traditional approaches rely on individual indicators or subjective expert judgments, which limits the transparency of the results obtained. This paper proposes a hybrid methodology that integrates the ISO/IEC 25010:2023 quality model, multicriteria decision-making methods (ARAS, CoCoSo, TOPSIS), and machine learning techniques for imputing missing data. The ISO/IEC 25010:2023 standard is used to define the structure of reliability-related quality attributes and to select appropriate indicators. The AHP method enables a systematic determination of criterion weights based on expert judgments. Missing values in the dataset are restored using a machine learning algorithm, resulting in a complete and consistent data matrix. After data preparation, the reliability of

alternative information systems is evaluated using three multicriteria methods. This increases the robustness of the final ranking and reduces its sensitivity to changes in weighting coefficients. The proposed methodology was tested on four real-world information systems with different architectures. A high degree of consistency was observed among the applied methods; the rankings remained stable even when weights were varied by ±10%, and the feasibility of expressing reliability as a percentage was confirmed. This approach enables objective system comparison, identification of weaknesses, and informed decision-making for system improvement and modernization.

Key words: *Information system, Reliability, ISO/IEC 25010:2023, Multicriteria method, ARAS, CoCoSo, TOPSIS, Machine learning.*

Авторлар туралы мәліметтер

Нурбек Маханбетулы Сисенов – жаратылыстану ғылымдарының магистрі, «Ақпараттық қауіпсіздік» кафедрасының аға оқытушысы, Астана қаласы Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қазақстан; e-mail: nurbek0692@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1270-8634.

Гулден Бектемировна Улюкова* – жаратылыстану ғылымдарының магистрі, «Ақпараттық қауіпсіздік» кафедрасының аға оқытушысы, Астана қаласы Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қазақстан; e-mail: gulden1590@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2924-0767.

Дина Жагипаровна Сатыбалдина – физика-математика ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, «Ақпараттық қауіпсіздік және криптология» ғылыми-зерттеу институтының директоры, Астана қаласы Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қазақстан; e-mail: satybaldina_dzh@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0291-4685.

Айгуль Кайрулаевна Шайханова – Информатика, Есептеу техникасы және бағдарламалық қамтамасыз ету мамандығы бойынша қауымдастырылған профессор, «Ақпараттық қауіпсіздік» кафедрасының профессоры; Астана қаласы Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қазақстан; e-mail: shaikhanova_ak@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6006-4813.

Сведения об авторах

Нурбек Маханбетулы Сисенов – магистр естественных наук, старший преподаватель кафедры «Информационная безопасность»; Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилёва, г. Астана, Казахстан; e-mail: nurbek0692@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1270-8634.

Гулден Бектемировна Улюкова* – магистр естественных наук, старший преподаватель кафедры «Информационная безопасность», Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилёва, г.Астана, Казахстан; e-mail: gulden1590@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2924-0767.

Дина Жагипаровна Сатыбалдина – кандидат физико-математических наук, ассоциированный профессор, директор научно-исследовательского института «Информационная безопасность и криптология», Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилёва, г. Астана, Казахстан; e-mail: satybaldina_dzh@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0291-4685.

Айгуль Кайрулаевна Шайханова – ассоциированный профессор по специальности «Информатика, вычислительная техника и программное обеспечение», профессор кафедры «Информационная безопасность», Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилёва, г. Астана, Казахстан; e-mail: shaikhanova_ak@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6006-4813.

Information about the authors

Nurbek Sissenov – Master of Natural Sciences, Senior Lecturer at the Department of Information Security; L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; e-mail: nurbek0692@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1270-8634.

Gulden Ulyukova* – Master of Natural Sciences, Senior Lecturer at the Department of Information Security; L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; e-mail: gulden1590@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2924-0767.

Dina Satybaldina – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Director of the Research Institute «Information Security and Cryptology», L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; e-mail: satybaldina_dzh@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0291-4685.

Aigul Shaykhanova – Associate Professor in the specialty Informatics, Computer Engineering and Software, Professor of the Department of Information Security, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; e-mail: shaikhanova_ak@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6006-4813.

Редакцияға енуі 05.01.2026
Жариялауға қабылданды 27.02.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-19

BY 4.0
Check for updates

МРНТИ: 50.41.25

А.Н. Молдагулова[1], Д.Н. Тұрмаханбет[2,3*], М.А. Мауленбеков[1,3], Ж.Б. Кальпеева[1], Р.К. Ускенбаева [1]

[1]Казахский национальный технический исследовательский университет им. К.И. Сатпаева,
050013, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаев 22
[2]Казахский национальный университет имени аль-Фараби,
050040, Республика Казахстан, г. Алматы, пр. аль-Фараби, 71
[3]ТОО «Kazakhstan R&D Solutions»,
050056, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Кожедуба 3
*e-mail: turmahanbetdinara@gmail.com

МОНИТОРИНГ КАЧЕСТВА ВОЗДУХА В АВТОБУСАХ АЛМАТЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ IOT-УСТРОЙСТВ И МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Аннотация: *Качество воздуха в общественном транспорте – важный фактор, напрямую влияющий на здоровье горожан, однако для Алматы эта проблема до настоящего времени оставалась недостаточно изученной. В данном исследовании проведён систематический мониторинг концентраций CO_2, $PM_{2.5}$, PM_{10}, температуры и относительной влажности в автобусах на трёх ключевых транспортных коридорах города. Сбор данных осуществлялся с использованием мобильного IoT-устройства собственной разработки «Tynys», откалиброванного по коммерческому эталонному датчику, что обеспечило высокую достоверность полученных измерений. Особое внимание было уделено сравнению условий в часы пик и вне их, что позволило выявить закономерности изменения параметров воздуха при различной загрузке транспорта. Анализ показал, что в утренние часы пик концентрации CO_2 и мелкодисперсных частиц значительно превышают уровни межпиковых периодов, что подтверждает ключевую роль пассажиропотока в формировании качества воздуха в салоне. Дополнительно с применением методов машинного обучения было установлено, что именно CO_2 и $PM_{2.5}$ являются наиболее информативными индикаторами загрязнённости, позволяющими надёжно классифицировать периоды с высокой нагрузкой. Полученные результаты восполняют существующий научный пробел в исследованиях качества воздуха в общественном транспорте региона Центральной Азии и формируют базу для последующих работ, направленных на модернизацию вентиляционных систем, оптимизацию пассажиропотоков и внедрение интеллектуальных технологий мониторинга микроклимата в автобусах.*

Ключевые слова: *общественный транспорт; качество воздуха; CO_2; $PM_{2.5}$; PM_{10}; IoT-устройство; машинное обучение; вентиляция; пассажиропоток; микроклимат; интеллектуальный транспорт.*

Методология

Архитектура системы

Система мониторинга качества воздуха в реальном времени основана на компактном IoT-устройстве, предназначенном для эксплуатации в закрытых помещениях, включая автобусы [1, 2]. Устройство представляет собой автономный и экономически доступный сенсорный узел, способный функционировать в условиях ограниченного энергоснабжения и нестабильного соединения [3, 4]. В его состав входит сенсорный модуль, управление им и предварительная обработка данных выполняются на микрокомпьютере, где для повышения точности измерений используется алгоритм скользящего среднего [5]. Конструктивно устройство размещено в корпусе с вентиляционными отверстиями для обеспечения оптимальной циркуляции воздуха [6, 7]. Передача данных на сервер осуществляется по беспроводному интерфейсу Wi-Fi с использованием протокола MQTT, что обеспечивает низкие накладные расходы и высокую эффективность в условиях ограниченной пропускной способности [3, 8]. Каждый набор параметров снабжается временной меткой и сохраняется в формате CSV [4]. Для обеспечения непрерывности сбора данных в условиях нестабильной связи реализован механизм буферизации: измеренные значения временно сохраняются

©А.Н. Молдагулова, Д.Н. Тұрмаханбет, М.А. Мауленбеков, Ж.Б. Кальпеева, Р.К. Ускенбаева

локально и автоматически передаются на сервер после восстановления соединения [9]. На серверной стороне данные поступают в структурированную SQL-базу, что обеспечивает их долговременное хранение, быстрый доступ и последующую обработку [3]. Для пользователей предусмотрена веб-панель, позволяющая визуализировать как текущие, так и архивные показатели качества воздуха [10]. Архитектура системы является модульной и масштабируемой, что обеспечивает возможность подключения множества устройств и интеграции в более крупные инфраструктурные решения [11].

Как показано на схеме (рис. 1), архитектура разделена на четыре уровня. Первый уровень отвечает за сбор данных и их первичную обработку с помощью встроенных сенсоров и вычислительных модулей. Второй уровень представляет собой набор регистрируемых параметров окружающей среды – концентрации углекислого газа, уровня взвешенных частиц, а также температуры и влажности. На третьем уровне реализована передача информации и её хранение: данные отправляются по протоколу MQTT и сохраняются в базе SQL, что обеспечивает их доступность для анализа и визуализации. Четвёртый уровень связан с перспективами дальнейшего развития системы – он предназначен для внедрения интеллектуальных методов обработки и машинного обучения, позволяющих повысить точность и глубину аналитики. В рамках реализации этого уровня нами были опробованы алгоритмы Logistic Regression (точность ≈77%), Random Forest (точность ≈95%) и XGBoost (точность ≈95,5%), показавшие высокую эффективность при классификации и прогнозировании состояния воздуха. На основе результатов сравнения XGBoost был выбран в качестве основного алгоритма для промышленного развёртывания благодаря его стабильности и высокой точности. Разработанный ML-модуль интегрирован в серверную часть и обрабатывает поступающие данные в реальном времени, формируя прогнозы ухудшения или улучшения качества воздуха. Благодаря модульной архитектуре его возможно дообучать на новых данных, что обеспечивает адаптацию модели к сезонным изменениям и разным маршрутам автобусов.

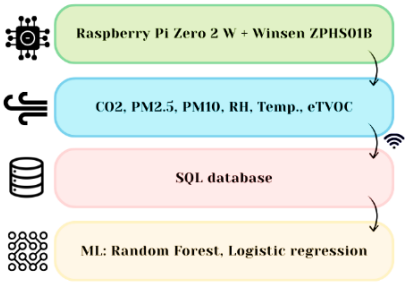


Рисунок 1 – Архитектура системы

Таким образом, ключевой особенностью системы является объединение компактного сенсорного узла, энергоэффективной обработки данных, встроенных методов машинного обучения и надёжной инфраструктуры передачи и хранения информации, что обеспечивает непрерывный и достоверный мониторинг качества воздуха в реальном времени в автобусах.

IoT устройство Breathe

В рамках исследования было использовано компактное IoT-устройство, предназначенное для мониторинга качества воздуха в салонах автобусов в режиме реального времени [10]. Оно регистрирует основные экологические показатели – концентрации CO_2, $PM_{2.5}$, PM_{10}, а также температуру и относительную влажность, что позволило проанализировать взаимосвязь уровня загрязнения с пассажиропотоком и временем суток [7, 12, 13]. Перед началом полевых испытаний устройство прошло лабораторную калибровку: его показания были сверены с результатами эталонного коммерческого датчика Qingping, что подтвердило достоверность последующих измерений [14].

Аппаратная часть включает мини-компьютер Raspberry Pi Zero 2 W, который выступает в качестве управляющего узла; к нему подключены датчики температуры и влажности с точностью измерений ±0,5℃ в диапазоне от 0 до 65℃ и ±3% RH, лазерный сенсор для регистрации концентраций взвешенных частиц $PM_{2.5}$ и PM_{10} с минимальным порогом детекции 0,3 μm, а также газовый сенсор CO_2 (NDIR-тип, диапазон 0-5000 ppm, точность ±(50 ppm + 5% от значения измерения)) [3, 9, 15]. Для обеспечения стабильной циркуляции воздуха применяются малогабаритные вентиляторы [6, 16]. Все компоненты размещены в компактном

3D-печатном корпусе с вентиляционными отверстиями и разъёмом питания, что делает устройство удобным для мобильного использования в автобусах [4]. Сбор данных осуществляется с интервалом 60 секунд, при этом для сглаживания шумов и устранения выбросов применяется алгоритм скользящего среднего [5]. Помимо сбора данных, устройство обладает функцией их визуализации в реальном времени, что позволяет оперативно отслеживать изменения качества воздуха [10]. В целом, устройство зарекомендовало себя как недорогое и надёжное решение для мониторинга воздуха в автобусах, обеспечившее эффективный сбор информации и ставшее ключевым инструментом для успешного проведения исследования [1, 3, 4].

Сбор данных

Сбор данных был организован в апреле 2025 года и охватывал три ключевых автобусных маршрута – B1, B2 и B3 (рис. 2), что позволило исследовать различные транспортные коридоры Алматы, включая как центральные участки с интенсивным пассажиропотоком, так и периферийные зоны с меньшей загрузкой. В маршрут B3 был включён участок в сторону Медео, что дало возможность оценить влияние рельефа и высоты на концентрацию загрязняющих веществ. Измерения выполнялись дважды в течение дня, чтобы зафиксировать контрастные условия: в утренний час пик (08:00-09:00), когда наблюдается максимальная плотность пассажиров и интенсивность движения, и в период относительно низкой загрузки (10:00-11:00). Такой выбор временных интервалов позволил выявить зависимость уровня загрязнения от пассажиропотока и условий вентиляции. Для снижения влияния случайных факторов измерения повторялись несколько дней подряд, а погодные условия фиксировались для последующего анализа их влияния на концентрации загрязнителей. Устройство размещалось в центральной части салона автобуса на высоте около 1,5 м – в зоне дыхания стоящего пассажира, что позволило получать репрезентативные данные, отражающие реальные условия экспозиции. Для исключения локальных аномалий устройство фиксировалось вдали от окон и дверей, чтобы минимизировать влияние кратковременных сквозняков.

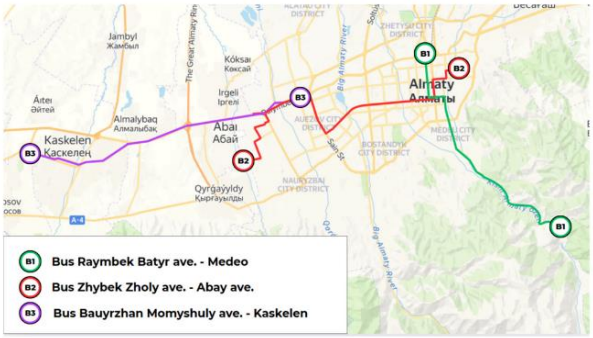


Рисунок 2 – Маршрут автобусов

Перед началом анализа данные прошли процедуру очистки и стандартизации. Были удалены записи с некорректными показаниями датчиков (например, возникающими при резком изменении питания устройства или кратковременном отключении Wi-Fi). Все числовые признаки нормализовались с использованием стандартизации, что обеспечило сопоставимость масштабов параметров при дальнейшем анализе и обучении моделей машинного обучения. Для оценки информативности собранных параметров был проведён анализ важности признаков с использованием модели Random Forest (рис. 3). Результаты показали, что наибольший вклад в вариации качества воздуха вносит тип транспортного средства, что связано с различиями в системах вентиляции и пассажиропотоке на маршрутах. Существенное влияние также оказывают температура и относительная влажность, отражающие микроклиматические условия в салоне. Концентрация CO_2 и уровень загруженности дороги показали меньший, но значимый вклад, что подтверждает необходимость их учёта при прогнозировании. Такой анализ позволил подтвердить, что выбранный набор параметров является репрезентативным и достаточным для построения моделей классификации и прогнозирования. Полученные результаты служат основой для

формирования обучающей выборки и дальнейшего применения методов машинного обучения на следующем этапе исследования.

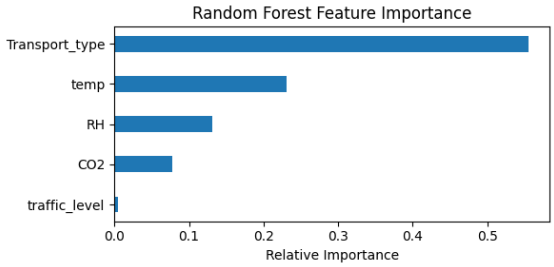


Рисунок 3 – Важность признаков в модели Random Forest

Результаты

Анализ собранных данных показал систематическую и выраженную зависимость качества воздуха в салоне автобусов от уровня пассажирской нагрузки. В периоды высокой заполняемости концентрации основных загрязнителей возрастали резко и существенно. Среднее значение CO_2 в часы пик достигало 1520 ppm, что почти в два раза превышает уровень, зафиксированный при малой загрузке (≈850 ppm). Концентрация мелкодисперсных частиц $PM_{2.5}$ в те же периоды составляла ≈48 мкг/м³, что более чем втрое выше показателей при низкой загрузке (≈16 мкг/м³). Для PM_{10} наблюдалась аналогичная динамика, при этом пиковые значения превышали рекомендуемые санитарные нормы. Такая зависимость однозначно указывает на прямое влияние пассажиропотока и скорости воздухообмена на качество воздуха: при росте числа пассажиров увеличивается интенсивность дыхания и количество источников загрязнителей, а естественная вентиляция не успевает обеспечить требуемый воздухообмен, что приводит к накоплению CO_2 и частиц.

Для более детального изучения вклада отдельных параметров в формирование качества воздуха был проведён анализ значимости признаков с использованием модели Random Forest (рис. 3). Горизонтальная столбчатая диаграмма показала, что основным предиктором состояния воздуха является концентрация CO_2, вносящая наибольший вклад в способность модели различать периоды с высокой и низкой нагрузкой. Вторым по значимости фактором оказался уровень $PM_{2.5}$, также тесно связанный с количеством пассажиров и вентиляцией. Вклад PM_{10} оказался несколько меньшим, но остаётся статистически значимым, отражая присутствие более крупных частиц, которые быстрее оседают на поверхностях и менее чувствительны к кратковременным изменениям потоков воздуха. Температура и влажность также участвуют в классификации, однако их вес в модели заметно ниже, что соответствует физической природе этих параметров: они характеризуют микроклимат, но не являются прямыми индикаторами антропогенного загрязнения.

Сравнительный анализ показал, что Logistic Regression продемонстрировала наименьшую точность (accuracy ≈ 0.77), что связано с её линейной природой и ограниченной способностью моделировать сложные нелинейные зависимости между параметрами качества воздуха. Decision Tree и Random Forest показали значительно более высокие результаты: обе модели превысили порог точности 95%. При этом Decision Tree незначительно опередила Random Forest по accuracy (0.9547 против 0.9524), однако проявила склонность к переобучению, что выражалось в снижении обобщающей способности при классификации редких классов. Наиболее сбалансированные результаты показала модель Random Forest, обеспечив accuracy = 0.9524, precision = 0.6113, recall = 0.6425 и F1 = 0.6257 (табл. 1). Эти показатели указывают на устойчивую способность модели корректно классифицировать временные интервалы с разной нагрузкой и делают её оптимальным выбором для задачи прогнозирования состояния воздушной среды. На рисунке 4 представлена confusion matrix модели Random Forest. Модель демонстрирует высокую точность классификации для класса Low: верно классифицировано 647 наблюдений из 666 (специфичность более 97%). Для класса High модель правильно определила 174 из 182 наблюдений, допустив лишь семь ошибок, отнеся их к Low, и одну – к Medium. Класс Medium оказался наиболее сложным для корректной идентификации: все 14 наблюдений были отнесены преимущественно к классу High, что свидетельствует о значительном пересечении признаков между этими состояниями. Несмотря на это, общее распределение предсказаний

подтверждает, что Random Forest уверенно различает периоды низкой и высокой нагрузки, что делает её надёжным инструментом для применения в системах мониторинга качества воздуха в реальном времени.

Таблица 1 – Сравнительные метрики качества моделей классификации

	Accuracy	Precision	Recall	F1
Logistic Regression	0.772622	0.424631	0.335995	0.297632
Random Forest	0.952436	0.611319	0.642505	0.625737
Decision Tree	0.954756	0.611575	0.644837	0.626939
XGBoost	0.954756	0.611575	0.644837	0.626939

Для количественной оценки ошибок классификации была построена матрица ошибок для модели XGBoost (рис. 4). Она показала, что алгоритм с высокой точностью распознаёт интервалы низкой загрязнённости: доля верных классификаций превышает 94%. Наибольшее число ошибок наблюдается при классификации интервалов со средней загрязнённостью: часть таких случаев отнесена к категории «низкие», часть – к «высокие». Это объясняется значительным перекрытием диапазонов концентраций CO_2 и $PM_{2.5}$ между указанными классами. Для интервалов высокой загрязнённости модель достигает более чем 70% правильных классификаций, что можно считать удовлетворительным результатом для задачи с тремя классами и сравнительно ограниченным объёмом исходных данных.

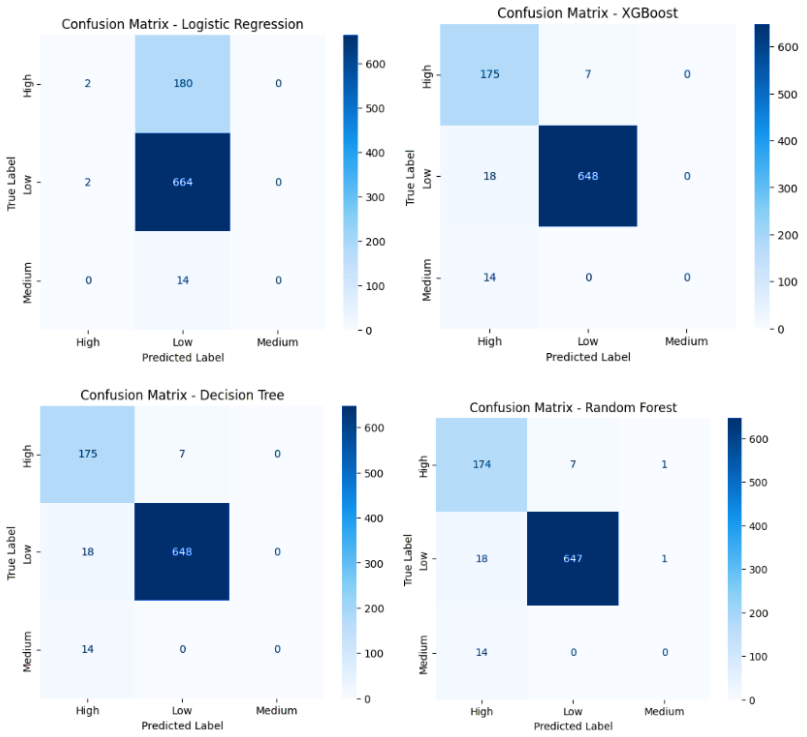


Рисунок 4 – Матрицы ошибок для различных моделей классификации

На рисунке 5 представлена корреляционная матрица, отражающая взаимосвязи между всеми измеренными параметрами. Наиболее сильная зависимость наблюдается между концентрациями PM_{10} и $PM_{2.5}$ (r = 0.97), что подтверждает их общую природу и согласованное поведение в условиях городской транспортной среды. Существенная положительная корреляция выявлена между содержанием CO_2 и относительной влажностью (r = 0.44), что связано с накоплением углекислого газа и увеличением влажности при высокой плотности пассажиропотока. Температура, напротив, демонстрирует отрицательную корреляцию с влажностью (r = -0.39) и eTVOC (r = -0.34), что отражает физико-химические процессы сорбции и испарения органических соединений. Временной фактор (Time) показывает отрицательную зависимость от CO_2 (r = -0.48), указывая на тенденцию снижения концентраций в ходе эксперимента благодаря естественному проветриванию и изменению пассажиропотока.

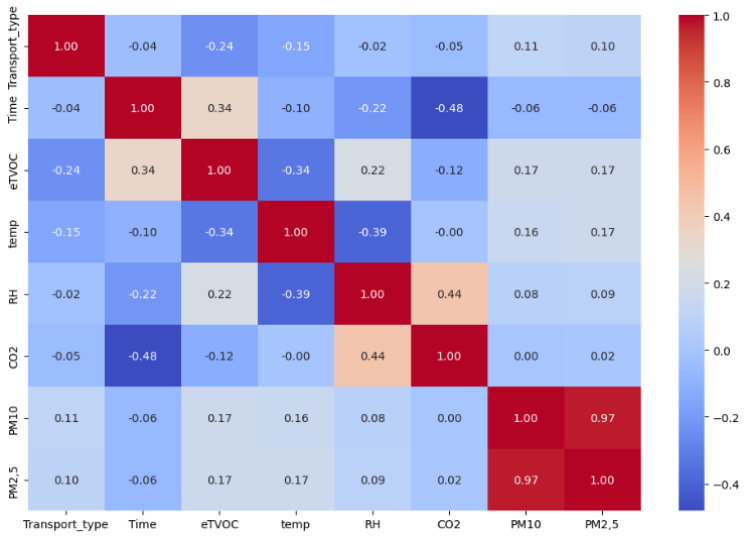


Рисунок 5 – Матрица корреляции признаков

Таким образом, корреляционный анализ позволил выделить ключевые группы взаимосвязанных параметров, наиболее значимых для построения моделей классификации и прогнозирования качества воздуха. Результаты дают основания для нескольких важных выводов. Во-первых, качество воздуха в автобусах Алматы демонстрирует устойчивую зависимость от уровня пассажиропотока, что требует разработки стратегий по оптимизации вентиляции, особенно на наиболее загруженных маршрутах. Во-вторых, параметры CO_2 и $PM_{2.5}$ выступают надёжными индикаторами текущего состояния воздушной среды и могут быть использованы при создании автоматических систем оповещения и регулирования воздухообмена. Наконец, показано, что даже на основе сравнительно простых IoT-узлов возможно построение предсказательных моделей, способных с высокой точностью классифицировать периоды с различной нагрузкой, что открывает путь к интеграции подобных решений в интеллектуальную транспортную инфраструктуру города.

Обсуждение

Наши результаты наглядно показывают, что качество воздуха в автобусах Алматы заметно ухудшается именно в часы пик, а характер загрязнения носит резкий, «пульсирующий» характер, совпадающий с увеличением пассажиропотока. Этот вывод особенно важен для оценки реальных рисков для здоровья, поскольку усреднённые замеры часто скрывают кратковременные, но интенсивные всплески концентраций CO_2 и твёрдых частиц [17, 18]. Выявленные закономерности согласуются с результатами исследований, проведённых в Венгрии и Нигерии, где перенаселённость салонов также признана основным фактором ухудшения качества воздуха [19, 20]. Вклад нашей работы заключается в применении данных с высоким временным разрешением, что позволило отследить изменения параметров в ходе поездки и точно зафиксировать периоды наибольшего воздействия загрязнителей. Такой подход дополняет выводы систематических обзоров и исследований, выполненных в других городах с аналогичной транспортной инфраструктурой, например, в Цзинане [21]. Использование доступного по стоимости IoT-устройства Tynys показало, что подобные технологии способны обеспечить надёжный и оперативный мониторинг качества воздуха при умеренных затратах [15, 22]. Проведённый корреляционный анализ подтвердил ключевую роль параметров CO_2 и $PM_{2.5}$ как наиболее информативных индикаторов, устойчиво связанных с пассажиропотоком и динамикой воздухообмена [23]. Эти параметры не только демонстрируют сильную корреляцию с другими факторами (например, влажностью и временем наблюдений), но и оказываются определяющими в моделях классификации. Сравнительный анализ алгоритмов показал, что традиционная Logistic Regression ограничена в способности выявлять сложные нелинейные зависимости и продемонстрировала наименьшую точность (≈0.77) [24]. Более сложные модели, включая Decision Tree, Random Forest и XGBoost, превысили порог 95% accuracy [25, 26]. При этом. Random Forest обеспечил наиболее сбалансированные метрики (accuracy = 0.9524, precision = 0.6113, recall = 0.6425, F1 = 0.6257), что подтверждается распределением ошибок в confusion matrix. XGBoost также показал высокую точность, особенно для интервалов низкой

загрязнённости (>94%), хотя при классификации средней загрязнённости возникали ошибки из-за перекрытия диапазонов CO_2 и $PM_{2.5}$. В целом полученные результаты подтверждают, что даже на основе сравнительно простых IoT-узлов можно строить надёжные предсказательные модели для мониторинга качества воздуха в реальном времени. Тем не менее, исследование имеет ряд ограничений. Данные были собраны только на девяти маршрутах и в двух временных окнах одного месяца (апрель 2025 г.), что не позволяет учесть сезонную и суточную изменчивость загрязнения. Влияние внешних факторов, включая погодные условия, режимы работы вентиляции и возраст подвижного состава, не контролировалось. Кроме того, хотя перед измерениями проводилась калибровка устройства, вопросы долгосрочного дрейфа сенсоров и их чувствительности к температуре и влажности остались за пределами данного анализа. Несмотря на эти ограничения, результаты исследования могут служить основой для практических мер. В краткосрочной перспективе приоритетными являются модернизация вентиляции и фильтрации, оптимизация пассажиропотоков и снижение переполненности салонов в часы пик за счёт корректировки расписания и увеличения числа транспортных единиц. В долгосрочной перспективе целесообразно внедрить системы постоянного мониторинга качества воздуха на наиболее загруженных автобусных маршрутах, что позволит принимать решения, основанные на данных, и снижать риски для здоровья пассажиров. В совокупности это открывает возможности интеграции подобных решений в интеллектуальную транспортную инфраструктуру города и создания систем адаптивного управления вентиляцией на основе IoT и методов машинного обучения.

Заключение

Проведённое исследование стало первым систематическим анализом качества воздуха в автобусах Алматы с высоким временным разрешением. Его результаты подтверждают, что пассажиропоток является ключевым фактором, определяющим динамику загрязнителей в замкнутых транспортных пространствах, а кратковременные пики концентраций указывают на необходимость пересмотра подходов к оценке риска.

Научная значимость работы заключается в создании доступной и масштабируемой IoT-системы мониторинга, интегрируемой в инфраструктуру «умного города» и обеспечивающей непрерывный сбор данных и анализ в реальном времени. Использование методов машинного обучения позволило выявить наиболее надёжные индикаторы загрязнённости и подтвердить эффективность моделей предсказания. Сравнительный анализ алгоритмов показал устойчивость полученных результатов и подтвердил возможность практического применения подхода. При этом исследование имеет определённые ограничения, связанные с выбором маршрутов и временными рамками наблюдений, что требует дальнейшего расширения эксперимента и учёта сезонных и эксплуатационных факторов. Несмотря на это, полученные результаты уже могут служить основой для разработки стратегий по улучшению вентиляции, оптимизации пассажиропотоков и снижению воздействия загрязнителей на здоровье населения, а в долгосрочной перспективе – для внедрения систем интеллектуального мониторинга и управления качеством воздуха в городском транспорте.

Список литературы

1. Systematic Review of Indoor Environmental Quality in Passenger Transport Vehicles of Tropical and Subtropical Regions / J.O. Ogundiran et al // Atmosphere. – 2025. – № 16. – P. 140. https://www.researchgate.net/publication/388417443_A_Systematic_Review_of_Indoor_Environmental_Quality_in_Passenger_Transport_Vehicles_of_Tropical_and_Subtropical_Regions.
2. Environmental Monitoring in Bus Transportation Using a Developed Measurement System / A. Todorov et al // Urban Sci. – 2023. – № 7. – P. 90. https://doi.org/10.3390/urbansci7030090.
3. Review of Scientific Technology-Based Solutions for Vehicular Pollution Control. Clean Technol / S. Gulia et al // Environ. Policy. – 2020. – № 22. – P. 1955-1966. https://doi.org/10.1007/s10098-020-01952-6.
4. Prototype of Monitoring Transportation Pollution Spikes through the Internet of Things Edge Networks / E. Nizeyimana et al // Sensors. – 2023. – № 23. – P. 8941. https://doi.org/10.3390/s23218941.

5. Wang Y.-C. Efficient Data Gathering and Estimation for Metropolitan Air Quality Monitoring by Using Vehicular Sensor Networks / Y.-C. Wang, G.-W. Chen // IEEE Trans. Veh. Technol. – 2017. – № 66. – P. 7234-7248. https://doi.org/10.1109/TVT.2017.2655084.
6. Ventilation Strategies for Highly Occupied Public Environments: A Review / Y. Zhang et al // Buildings. – 2023. – № 13. – P. 1642. https://doi.org/10.3390/buildings13071642.
7. CFD Investigation of Vehicle's Ventilation Systems and Analysis of ACH in Typical Airplanes, Cars, and Buses / B. Pirouz et al // Sustainability. – 2021. – № 13. – P. 6799. https://doi.org/10.3390/su13126799.
8. Innovative High-Induction Air Diffuser for Enhanced Air Mixing in Vehicles and Personalized Ventilation Applications / F.I. Bode et al // Energies. – 2024. – № 17. – P. 2930. https://doi.org/10.3390/en17122930.
9. Implementation of IoT-Based Air Quality Monitoring System for Investigating Particulate Matter (PM10) in Subway Tunnels / J.H. Jo et al // Int. J. Environ. Res. Public Health. – 2020. – № 17. – P. 5429. https://doi.org/10.3390/ijerph17155429.
10. Xu B. Air Quality Inside Subway Metro Indoor Environment Worldwide: A Review / B. Xu, J. Hao // Environ. Int. – 2017. – № 107. – P. 33-46. https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.06.016.
11. Numerical Analysis of Air Quality Improvement and Thermal Comfort in a Classroom Using Organic Air Cleaners / E. Cruz-Octaviano et al // Atmosphere. – 2025. – № 16. – P. 727. https://doi.org/10.3390/atmos16060727.
12. The Impact of Urban Transportation Infrastructure on Air Quality / Y. Guo et al // Sustainability. – 2020. – № 12. – P. 5626. https://doi.org/10.3390/su12145626.
13. Exposure to $PM_{2.5}$ on Public Transport: Guidance for Field Measurements with Low-Cost Sensors / K. Fameli et al // Atmosphere. – 2024. – № 15. – P. 330. https://doi.org/10.3390/atmos15030330.
14. South Coast Air Quality Management District (SCAQMD). Field Evaluation: Qingping Air Monitor; SCAQMD: Diamond Bar, CA, USA, 2023. Available online: https://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/qingping---air-monitor---field-evaluation.pdf (accessed on 9 June 2025).
15. Long-Term Field Evaluation of the Plantower PMS Low-Cost Particulate Matter Sensors / T. Sayahi et al // Environ. Pollut. – 2019. – № 245. – P. 932-940. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.11.065.
16. Study on Dynamic Load of Air-Conditioning System in Subway Station Based on Hourly Passenger Flow / L. Wang et al // Buildings. – 2023. – № 13. – P. 2349. https://doi.org/10.3390/buildings13092349.
17. Urban Air Quality Comparison for Bus, Tram, Subway and Pedestrian Commutes in Barcelona / T. Moreno et al // Environ. Res. – 2015. – № 142. – P. 495-510.
18. How Can Ventilation Be Improved on Public Transportation Buses? Insights from CO_2 Measurements / X. Querol et al // Environ. Res. – 2022. – № 205. – P. 112451. https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112451.
19. Case Studies of Aerosol Pollution in Different Public Transport Vehicles in Hungarian Cities. / E. Papp et al // Atmosphere. – 2022. – № 13. – P. 692. https://doi.org/10.3390/atmos13050692.
20. Indoor Environmental Quality Assessment of Train Cabins and Passenger Waiting Areas: A Case Study of Nigeria / J.O. Ogundiran et al // Sustainability. – 2023. – № 15. – P. 16533. https://doi.org/10.3390/su152316533.
21. Change in Air Quality during 2014-2021 in Jinan City in China and Its Influencing Factors. Toxics. – 2023. – № 11. – P. 210. https://doi.org/10.3390/toxics11030210.
22. Kaivonen S. Real-time Air Pollution Monitoring with Sensors on City Bus / S. Kaivonen, E.C.-H. Ngai // Digit. Commun. Netw. – 2020. – № 6. – P. 23-30. https://doi.org/10.1016/j.dcan.2019.03.003.
23. Indoor Air Quality in Subway Microenvironments: Pollutant Characteristics, Adverse Health Impacts, and Population Inequity / S. Wang et al // Environ. Int. – 2024. – № 190. – P. 108873. https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108873.
24. Development and Validation of a Logistic Regression Model for the Diagnosis of Colorectal Cancer / C. Li et al // Sci. Rep. – 2025. – № 15. – P. 14759. https://doi.org/10.1038/s41598-025-14759-3.

25. Predictive Modeling of Air-Quality Levels Using Decision Tree Classification: Insights from Environmental and Demographic Factors / I.G. Sudipa et al // Indones. J. Data Sci. – 2024. – № 5. – P. 251-258.
26. Prediction of Cardiovascular Disease Based on Multi-Feature Selection and XGBoost Optimisation / H. Zhang et al // Sci. Rep. – 2025. – № 15. – P. 96520. https://doi.org/10.1038/s41598-025-96520-7.

Финансирование

Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (Грант ИРН BR24993051).

А.Н. Молдагулова[1], Д.Н. Тұрмаханбет[2,3]*, М.А. Мауленбеков[1,3], Ж.Б. Кальпеева[1], Р.К. Ускенбаева[1]
[1]Қ.И. Сатпаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті,
050013, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Сатпаев көшесі 22
[2]Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,
050040, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., әл-Фараби даңғылы, 71
[3]ТОО «Kazakhstan R&D Solutions»,
050056, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Кожедуба көшесі, 3
*email: turmahanbetdinara@gmail.com

АЛМАТЫ АВТОБУСТАРЫНДАҒЫ АУАНЫҢ САПАСЫН IOT-ҚҰРЫЛҒЫЛАР МЕН МАШИНАЛЫҚ ОҚЫТУ ӘДІСТЕРІН ҚОЛДАНА ОТЫРЫП МОНИТОРИНГТЕУ

Қоғамдық көліктегі ауаның сапасы – қала тұрғындарының денсаулығына тікелей әсер ететін маңызды фактор, алайда Алматы үшін бұл мәселе бүгінгі күнге дейін жеткілікті деңгейде зерттелмеген. Осы зерттеуде қаланың үш негізгі көлік дәлізіндегі автобустарда CO_2, $PM_{2.5}$, PM_{10}, температура және салыстырмалы ылғалдылық концентрациялары жүйелі түрде бақыланды. Мәліметтерді жинау жоғары сенімділікті қамтамасыз еткен, коммерциялық эталонды сенсорға калибрленген «Tynys» атты мобильді IoT-құрылғының көмегімен жүзеге асырылды. Негізгі назар жолаушылар көп болатын және аз болатын уақыттарды салыстыруға аударылды, бұл көліктің жүктелу деңгейіне байланысты ауаның сапасының өзгеру заңдылықтарын анықтауға мүмкіндік берді. Талдау нәтижелері таңғы қарбалас уақытта CO_2 мен ұсақ дисперсті бөлшектер концентрациясы айтарлықтай жоғары болатынын көрсетті, бұл жолаушылар ағынының салондағы ауаның сапасын қалыптастырудағы басты рөлін дәлелдейді. Қосымша түрде машиналық оқыту әдістерін қолдану арқылы CO_2 мен $PM_{2.5}$ ең ақпаратты индикаторлар екендігі, яғни жоғары жүктелген кезеңдерді сенімді түрде жіктеуге мүмкіндік беретіні анықталды. Алынған нәтижелер Орталық Азия аймағындағы қоғамдық көліктегі ауаның сапасы жөніндегі ғылыми олқылықты толықтырады және желдету жүйелерін жаңғыртуға, жолаушылар ағынын оңтайландыруға және автобустарда микроклиматты интеллектуалды бақылау технологияларын енгізуге бағытталған болашақ зерттеулерге негіз қалайды.

Түйін сөздер: *қоғамдық көлік; ауаның сапасы; CO_2; $PM_{2.5}$; PM_{10}; IoT-құрылғы; машиналық оқыту; желдету; жолаушылар ағыны; микроклимат; интеллектуалды көлік*

A.N. Moldagulova[1], D.N. Turmakhanbet[2,3]*, M.A. Maulenbekov[1,3], Zh.B. Kalpeyeva[1], R.K. Uskenbayeva[1]
[1]Satbayev University, 050013, Republic of Kazakhstan, Almaty, 22 Satpayev str.
[2]Al-Farabi Kazakh National University, Republic of Kazakhstan, Almaty
050040, Republic of Kazakhstan, Almaty, 71 Al-Farabi Avenue
[3]LLP «Kazakhstan R&D Solutions»,
050056, Republic of Kazakhstan, Almaty, 3 Kozheduba str.
*email: turmahanbetdinara@gmail.com

AIR QUALITY MONITORING IN ALMATY BUSES USING IOT DEVICES AND MACHINE LEARNING METHODS

Air quality in public transport is a critical factor directly affecting urban health, yet for Almaty this issue has remained understudied until now. In this study, a systematic monitoring of CO_2, $PM_{2.5}$, PM_{10}, temperature, and relative humidity concentrations was conducted in buses across three key transport corridors of the city. Data collection was carried out using a mobile IoT device of our own design, «Tynys», calibrated against a commercial reference sensor to ensure high measurement reliability. Special attention was paid to comparing peak and off-peak hours, which allowed us to identify patterns of air quality changes under varying passenger

loads. The analysis showed that during morning peak hours, CO_2 and fine particulate matter concentrations significantly exceeded off-peak levels, confirming the key role of passenger flow in shaping in-vehicle air quality. Additionally, by applying machine learning methods, it was established that CO_2 and $PM_{2.5}$ are the most informative indicators of pollution, enabling reliable classification of high-load periods. The obtained results fill an existing research gap in studies of air quality in public transport in Central Asia and provide a basis for further work aimed at modernizing ventilation systems, optimizing passenger flows, and implementing intelligent microclimate monitoring technologies in buses.

Key words: *public transport; air quality; CO_2; $PM_{2.5}$; PM_{10}; IoT device; machine learning; ventilation; passenger flow; microclimate; intelligent transport*

Авторлар туралы ақпарат

Айман Николаевна Молдагулова – доцент, профессор-зерттеуші, Қ.И. Сатпаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы; e-mail: a.moldagulova@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1596-561X.

Динара Нұрланқызы Тұрмаханбет* – бакалавр 4 курс студенті, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы; e-mail: turmahanbetdinara@gmail.com.

Марлен Амантайұлы Мауленбеков – бакалавр 4 курс студенті, Қ.И. Сатпаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы; e-mail: m.maulenbekov@stud.satbayev.university.

Жулдыз Бейшеналиевна Кальпеева – Ph.D, доцент, Қ.И. Сатпаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы; e-mail: z.kalpeyeva@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4970-3095.

Раиса Кабиевна Ускенбаева – доктор технических наук, профессор, Қ.И. Сатпаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы; e-mail: r.k.uskenbayeva@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8499-2101.

Сведения об авторах

Айман Николаевна Молдагулова – доцент, профессор-исследователь, Казахский национальный технический исследовательский университет имени К.И. Сатпаева, Алматы; e-mail: a.moldagulova@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1596-561X.

Динара Нұрланқызы Тұрмаханбет* – студентка 4 курса бакалавриата, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы; e-mail: turmahanbetdinara@gmail.com.

Марлен Амантайулы Мауленбеков – студент 4 курса бакалавриата, Казахский национальный технический исследовательский университет имени К.И. Сатпаева, Алматы; e-mail: m.maulenbekov@stud.satbayev.university.

Жулдыз Бейшеналиевна Кальпеева – PhD, доцент, Казахский национальный технический исследовательский университет имени К.И. Сатпаева, Алматы; e-mail: z.kalpeyeva@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4970-3095.

Раиса Кабиевна Ускенбаева – доктор технических наук, профессор, Казахский национальный технический исследовательский университет имени К.И. Сатпаева, Алматы; e-mail: r.k.uskenbayeva@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8499-2101.

Information about the authors

Aiman Nikolaevna Moldagulova – Associate Professor, Research Professor, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: a.moldagulova@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1596-561X.

Dinara Nurlankyzy Turmakhanbet* – 4th year Bachelor's student, Al Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: turmahanbetdinara@gmail.com.

Marlen Amantayuly Maulenbekov – 4th year Bachelor's student, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: m.maulenbekov@stud.satbayev.university.

Zhuldyz Beishenalievna Kalpeyeva – Ph.D, Associate Professor, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: z.kalpeyeva@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4970-3095.

Raisa Kabievna Uskenbayeva – Doctor of Technical Sciences, Professor,Satbayev University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: r.k.uskenbayeva@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8499-2101.

Поступила в редакцию 20.09.2025
Поступила после доработки 28.11.2025
Принята к публикации 05.01.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-20

IRSTI: 06.52.13

CC BY 4.0
Check for updates

A. Tynykulova[1]*, A. Bekenova[2], Y. Yerbayev[2], I. Bapiyev[2], K. Bakenova[3]
[1]Astana International University,
010000, Republic of Kazakhstan, Astana, Kabanbay batyr avenue, 8
[2]West Kazakhstan Agricultural and Technical University named after Zhangir Khan,
090009, Republic of Kazakhstan,West Kazakhstan Region, Uralsk city, Zhangir Khan Street, 51
[3]L.N. Gumilyov Eurasian National University,
010000, Republic of Kazakhstan, Astana city, 2 Satbaev st.
*e-mail: asem_110981@mail.ru

APPLICATION OF ECONOMIC AND MATHEMATICAL MODELING FOR MANAGING THE PRODUCTION AND ECONOMIC ACTIVITIES OF AGRICULTURAL ENTERPRISES

Abstract: *For the purposes of long-term and strategic planning of the country's food security, the optimal use of land resources represents one of the key tasks of modern agricultural management. Efficient allocation and rational involvement of land in economic circulation form the foundation of a sustainable food balance, reduce dependence on external factors, and enhance the adaptive capacity of the agricultural sector to changing climatic and economic conditions.*

From a scientific standpoint, the careful use of land resources is not just a way to raise agricultural productivity. It also plays a key role in strengthening a country's overall food security. When land is managed wisely, it helps maintain a realistic balance between economic goals, environmental limitations, and the needs of rural communities. This balance is essential for the long-term stability of agricultural landscapes and for supporting sustainable development in rural regions.

This study is aimed at developing an economic and mathematical model for managing the production and economic activities of agricultural enterprises specializing in livestock farming. The article examines forecasting, planning, and optimization methods aimed at increasing the profitability of agricultural enterprises, improving feed production, and preserving soil fertility. Implementation of the proposed model will make it possible to minimize risks, enhance the efficiency of land resource management, and contribute to the sustainable development of agriculture.

Key words: *economic and mathemeatical modeling, management, prodconomic and mathemeatical modeling, management, production and economic activity, agricultural enterprises, land resources, planning, optimization, efficiency criteria.*

Introduction

Modern agriculture operates under conditions of substantial uncertainty driven by shifting climatic parameters, volatile market prices, limited resource availability, and rising production costs. Within this context, the application of economic-mathematical modeling becomes an essential tool for evidence-based managment of production and economic processes. Such models provide a framework for quantitatively assessing the interactions among production, economic, and environmental-climatic factors, thereby supporting the development of optimal management strategies. This includes improving decision-making in resource allocation, crop structure planning, forage production organization, and the regulation of livestock systems [1-2].

Economic-mathematical modeling alsi provides a basis for determining the optimal balance among labor, land, material, and financial resources, enabling producers to minimize production costs and icrease costs and increase output per unit of input. One of the key areas of application of such models is the forecasting of economic performance in agricultural enterprises. Through mathematical analysis, it becomes possible to evaluate the consequences of alternative development scenarios in advance, estimate expected yields, production costs, and profitability under shifting market or environmental conditions.

Another important function of these models involves reducing production and financial risks. Modeling tools make it possible to identify critical factors that contribute to instability within production cyckes and develop adaptive strategies aimed at enchancing the resilience of agricultural sector by

A. Tynykulova, A. Bekenova, Y. Yerbayev, I. Bapiyev, K. Bakenova, 2026

supporting rational land and natural resource use, promoting long-term soil fertility preservation, and reinforcingnational food security [3].

The adoption of this approach not only increases the economic efficiency of agricultural production but also establishes scientifically grounded prerequisites for transitioning toward a more sustainable, stable, and competitive model of agrarian developmant.

One of the persistent challenges in Kazakhstans agricultural sector is the limited level of funding allocated to scientific research. In many developed countries, agricultural science receives substantial state and private-sector investment; for example, annual public support for agricultural research in the United States exceeds USD 1 billion. In comparison with developed economies, Kazakhstan continues to experience a number of structural limitations that constrain the large-scale deployment of innovative technologies and impede the effective commercialization of research results. These systemic challenges significantly delay the practical application of advanced economic and mathematical tools in the management of agricultural enterprises, thereby limiting the sector's overall competitiveness and technological modernization [4-5].

Economic and mathematical modeling serves as an essential analytical mechanism for agricultural management, providing structured tools for optimizing planning processes, allocating resources efficiently, and forecasting key economic indicators. Contemporary scientific literature presents a broad range of modeling approaches applied to agricultural systems. In particular, studies by S.N. Volkov, V.D. Kiryukhin, and A.A. Varlamov emphasize macroeconomic modeling frameworks aimed at analyzing and forecasting the development of the agro-industrial sector at the national level. However, such approaches are largely oriented toward state regulation and strategic planning, offering limited applicability for operational management and decision-making at the level of individual agricultural enterprises.

The design of effective management models for agricultural enterprises in Kazakhstan must be grounded in several fundamental methodological principles. First, a systems-based perspective is required to ensure an integrated assessment of production, economic, and environmental interdependencies. Second, the proposed models should exhibit sufficient flexibility to allow for the evaluation of alternative production and market scenarios under changing external conditions. Third, decision-making processes must be guided by optimization principles that rely on formalized mathematical methods and quantitative performance criteria.

According to the classification developed by V.E. Kulikov, economic and mathematical models can be differentiated across multiple dimensions. Based on their functional orientation, models are divided into theoretical-analytical frameworks, which investigate underlying economic patterns, and applied models designed to address specific managerial objectives. From the perspective of analytical scale, models may operate at the microeconomic level, focusing on enterprise-level decision-making, or at higher levels associated with sectoral regulation. In terms of methodological structure, models may take the form of optimization systems, simulation-based approaches, or game-theoretic models capable of reflecting competitive dynamics and risk-related interactions.

Within the scope of this study, an economic and mathematical management model is developed with consideration of the structural characteristics of Kazakhstan's agricultural sector, encompassing both crop production and livestock farming. The proposed framework integrates several core analytical elements, including: optimization of crop allocation to support balanced forage production; forecasting of economic performance based on historical data and trend analysis; assessment of climatic and meteorological impacts on productivity and resource utilization; and evaluation of profitability under alternative land-use and management strategies.

The practical implementation of the proposed model is expected to reduce managerial uncertainty and enhance the quality of decision-making processes within agricultural enterprises. In the long term, this approach may contribute to strengthening economic sustainability, improving operational efficiency, and increasing resilience to external environmental and market-related risks.

Methodology of Related Work

In examining existing approaches to optimization in agricultural management, T.N. Belov emphasizes that traditional modeling practices in the sector predominantly rely on economic-mathematical models aimed at improving isolated technological processes such as the allocation of mineral fertilizers, the planning of machine and tractor fleets, and other narrowly focused operations [6]. Contemporary studies largely support this observation: many researchers continue to develop models that address only specific segments of production and economic activity. However, the

absence of an integrated systems perspective significantly limits the practical applicability and overall effectiveness of such methods.

A strategically important direction in the optimization of agricultural management involves constructing models that ensure a coherent balance between herd age structure, scientifically grounded feeding regimes, efficient organization of forage production, and the capacity of livestock enterprises to meet their feed requirements under conditions of restricted land resources. Solving these interrelated tasks in a coordinated manner enhances reproductive performance, increases livestock productivity, and contributes to achieving superior economic outcomes.

Focusing solely on localized managerial tasks without considering the systemic interconnections among various components of agricultural production does not allow the shortcomings of traditional approaches to be adequately addressed. Ultimately, this lack of integration undermines the overall economic efficiency and sustainability of agricultural enterprises [7].

One of the major challenges in constructing management models for the agricultural sector lies in accounting for the multifactorial nature of the production environment. The variables influencing the production and economic performance of agricultural enterprises may be grouped into several broad categories:

1. Environmental and climatic conditions, including soil productivity, thermal characteristics, precipitation patterns, and other relevant meteorological variables that influence agricultural output.
2. Biological determinants, which comprise the biological properties of cultivated plant species, the quality and viability of seed material, as well as the genetic potential and physiological traits of livestock.
3. Zootechnical characteristics, reflecting herd size and structure, the condition and sufficiency of the feed base, and the effectiveness of feeding and animal maintenance systems.
4. Agrotechnical parameters, encompassing crop rotation practices, scheduling and methods of agricultural operations, and the degree of technical equipment and mechanization employed in production processes.
5. Economic and organizational factors, including the structure of production management, availability and utilization of machinery, labor resources, and financial support mechanisms.

A second significant methodological issue in economic-mathematical modeling concerns the selection of an appropriate optimality criterion. The scientific literature presents a variety of approaches to defining objective functions. N.Ya. Pridatko and V.I. Rotar emphasize minimizing labor inputs andmaximizing the diversity of agricultural outputs [7]. D.B. Yudin proposes minimizing the absolute deviation of net income from its average expected value [8].Ts.E. Bochvarov suggests maximizing enterprise net income while explicitly incorporating expected economic gains and risks, associated with shortages or surpluses of labor resources [9].

Notwithstanding the conceptual diversity of existing approaches, profitability continues to be the most widely used optimality criterion in economic-mathematical models applied to the management of agricultural enterprises. This indicator remains central due to its direct relevance to assessing economic efficiency and managerial performance.

With the aim of identifying an optimal management solution, the present study proposes an economic-mathematical model focused on enhancing production and economic decision-making in agricultural enterprises with a specialization in livestock production [10–11]. The core objective of the model is to maximize gross income, defined as the difference between the total value of produced output and the cumulative material expenditures incurred during its production over a planning horizon of L years following the base period. The base year corresponds to the point at which the optimization procedure is initiated.

An analysis of existing economic-mathematical models designed to support managerial decisions in agricultural production reveals a number of methodological limitations. These deficiencies indicate the need for a more comprehensive and structurally refined modeling framework capable of capturing the specific features of agricultural systems.

The most significant shortcomings identified in prior studies include the following:

– Inadequate consideration of land resource characteristics. Many models do not sufficiently account for key land parameters, including soil composition and its classification into agro-groups based on qualitative indicators; the historical use of individual land plots, which directly affects soil

productivity and yield potential; and the duration of uninterrupted cultivation of specific crops on the same fields, a factor that plays a crucial role in maintaining soil fertility.

– Insufficient attention to long-term crop planning. A number of existing approaches neglect crop rotation requirements and scientifically justified rotational farming principles, resulting in inefficient land utilization and reduced sustainability of production systems.

– Excessive simplification of production processes. In several cases, mathematical descriptions of agricultural production are overly generalized or conceptually inaccurate, which can distort analytical outcomes and lead to suboptimal management decisions.

Economic-mathematical modeling remains a highly effective tool for strengthening the financial stability and operational efficiency of agricultural enterprises. However, these enterprises typically function under strict limitations related to labor availability, material inputs, financial resources, and access to information. According to official statistics as of January 1, 2024, agricultural organizations in the Ayyrtau District of the North Kazakhstan Region employed approximately 18,000 individuals, representing a decline of nearly 55% compared to 2001.

In the crop production sector, persistent shortages of modern equipment for primary processing continue to pose a serious challenge. These include sorting, washing, packaging machinery, weighing systems, and other essential technological facilities required for efficient post-harvest handling. The restricted availability of high-capacity agricultural machinery, combined with the substantial physical deterioration of existing equipment, limits production expansion, reduces overall sector efficiency, and adversely affects product quality.

As a result, agricultural producers face significant barriers in effectively managing production and economic activities, as well as in adopting advanced scientific developments, innovative technologies, and best agricultural practices within real operational conditions [12–13].

In this context, the development of comprehensive economic–mathematical models becomes essential for conducting an in-depth analysis of the factors that influence production and economic management in agricultural enterprises. Such models must incorporate multi-factor assessments, including indicators of managerial efficiency, profitability levels, and the interdependence between production processes, economic conditions, and natural–environmental variables.

One of the most significant cost-free reserves for maintaining and enhancing soil fertility is the optimization of crop-area structure, which enables rational land use and strengthens the sustainability of agricultural production systems. As part of the search for optimal managerial solutions, the study proposes the development of an economic–mathematical model aimed at improving production and economic management in agricultural enterprises specializing in livestock production.

The model's objective function focuses on maximizing gross income, defined as the difference between the total gross output and the aggregate material costs incurred for its production over *L* years following the base year [14-15]. The base year is considered to be the year in which the optimization procedure is conducted.

Mathematical Formulation:

1. To find the maximum of the objective function

$$L(x) = B(x) - Z(x) \quad (1)$$

where x is a set of positive real numbers

$$x = x_{i,j,k,l,p}, y_{i,l}^{u}, z_{i,l}^{u} \quad (2)$$

$x_{i,j,k,l,p}$– the area allocated to crop *i* on land category *k*, grown *p* years after crop *j* in year *l* [ha];

$y_{i,l}^{u}$ - the volume of crop *i* used as feed for dairy cattle within the farm in year *l* [centners];

$z_{i,l}^{u}$ - the volume of crop *i* used as feed for beef cattle within the farm in year *l* [centners];

$k = 0,1,\dots,K-1$– index of land category;

$i = 0,1,\dots,I-1$– index of the agricultural crop;

$j = 0,1,\dots,I-1,\ j \neq i$– index of the agricultural crop that was grown on the given land plot prior to crop i;

$p = 0,1,\dots,P_i - 1$– number of years crop *i* can be grown on the same plot, equal to $p+1$;

$l = 0,1,\dots,L-1$– number of years after the baseline year for which optimization is performed, equal to $l+1$.

The baseline year corresponds to the formal value $l = -1$.

2. Structure of Gross Income

$$B(x) = \sum_{i,j,k,l,p} P_{i,l}^{(kul)}\left(h_{i,l} - y_{i,l} - z_{i,l}\right) + \sum_{l} P_{l}^{(milk)} g_l + \sum_{l} P_{l}^{(meat)} w_l \quad (3)$$

$P_{i,l}^{(kul)}$ – price of crop *i* in year *l* [thousand KZT per centner];
$h_{i,l}$ – harvested volume of crop *i* in year *l* [centners];
$P_l^{(milk)}$ – price of milk in year *l* [thousand KZT per ton];
g_l – annual milk yield of the dairy herd in year *l* [tons];
$N_l^{(milk)}$ – number of lactating cows in year *l*;
w_l – annual slaughter weight of beef cattle in year *l* [tons].

3. Cost Structure

It will be assumed that the primary expenditures are associated with the production of agricultural crops.

$$Z(x) = \sum_{i,j,k,l,p} C_{i,j,k,l,p}^{(c)} x_{i,j,k,l,p} \quad (4)$$

where $C_{k,i,l}^{(z)}$ denotes the production costs of cultivating crop i on one hectare of land of category k in year l [tg/ga]

A number of external parameters–such as crop yields and market prices—are functions of the index l, i.e., they vary by year and therefore require forecasting based on the data available for the baseline year. Since these forecasts will change annually, the optimization procedure must likewise be repeated every year prior to the sowing season, reflecting updated economic and climatic conditions. Nevertheless, multi-year projections remain valuable, at minimum for accounting for yield variations associated with crop rotation and changes in crop sequence.

One of the key tasks is the formulation of a system of constraints, since at least one feasible solution must exist that satisfies all restrictions proposed by the authors. The general form of the constraints can be expressed as follows:

$$x_{k,i,j,p,l} \geq 0 \quad (5)$$

$y_{i,l} \geq 0$
$z_{i,l} \geq 0$

Constraints on Forage Crop Volumes

The total amount of each forage crop produced must be sufficient to cover the volume required for feeding the livestock. Accordingly, the harvested quantity of each crop must be greater than or equal to the amount allocated for animal feed.

Constraints on Land Resources

In the simplest formulation, the area of land within each category is assumed to remain constant throughout the planning horizon, meaning that the available land resources are fully destignated for agricultural use.

In more advanced formulations, however, it becomes necessary to account for the dynamic evolution of land resources, which plays a critical role in land-use optimization models. A rigorous problem statement requires consideration not only of changes in the total area of agricultural land but also of the redistribution of plots among different crops. In certain simplified scenarios, such redistribution may occur through expansion of arable land at the expense of previously fallow parcels. However, in more complex situations – such as the withdrawal or reallocation of part of the land fund – the process requires a more detailed analytical approach and the incorporation of additional influencing factors [16].

It is important to note that optimization techniques can determine only the aggregate land areas allocated to each crop; they do not provide the spatial allocation of these crops within specific fields. The development of a geographically explicit planting scheme constitutes an independent task that requires supplementary calculations and consideration of agro-landscape characteristics.

In subsequent calculations, it may be assumed that changes in the cultivated area of individual crops – driven by external factors – are known in advance and can be estimated through forecast-based assessments. Nevertheless, in practical applications such adjustments should be revised annually to reflect the current distribution of agricultural land. Within optimization models, however, it is acceptable to treat the total land area of each category as fixed, which contributes to improving the precision and adaptability of management decisions.

Accordingly, the area allocated to perennial crops in each subsequent year cannot exceed the corresponding area from the previous year. This requirement leads to the following constraint:

$$x_{k,i,j,p+1,l+1} \leq x_{k,i,j,p,l} \quad (6)$$

Let us introduce the variable $Y_{i,p}^{(k,l)}$, which represents the area occupied by crop *i* during its *p*-th year of growth. When this condition is satisfied, the total area allocated to crop *i* is sufficient to accommodate all relevant field plots, and, at the same time, these plots entirely fill the assigned area. Both requirements are ensured through the fulfillment of equalities (5).

The set of constraints (5) is sufficient to generate a unique allocation scheme for crop areas for year $l+1$, which is the primary objective. Naturally, this uniqueness is defined only up to the spatial placement of plots within the designated area. However, the geographic positioning of individual fields lies outside the scope of the optimization problem. As noted by researchers [17], procedures aimed at reducing field fragmentation – especially when combined with logistical considerations such as seed transport and crop harvesting – may necessitate adjusting the previously obtained optimal area values. The magnitude of efficiency losses resulting from deviations from the optimal solution should be quantified. Based on these estimates, it must be determined whether such deviations are acceptable in practice.

The following groups of constraints play an essential role within the model:

1. constraints related to pasture area;
2. constraints on feed units required for livestock;
3. requirements for digestible protein for dairy cattle;
4. requirements for digestible protein for beef cattle;
5. area constraints for each agricultural crop.

For any agricultural enterprise, an efficient balance between available resources and the final production outcomes is critical. When resources are insufficient, it becomes impossible to increase the output of crop and livestock production, which limits profit growth. Conversely, when resources are in excessn the costs associated with maintaining them reduce the net profit.

Therefore, identifying an optimal solution necessitates improving managment practices and optimizing production and economic activities. The economic-mathematical model proposed in this study is designed to support such optimization and to ensure the balanced and efficient utilization if available resources.

Results

To assess the efficiency of production and economic management practices in the agricultural sector, the agricultural enterprise «Meiram» was chosen as the empirical research base. The farm is situated in the Ayyrtau District of the North Kazakhstan Region, at a distance of approximately 100 km from the city of Kokshetau.

As is characteristic of many agricultural producers operating in Northern Kazakhstan, the economic activity of the «Meiram» farm is structured around three key areas of specialization:

1. Cattle breeding, primarily dairy production, which represents a major agricultural industry in the region.

2. Cultivation of grain and leguminous crops, including wheat, barley, peas, and other strategically important crops.

3. Production of forage crops and feed harvesting, which ensures stable feed supply and contributes to improved productivity of the cattle herd.

The strategic objective of the farm's development is to increase production volumes and enhance overall profitability. To achieve this, the enterprise is implementing innovative organizational and management technologies, such as automated production processes, digital field-monitoring systems, modern feeding and livestock-management practices, and tools of economic-mathematical modeling.

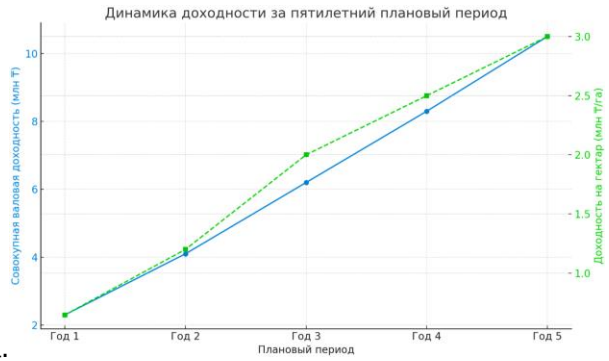
Improving the efficiency of production and economic management is particularly important for the Ayyrtau district, which is classified as a risk-prone agricultural zone. The modeling results, summarized in the key economic indicators, are presented in Table 1.

Analysis of the data presented in Table 1 indicates that the application of the proposed model results in a pronounced improvement in the key indicators of production and economic performance within the agricultural enterprise. The observed upward trend reflects steady strengthening of the farm’s production capacity and a more efficient use of land resources [18]. Over the projected five-year period, the total gross income increases from 2.3 million ₸ to 10.5 million ₸, representing more than a fourfold rise. A similar pattern is evident in profit per unit area, where land profitability grows by more than 4.6 times – from 646.49 thousand ₸/ha to 3 million

Table 1 – Indicators of the Efficiency of Production and Economic Management at «Meiram» Farm

Indicators	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Gross income, million ₸	2,3	3,5	4,9	6,2	8,0	10,5
Land productivity (thousand ₸/ha)	8119,85	9500	10300	11000	12000	13500
Land capacity (ha/million ₸)	0,0001	0,0001	0,00009	0,00008	0,00007	0,00006
Profit per unit area (thousand ₸/ha)	646,49	1100	1400	1800	2300	3000
Crop production output (c/ha) (centners per hectare)	44,69	45,5	46,2	47,0	48,0	50,0
Livestock production output (t/ha)	0,61	0,63	0,65	0,68	0,70	0,75
Land use coefficient	0,89	0,89	0,90	0,91	0,92	0,95
Targeted land use coefficient	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00	1,00

The implementation of the proposed measures for improving production and economic management at the farm level leads to a significant increase in the profitability of agricultural enterprises in both livestock and crop production (Figure 1). These measures make it possible to establish internal production of forage crops in the necessary volumes, thereby ensuring a stable feed base for dairy and beef cattle and contributing to the preservation and enhancement of soil quality [19]. Consequently, the transition to modern management approaches in the agricultural sector facilitates the adoption of sustainable development principles, reduces environmental pressures, and improves the efficiency of land use, ultimately increasing the investment attractiveness of agricultural enterprises.



₸/ha.

Figure 1 – Profitability dynamics over the five-year planning period

To evaluate the robustness of the proposed economic-mathematical model, a sensitivity analysis was conducted by systematically varying the key exogenous parameters that directly influence the objective function and constraint system. In particular, crop yield coefficients were adjusted within the ranges of ±10% and ±20%, output prices were varied by ±15%, and production costs per hectare were modified by ±10%.

For each alternative scenario, the optimization procedure was repeated while preserving the original structure of the constraint system. This approach made it possible to isolate the impact of individual parameter changes on the resulting optimal plan without altering the institutional and technological framework of the model.

The analysis focused on three interrelated dimensions of model behavior: the transformation of crop-area allocation patterns, the variation in gross income as the objective function value, and the degree to which the previously obtained optimal solution remained stable under modified parameter conditions. Such a methodological design allowed for an integrated assessment of both structural and financial sensitivity of the model.

Discussion

Overall, the analysis of the proposed model reveals a stable upward trend in the main economic indicators of agricultural production. The positive dynamics of profitability, productivity, and land-use efficiency confirm that the chosen trajectory of sectoral development is strategically sound. The results demonstrate that through consistent management and the implementation of effective technologies, it is possible not only to overcome periods of decline, but also to ensure sustained growth of Kazakhstan's agricultural sector.

The necessity of applying an economic-mathematical model in agricultural management is primarily driven by the high level of uncertainty that characterizes the modern agrarian economy. Continuous changes in climatic conditions, fluctuations in market prices, limited material and financial resources, and rising production costs require a shift from intuition-based management to scientifically grounded decision-making. In this context, economic–mathematical modeling – integrated into an information system – functions as an effective tool for the systemic analysis and optimization of production and economic processes.

The use of models of this type makes it possible to objectively assess the interrelationships among economic, technological, and natural-climatic factors, thereby supporting the development of rational solutions for crop-structure planning, forage production organization, and livestock management. Mathematical modeling enhances the efficiency of labor, land, and financial resource utilization by determining optimal allocation proportions, reducing costs, and increasing output while maintaining product quality [20-21].

One of the important advantages of employing such models is their capacity to forecast the outcomes of economic activity. Scientifically grounded modeling techniques make it possible to estimate yield levels, production costs, and profitability under varying external conditions, which, in turn, facilitates strategically balanced decision-making [22-23].

Furthermore, modeling enables the identification and mitigation of risk factors that contribute to instability in agricultural production, thereby strengthening the resilience of enterprises to economic and environmental shocks.

In a broader perspective, the introduction of economic-mathematical models contributes to building a sustainable foundation for agricultural development. It supports the rational use of land and natural resources, helps maintain soil fertility, and reinforces national food security.

Conclusion

The development of an information system based on a mathematical model for managing the production and economic activities of livestock-oriented agricultural enterprises represents an important step toward enhancing the resilience and efficiency of the agrarian sector. The model presented in this article is grounded in a systems approach that makes it possible to account for the complex interplay of natural, biological, and economic factors inherent to agricultural production. In addition, the formulation of the model is oriented toward creating an «investment-attractive» profit profile, thereby supporting the goal of mobilizing external financial resources for sectoral development.

The integration of forecasting, planning, and optimization methods within the proposed toolkit provides scientifically grounded support for managerial decision-making, aimed at the rational use of resources, improvement of profitability, and reduction of production risks. Particular emphasis is placed on maintaining a balance between production intensification and the preservation of agroecosystems, which is consistent with the core principles of sustainable agriculture. The research outcomes position the proposed model not only as an effective instrument for both operational and strategic management, but also as a foundation for the integration of modern digital and intelligent technologies into agricultural practice. The results can be used for the design of information-analytical decision support systems at the enterprise level, as well as for the development of evidence-based agricultural policy at regional and national scales.

The findings of this study indicate that the proposed economic-mathematical model is not limited to a single case and can be adapted to other regions with comparable agro-climatic and production conditions. However, successful transfer of the framework requires a substantial effort in assembling high-quality input data, including detailed land-use parameters, feed resources, herd structure, productivity indicators, and local economic constraints. The reliability of forecasting and optimization results strongly depends on the completeness and consistency of these datasets, which often necessitates extensive field surveys, digitization of farm records, and integration of heterogeneous information sources.

Therefore, future work should focus on expanding the empirical database and validating the model across multiple regional contexts to strengthen its generalizability and practical value for long-term agricultural planning.

References

1. Anikyn B.A. Economic and Mathematical Modeling: Textbook / B.A. Anikyn. – Moscow: Yurayt. – 2021. – 352 p.
2. Melnik L.G. Mathematical Models in Agricultural Economics / L.G. Melnik, N.V. Goncharova. – Kharkiv: INZHEK. – 2022. – 248 p.
3. Ponomarev A.I. Optimization Methods in Agricultural Production / A.I. Ponomarev. – Saint Petersburg: Lan'. – 2019. – 304 p.
4. Nurkeeva G.Zh. Modeling of Agricultural Processes: Theory and Practice / G.Zh. Nurkeeva. – Almaty: Kazakh University. – 2018. – 287 p.
5. Tyurina, Yu.N. Agricultural Enterprise Management Based on Mathematical Models / Yu.N. Tyurina. – Moscow: Finance and Statistics. – 2020. – 198 p.
6. Ergozhina M.A. Economic and Mathematical Methods in Agriculture / M.A. Ergozhina. – Nur-Sultan: Economics. – 2021. – 240 p.
7. Khaziev Sh.F. Optimization Models for the Agricultural Sector / Sh.F. Khaziev, V.I. Krutikov – Kazan: Kazan Agrarian University, 2022. – 198 p.
8. Tasbulatova R.Zh. Application of Econometric Models in Agro-Economics / R.Zh. Tasbulatova. – Astana: AIU. – 2020. – 176 p.
9. Ageev A.I. System Analysis and Modeling in the Agro-Industrial Complex / A.I. Ageev, S.V. Emelyanov. – Moscow: Nauka. – 2017. – 352 p.
10. Shumakov S.A. Forecasting and Planning in Agriculture / S.A. Shumakov. – Moscow: Delo. – 2019. – 264 p.
11. Seitimbetova Zh.K. Information Technologies in Agricultural Management / Zh.K. Seitimbetova // Almaty: Bastau. – 2022. – 214 p.
12. Gajendra R.A. Application of Mathematical Models in Precision Agriculture / R.A. Gajendra, V. Singh. – Agricultural Systems. – 2021. – № 194. – P. 103290. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103290.
13. Zhang Y. Optimization Techniques in Agricultural Resource Management / Y. Zhang, H. Wang, D. Li // Computers and Electronics in Agriculture. – 2020. – № 179. – P. 105835. https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105835
14. Garcia F. Mathematical Modeling in Agricultural Economics / F. Garcia, R. Lopez // Journal of Agricultural and Applied Economics. – 2019. – № 51(3). – P. 430-447. https://doi.org/10.1017/aae.2019.17.
15. Khan S. Economic Modeling of Farm Resource Allocation Using Linear Programming / S. Khan, A. Abbas // Agricultural Economics Review. – 2020. – № 23(1). – P. 55-70. https://doi.org/10.22004/ag.econ.316646.
16. Ivanov D.V. Digital Transformation and Modeling in Agroecosystems / D.V. Ivanov, P. Smirnov // Russian Journal of Agricultural and Socio-Economic Sciences. – 2023. – № 2(134). – P. 45-52. https://doi.org/10.18551/rjoas.2023-02.05.
17. OECD. (2021). Farm Management and Economic Modeling in Agricultural Policy Design. Paris: OECD Publishing. https://doi.org/10.1787.
18. FAO. (2020). Economic Models for Sustainable Agricultural Development. Rome: FAO Report. https://doi.org/10.4060/ca8807en.
19. Nazarova S.V. Metody ekonomiko-matematicheskogo analiza v agroekonomike [Methods of Economic and Mathematical Analysis in Agro-Economics] / S.V. Nazarova. – Samara: SGÉU. – 2020. – 183 p.
20. Akhmetova A.R. Agroekonomicheskoe modelirovanie v usloviyakh tsifrovoi transformatsii [Agro-Economic Modeling in the Context of Digital Transformation] / A.R. Akhmetova. – Karaganda: Karaganda University. – 2022. – 170 p.
21. Innovative Approaches in Agricultural Business Modeling / M.N. Dudin et al // International Journal of Agricultural Management. – 2022. – № 6(1). – P. 33-41. https://doi.org/10.5836/ijam/2022-01-33.
22. Talapova, G.K. Matematicheskie modeli otsenki effektivnosti selkhozproizvodstva [Mathematical Models for Assessing the Efficiency of Agricultural Production] / G.K. Talapova. – Kokshetau: Sh. Ualikhanov University. – 2023. – 196 p.
23. Yesimova L.S. (2021). Analiz i modelirovanie ustoychivosti agrarnykh system [Analysis and Modeling of the Stability of Agricultural Systems] / L.S. Yesimova. Uralsk: WKSU. – 2021. – 202 p.

А. Тыныкулова[1*], А. Бекенова[2], Е. Ербаев[2], И. Бапиев[2], К. Бакенова[3]
[1]Астана халықаралық университеті,
010000, Қазақстан Республикасы, Астана қаласы, Қабанбай батыр даңғылы, 8
[2]Жәңгір хан атындағы Батыс Қазақстан аграрлық-техникалық университеті,
090009, Қазақстан Республикасы, Орал қаласы, Жәңгір хан көшесі, 51
[3]Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
010000, Қазақстан Республикасы, Астана қаласы, Сәтбаев көшесі, 2
*e-mail: asem_110981@mail.ru

АУЫЛ ШАРУАШЫЛЫҒЫ КӘСІПОРЫНДАРЫНЫҢ ӨНДІРІСТІК-ЭКОНОМИКАЛЫҚ ҚЫЗМЕТІН БАСҚАРУДА ЭКОНОМИКАЛЫҚ-МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛЬДЕУДІ ҚОЛДАНУ

Елдің азық-түлік қауіпсіздігін перспективалық және стратегиялық жоспарлау мақсатында жер ресурстарын оңтайлы пайдалану қазіргі аграрлық басқарудың негізгі міндеттерінің бірі болып табылады. Жерді тиімді бөлу және оны шаруашылық айналымына ұтымды тарту тұрақты азық-түлік теңгерімін қалыптастырудың негізін қалайды, сыртқы факторларға тәуелділікті төмендетеді және аграрлық сектордың өзгермелі климаттық пен экономикалық жағдайларға бейімделу мүмкіндігін арттырады.

Ғылыми тұрғыдан алғанда, жерді пайдалану жүйесін оңтайландыру тек өндірістік тиімділікті арттыру құралы ғана емес, сонымен қатар ұлттық азық-түлік қауіпсіздігінің стратегиялық элементі болып саналады. Ол экономикалық мүдделер, экологиялық шектеулер және әлеуметтік қажеттіліктер арасындағы тепе-теңдікті қамтамасыз етуге мүмкіндік береді, бұл ауылдық аумақтардың ұзақ мерзімді дамуын және агроэкожүйелердің тұрақты қызметін жоспарлауда ерекше маңызға ие.

Осы зерттеу мал шаруашылығына маманданған ауыл шаруашылығы кәсіпорындарының өндірістік-экономикалық қызметін басқарудың экономикалық-математикалық моделін әзірлеуге бағытталған. Мақалада агроөндіріс табыстылығын арттыруға, жем-шөп өндірісін жетілдіруге және топырақ құнарлылығын сақтауға бағытталған болжау, жоспарлау және оңтайландыру әдістері қарастырылған. Ұсынылған модельді іске асыру тәуекелдерді азайтуға, жер ресурстарын басқарудың тиімділігін арттыруға және ауыл шаруашылығының тұрақты дамуына ықпал етуге мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: *экономикалық-математикалық модельдеу, басқару, өндірістік-экономикалық қызмет, ауыл шаруашылығы кәсіпорындары, жер ресурстары, жоспарлау, оңтайландыру, тиімділік критерийлері.*

А. Тыныкулова[1*], А. Бекенова[2], Е. Ербаев[2], И. Бапиев[2], К. Бакенова[3]
[1]Международный университет Астана,
010000, Республика Казахстан, город Астана, проспект Кабанбай батыра, 8
[2]Западно-Казахстанский аграрно-технический университет имени Жангир хана,
090009, Республика Казахстан, г. Уральск, ул. Жангир хана, 51
[3]Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилёва,
010000, Республика Казахстан, город Астана, улица Сатпаева, 2
*e-mail: asem_110981@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ СЕЛЬСКИХ ХОЗЯЙСТВ

В целях перспективного и стратегического планирования продовольственного обеспечения страны оптимальное использование земельных ресурсов представляет собой одну из ключевых задач современного аграрного управления. Эффективное распределение и рациональное вовлечение земель в хозяйственный оборот формируют основу устойчивого продовольственного баланса, способствуют снижению зависимости от внешних факторов и повышают адаптационные возможности аграрного сектора к изменяющимся климатическим и экономическим условиям.

С научной точки зрения, оптимизация землепользования является не только инструментом повышения производственной эффективности, но и стратегическим элементом национальной продовольственной безопасности. Она позволяет обеспечивать сбалансированное взаимодействие между экономическими интересами, экологическими ограничениями и социальными потребностями, что особенно актуально для долгосрочного планирования развития сельских территорий и устойчивого функционирования агроэкосистем. Настоящее исследование направлено на разработку экономико-математической модели управления производственно-экономической деятельностью сельскохозяйственных предприятий, специализирующихся на животноводстве. В статье рассматриваются методы прогнозирования, планирования и оптимизации, направленные на повышение доходности агропредприятий, улучшение

кормопроизводства и сохранение почвенного плодородия. Реализация предложенной модели позволит минимизировать риски, повысить эффективность управления земельными ресурсами и способствовать устойчивому развитию сельского хозяйства.

Ключевые слова: *экономико-математическое моделирование, управление, производственно-экономическая деятельность, сельскохозяйственные предприятия, земельные ресурсы, планирование, оптимизация, критерии эффективности.*

Авторлар туралы ақпарат

Асемгуль Тыныкулова* – PhD, Астана халықаралық университеті, Ақпараттық технология және инженерий жоғары мектебінің қайымдастырылған профессор м.а., Астана, Қазақстан; e-mail: asem_110981@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4557-6869.

Анаргуль Бекенова – техникалық ғылымдар магистрі, Цифрлық экономика және орнықты даму институтының оқытушысы, «Жәңгір хан атындағы Батыс Қазақстан аграрлық-техникалық университеті» ҚеАҚ, Орал, Қазақстан; e-mail: inabat.77@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2010-1488.

Ербол Ербаев – PhD, «Жәңгір хан атындағы Батыс Қазақстан аграрлық-техникалық университеті» ҚеАҚ, Орал, Қазақстан; e-mail: yerbayev.yerbol@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3186-9994.

Идеят Бапиев – PhD, «Жәңгір хан атындағы Батыс Қазақстан аграрлық-техникалық университеті» ҚеАҚ, Орал, Қазақстан; e-mail: bapiev@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8468-8938.

Камила Бакенова – PhD студент, Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан; e-mail: bakenova.k@bk.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-2567-173X.

Сведения об авторах

Асемгуль Тыныкулова* – PhD, и.о.доцента Высшей школы информационных технологий и инженерий, Международный университет Астана, Астана, Казахстан; e-mail: asem_110981@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4557-6869.

Анаргуль Бекенова – магистр технических наук, преподаватель Института цифровой экономики и устойчивого развития, НАО «Западно-Казахстанский аграрно-технический университет имени Жангир хана», Уральск, Казахстан; e-mail: inabat.77@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2010-1488.

Ербол Ербаев – PhD, и.о. доцента Политехнического института, НАО «Западно-Казахстанский аграрно-технический университет имени Жангир хана», Уральск, Казахстан; e-mail: yerbayev.yerbol@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3186-9994.

Идеят Бапиев – PhD, и.о. доцента Политехнического института, НАО «Западно-Казахстанский аграрно-технический университет имени Жангир хана», Уральск, Казахстан; e-mail: bapiev@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8468-8938.

Камила Бакенова – PhD студент, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан; e-mail: bakenova.k@bk.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-2567-173X.

Information about the authors

Assemgul Tynykulova* – PhD, acting Associate Professor, Astana International University, Astana, Kazakhstan; e-mail: asem_110981@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4557-6869.

Anargul Bekenova – Master of Technical Sciences, Lecturer at the Institute of Digital Economy and Sustainable Development, Non-Commercial Joint-Stock Company «West Kazakhstan Agrarian and Technical University named after Zhangir Khan», Uralsk, Kazakhstan; e-mail: inabat.77@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2010-1488.

Yerbol Yerbayev – PhD, Acting Associate Professor of the Polytechnic Institute, Non-Commercial Joint-Stock Company «West Kazakhstan Agrarian and Technical University named after Zhangir Khan», Uralsk, Kazakhstan; e-mail: yerbayev.yerbol@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3186-9994.

Ideyat Bapiyev – PhD, Acting Associate Professor of the Polytechnic Institute, Non-Commercial Joint-Stock Company «West Kazakhstan Agrarian and Technical University named after Zhangir Khan», Uralsk, Kazakhstan; e-mail: bapiev@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8468-8938.

Kamila Serikovna – PhD student. L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; e-mail: bakenova.k@bk.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-2567-173X.

Received 06.01.2026
Accepted 02.03.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-21

ҒТАХР: 28.15.19

BY 4.0
Check for updates

Ә.Ж. Жамбулатова*, Қ. Әлімхан
Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
010000, Қазақстан Республикасы, Астана қ., Сәтпаев көшесі, 2
*e-mail: aigerimzhambulat@gmail.com

АЙНЫМАЛЫ УАҚЫТ КІДІРІСІ БАР КОММУТАЦИЯЛАНАТЫН СЫЗЫҚТЫҚ ЕМЕС ЖҮЙЕЛЕРДІ КҮЙ-КЕРІ БАЙЛАНЫСПЕН БАСҚАРУ

Аңдатпа: *Бұл мақалада айнымалы уақыт кідірісі бар коммутацияланатын сызықтық емес жүйелердің шығыс бойынша қадағалау мәселесі зерттеледі. Мұндай жүйелер бірнеше ішкіжүйелер арасындағы коммутациямен, сондай-ақ уақыт бойынша өзгеретін кідірістердің болуымен сипатталады, бұл олардың динамикасын едәуір күрделендіреді. Коммутация мен уақыт кідірісінің бірлескен әсері басқару сапасының төмендеуіне, тербелмелі режимдердің пайда болуына және кейбір жағдайларда орнықтылықтың бұзылуына әкелуі мүмкін. Осыған байланысты тиімді басқару заңдарын синтездеу мәселесі қазіргі заманғы басқару теориясындағы өзекті ғылыми міндеттердің бірі болып табылады. Жұмыста күй-кері байланысқа негізделген басқару заңы ұсынылады, ол жүйе шығысының қадағалау сипаттамаларын қамтамасыз етуге бағытталған. Ұсынылған тәсіл сызықтық емес қасиеттер, коммутация және айнымалы уақыт кідірісі жағдайында тұйықталған жүйедегі барлық сигналдардың шектелген күйде қалуын қамтамасыз етеді. Жүйенің орнықтылық қасиеттері мен қадағалау қатесінің динамикасы уақыт кідірісінің жүйе мінез-құлқына әсерін ескеруге мүмкіндік беретін Ляпунов-Красовский функционалдарын қолдану арқылы талданады. Басқару коэффициенттерін дұрыс таңдау коммутация мен уақыт кідірісінің орнықсыздандыратын әсерін азайтуға мүмкіндік беретіні көрсетіледі. Алынған теориялық нәтижелердің дұрыстығын растау мақсатында сандық модельдеу нәтижелері келтіріліп, ұсынылған басқару тәсілінің тиімділігі және оның айнымалы уақыт кідірісі бар коммутацияланатын сызықтық емес жүйелер класына қолдануға жарамдылығы көрсетіледі.*

Түйін сөздер: *коммутацияланатын сызықтық емес жүйелер, күй-кері байланыс, кідірісі бар жүйелер, Ляпунов-Красовский функционалы, шығыс бойынша қадағалау.*

Кіріспе

Сызықтық емес жүйелерді уақыт кідірістері мен коммутация жағдайында басқару қазіргі заманғы басқару теориясындағы негізгі мәселелердің бірі болып табылады [1-3]. Уақыт кідірістері есептеу, байланыс және атқарушы тетіктердің жұмысымен байланысты көптеген инженерлік қолданбаларда табиғи түрде пайда болады және олар жүйенің жұмыс сапасын төмендетіп, тіпті орнықсыздыққа әкелуі мүмкін [2, 6, 7]. Мұндай кідірістер бірнеше ішкіжүйелер арасындағы коммутациямен қатар орын алған жағдайда, жүйені талдау мен басқару заңын жобалау айтарлықтай күрделене түседі [4, 8, 9].

Соңғы жылдары сызықтық емес жүйелерді орнықтыру және қадағалау басқаруы мәселелеріне айтарлықтай көңіл бөлінуде. Ляпунов әдістеріне негізделген күй-кері байланысқа сүйенетін басқару тәсілдері сызықтық емес динамиканы тиімді басқаруға мүмкіндік беретін құралдар ретінде өзін жақсы қырынан көрсетті [3, 4, 8]. Алайда, қолда бар зерттеулердің басым бөлігі кідіріссіз немесе тұрақты кідірісі бар жүйелерге бағытталған және жүйе құрылымы өзгермейді деп ұйғарады [3-6]. Ал айнымалы уақыт кідірісі бар коммутацияланатын сызықтық емес жүйелер, желілік басқару жүйелері, энергетикалық жүйелер және динамикасы қайта бапталатын механикалық жүйелер сияқты практикалық қолданбалардағы маңыздылығына қарамастан, жеткілікті деңгейде зерттелмеген [8-11]. Ал айнымалы уақыт кідірісі бар коммутацияланатын сызықтық емес жүйелер, желілік басқару жүйелері, энергетикалық жүйелер және динамикасы қайта бапталатын механикалық жүйелер сияқты практикалық қолданбалардағы маңыздылығына қарамастан, жеткілікті деңгейде зерттелмеген [8-11]. Соңғы жылдары коммутацияланатын сызықтық емес жүйелер үшін орнықтылық пен басқару мәселелері, соның ішінде айнымалы уақыт кідірісінің әсерін ескеру,

©Ә.Ж. Жамбулатова, Қ. Әлімхан, 2026

бірқатар еңбектерде қарастырылған [11-14]. Дегенмен шығыс бойынша қадағалау мәселесіне арналған зерттеулер саны шектеулі болып отыр.

Қадағалау басқаруының мақсаты жүйе шығысының берілген сигналды қадағалауын қамтамасыз ететін басқару заңын құрастыру болып табылады. Алайда көптеген практикалық жағдайларда модельдік белгісіздіктердің, сыртқы әсерлердің немесе уақыт кідірістің салдарынан қадағалау қатесін нөлге дейін асимптотикалық түрде түрде жеткізу мүмкін болмайды. Осыған байланысты қадағалау қатесінің уақыт өте келе нөлдің өзіне емес, оның кіші маңайындағы аймаққа шоғырлануын қамтамасыз ететін тәсілдер қарастырылады. Мұндай көзқарас әсіресе кідірісі бар және коммутацияланатын жүйелер үшін өзекті, себебі бұл жүйелерде қатаң асимптоталық нәтижелерге қол жеткізу көбіне мүмкін емес.

Сызықтық емес жүйелер үшін қадағалау және реттеу мәселелерін шешу мақсатында кері қадамдау әдісі ,жоғары күшейткішті кері байланыс және динамикалық беттер әдісі сияқты әртүрлі басқару тәсілдері ұсынылған. Алайда бұл әдістерді айнымалы уақыт кідірісі бар коммутацияланатын жүйелерге тікелей қолдану қиындықтар туындатады, себебі коммутация сигналдары мен кешіктірілген күйлер жүйенің динамикасына орнықсыздандыратын әсер етеді. Мұндай әсерлерді ескеру үшін қосымша талдау құралдарын пайдалану қажет. Уақыт кідірісі бар жүйелердің орнықтылық қасиеттерін зерттеуде Ляпунов-Красовский функционалдары тиімді теориялық негіз болып табылады. Аталған функционалдар кідіріс параметрлеріне тәуелді орнықтылық шарттарын тұжырымдауға және жүйенің орнықтылық қасиеттерін тереңірек талдауға мүмкіндік береді [3, 6, 7, 9].

Сызықтық емес жүйелер үшін қадағалау және реттеу мәселелерін шешу мақсатында кері қадамдау әдісі, жоғары күшейткішті кері байланыс және динамикалық беттерді басқару сияқты әртүрлі тәсілдер ұсынылған. Алайда бұл әдістерді айнымалы уақыт кідірісі бар коммутацияланатын жүйелерге қолдану кезінде коммутация сигналдары мен кешіктірілген күйлердің жүйе динамикасына тигізетін орнықсыздандыратын әсерін ескеруді талап ететін қосымша құралдар қажет болады. Уақыт кідірісі бар жүйелердің орнықтылық қасиеттерін талдауда Ляпунов-Красовский функционалдары тиімді теориялық негіз болып табылады және олар кідіріс параметрлеріне тәуелді орнықтылық шарттарын алуға мүмкіндік береді.

Осы алғышарттарды негізге ала отырып, бұл мақала айнымалы уақыт кідірісі бар коммутацияланатын жоғары ретті сызықтық емес жүйелердің шығыс бойынша қадағалау мәселесін зерттеуге арналған. Күй бойынша кері байланысқа негізделген басқару заңы ұсынылып, тұйықталған жүйедегі барлық сигналдардың шектелгендігі және қадағалау қатесінің уақыт өте келе нөлдің алдын ала берілген кіші маңайында қалуы қамтамасыз етіледі. Ұсынылған басқару тәсілі коммутация әсерлері мен шектелген уақыт кідірістерін тікелей ескеруге мүмкіндік беретін Ляпунов-Красовский талдауына және басқару коэффициенттерін тиісті түрде таңдауға негізделген.

Бұл жұмыстың негізгі нәтижелерін келесідей түйіндеуге болады:

– айнымалы уақыт кідірісі бар коммутацияланатын жоғары ретті сызықтық емес жүйелер үшін күй бойынша кері байланысқа негізделген басқару сұлбасы ұсынылды;

– тұйықталған жүйенің орнықтылық қасиеттерін және қадағалау сапасын қамтамасыз ететін жеткілікті шарттар алынған;

– ұсынылған басқару тәсілінің тиімділігін көрсету мақсатында сандық мысал келтірілді.

Зерттеу шарттары мен әдістері

Сызықтық емес жүйелер үшін қадағалау және реттеу мәселелерін шешуге бағытталған бірқатар тәсілдер ұсынылған. Коммутацияланатын және уақыт кідірісі бар жүйелердің мұндай қойылымы әдебиеттерде кеңінен қолданылады [2, 4, 8].

Есептің қойылымы. Айнымалы уақыт кідірісі бар коммутацияланатын сызықтық емес жүйені қарастырайық:

$$\dot{x}(t) = f_{\sigma(t)}(x(t), x(t-\tau(t))) + g_{\sigma(t)}(x(t))u(t) \quad (1)$$

$$y(t) = h(x(t)) \quad (2)$$

мұнда $x(t) \in R^n$ - жүйенің күй векторы, $u(t) \in R$ – басқару сигналы, $y(t) \in R$ – жүйе шығысы, $\sigma(t) \in M := \{1,2,\ldots,m\}$ – коммутация сигналы, ал $\tau(t)$ – шектелген айнымалы кідірісі. Кідіріс үшін келесі типтік болжамдар қабылданады: $0 \le \tau(t) \le \bar{\tau}$, $\dot{\tau}(t) \le \mu < 1$.

Берілген сигнал $y_d(t)$ үшін қадағалау қатесін келесідей анықтаймыз:

$$e(t) = y(t) - y_d(t) \tag{3}$$

Қадағалау мақсаты күй-кері байланысқа негізделген $u(t) = k(\cdot)$ басқару заңын құрастыру, мұнда тұйықталған жүйедегі барлық сигналдар шектелген болып қалады және кез келген алдын ала $\varepsilon > 0$ үшін $\limsup_{t\to\infty} |e(t)| \le \varepsilon$ шартты орынлады.

Жоғары ретті сызықтық емес жүйелер үшін күй бойынша кері байланысқа негізделген басқару заңы ұсынылады. Басқару параметрлері сызықтық емес мүшелердің әсерін әлсіретететіндей және тұйықталған жүйе динамикасында айнымалы уақыт кідірісінің туындататын ықпалын өтеуге мүмкіндік беретіндей етіп таңдалады. Мұндай таңдау жүйенің орнықтылық қасиеттерін сақтауға және басқару сапасын қамтамасыз етуге бағытталған.

Зерттеу нәтижелері

Жүйенің орнықтылық қасиеттерін зерттеу үшін Ляпунов-Красовский әдісі қолданылады. Жүйенің орнықтылық қасиеттерін талдау Ляпунов-Красовский функционалдарын қолдану арқылы жүргізіледі. Ұсынылған функционал уақыт кідірісінің әсерін ескеруге мүмкіндік береді және тұйықталған жүйенің орнықтылық аймағын анықтауға жағдай жасайды [2, 6, 9, 11, 12].

$$V(t) = x(t)^{\mathsf{T}} P x(t) + \int_{t-\tau(t)}^{t} x(s)^{\mathsf{T}} Q x(s) ds, \tag{4}$$

Мұнда $P > 0$ және $Q > 0$ – симметриялы оң анықталған матрицалар. Жүйенің орнықтылық қасиеттерін зерттеу үшін Ляпунов-Красовский функционалы қолданылады [2, 6, 9].

Теорема 1. Егер сызықтық емес мүшелер белгілі бір өсу шарттарын қанағаттандырса және уақыт кідірісі $0 \le \tau(t) \le \bar{\tau}$, $\dot{\tau}(t) \le \mu < 1$ шарттарын орындаса, онда күй-кері байланысқа негізделген $u(t) = k(x(t))$ басқару заңы бар болады. Бұл басқару заңының әсерінен тұйықталған жүйедегі барлық сигналдар шектелген болып қалады және қадағалау қатесі уақыт өте келе кез келген алдын ала берілген $\varepsilon > 0$ үшін $\limsup_{t\to\infty} |e(t)| \le \varepsilon$

Ғылыми нәтижелерді талқылау

Бұл бөлімде алынған теориялық нәтижелер талқыланады. Алынған нәтижелер коммутацияланатын сызықтық емес жүйелер үшін күй-кері байланысқа негізделген басқару тәсілінің тиімді екенін көрсетеді. Коммутация сигналдары мен уақыт бойынша өзгеретін кідірістер жүйе динамикасына елеулі әсер етсе де, ұсынылған әдіс бұл әсерлерді азайтуға мүмкіндік береді. Шығыс бойынша қадағалау мәселелерін күй-кері байланыс арқылы шешу тәсілдері бірқатар еңбектерде ұсынылған [13, 14], ал бұл жұмыста алынған нәтижелер осы бағыттағы зерттеулерді толықтырады.

Дәлелдеу.

(4) формулада анықталған $V(t)$ функциясын қарастырайық. Уақыт бойынша өзгеретін интеграл шектеріне арналған Лейбниц ережесін қолдану арқылы келесі өрнек алынады:

$$\dot{V}(t) = 2x^T P\dot{x}(t) + x^T(t)Qx(t) - (1-\dot{\tau}(t))x^T(t-\tau(t))Qx(t-\tau(t)).$$

Жүйе динамикасын $\dot{x}(t) = f_{\sigma(t)}(x(t), x(t-\tau(t))) + g_{\sigma(t)}(x(t))u(t)$ түрінде ескеріп, басқару заңын $u(t) = k(x(t))$ деп таңдаймыз. Басқару коэффициенттерін сызықтық емес мүшелердің әсерін басатындай етіп таңдау нәтижесінде келесі бағалау алынады:

$$\dot{V}(t) \le -\alpha \|x(t)\|^2 + \beta$$

Мұнда $\alpha > 0$ және $\beta \ge 0$.

Осыдан $V(t)$ функциясының шектелген екендігі, ал $\|x(t)\|$ нормасының уақыт бойынша шектелген күйде қалатыны шығады. Сонымен қатар, $e(t)=h(x(t))-y_d(t)$ және $h(\cdot)$ функциясы локальды Липшиц шартына бағынатындықтан, қадағалау қатесі де шектелген болып қалады. Басқару коэффициенттерін тиісті түрде таңдау арқылы қадағалау қатесін нөлдің кез келген алдын ала берілген кіші маңайына жеткізуге болады. Бұл алынған орнықтылық және қадағалау қасиеттерін дәлелдейді.

Сандық мысал. Ұсынылған күй бойынша кері байланысқа негізделген басқару тәсілінің тиімділігін көрсету мақсатында айнымалы уақыт кідірісі бар коммутацияланатын екінші ретті сызықтық емес жүйе қарастырылады. Сандық модельдеу әдістері мен параметрлерді таңдау әдебиеттерде ұсынылған тәсілдерге сәйкес жүзеге асырылды [6, 10]. Жүйе екі күй айнымалысынан тұрады ($n=2$) және екі ішкіжүйені қамтиды ($m=2$). Қарастырылып отырған жүйе осы жұмыста зерттелген коммутацияланатын сызықтық емес айнымалы кідірісі бар жүйенің жеке бір жағдайы болып табылады, мұнда сызықтық емес функциялар нақты түрде таңдалып алынған. Жүйе келесі теңдеулермен сипатталады:

$$\dot{x}_1(t)=x_2(t), \tag{5}$$

$$\dot{x}_2(t)=-a_{\sigma(t)}x_1(t)-b_{\sigma(t)}x_2(t)+0.2x_1(t-\tau(t))+0.1\sin(x_1(t))+u(t), \tag{6}$$

$$y(t)=x_1(t). \tag{7}$$

Мұнда $x(t)=\left[x_1(t)x_2(t)\right]^T$ – жүйенің күй векторы, $u(t)$ – басқару сигналы, $y(t)$ – жүйе шығысы, $\sigma(t)\in\{1,2\}$ – коммутация сигналы, $\tau(t)$ – шектелген айнымалы уақыт кідірісі.

Коммутация сигналы $\sigma(t)$ периоды 2 секундқа тең периодты функция ретінде таңдалады:

$$\sigma(t)=\begin{cases}1, t\in[2k,2k+1),\\ 2, t\in[2k+1,2k+2),\end{cases} k\in ў\geq 0. \tag{8}$$

Екі ішкіжүйенің параметрлері келесідей алынады:

$$(a_1,b_1)=(2.0,1.2),(a_2,b_2)=(1.5,1.0).$$

Айнымалы уақыт кідірісі: $\tau(t)=0.2+0.1\,sin(t)$ түрінде таңдалып,

$$0.1\leq\tau(t)\leq 0.3. \tag{9}$$

шартын қанағаттандырады. Берілген қадағалау траекториясы келесі түрде анықталады:

$$y_d(t)=0.45(1-e^{-t}),\quad \dot{y}_d(t)=0.45e^{-t}. \tag{10}$$

Қадағалау қатесі:

$$e(t)=y(t)-y_d(t)=x_1(t)-y_d(t). \tag{11}$$

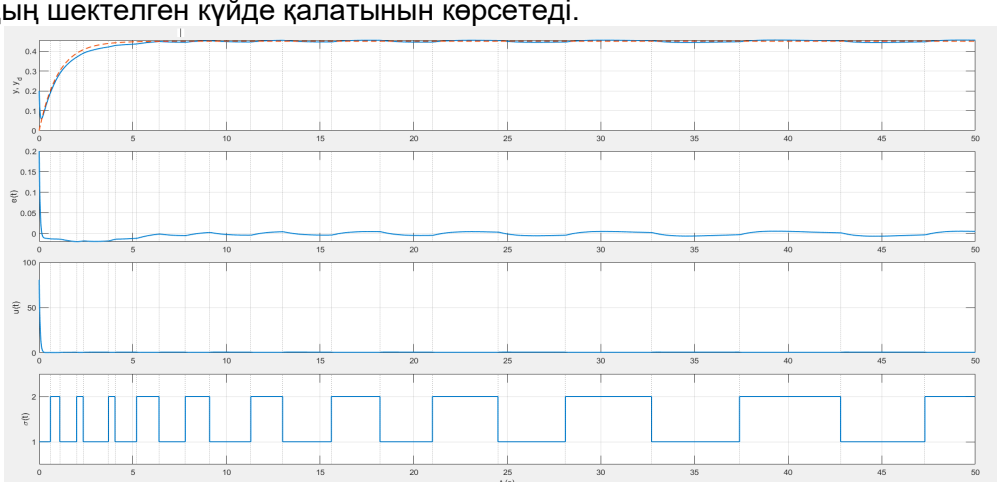
Қадағалауды қамтамасыз ету үшін күй бойынша кері байланысқа негізделген басқару заңы келесі түрде таңдалады:

$$u(t)=-k_1x_1(t)-k_2x_2(t)+k_1y_d(t)+k_2\,\dot{y}_d(t). \tag{12}$$

мұнда $k_1>0$ және $k_2>0$ – басқару коэффициенттері.

Бұл басқару заңы тұйықталған жүйеде $y(t)$ шығысының $y_d(t)$ траекториясын қадағалауына бағытталған. Мұнда сызықтық емес $0.1sin(x_1(t))$ мүшесі және кешіктірілген $0.0.2x_1(t-\tau(t))$ мүшесі шектелген әсерлер ретінде қарастырылады, ал басқару коэффициенттері олардың әсерін әлсіретететіндей етіп таңдалады.

Сандық модельдеу нәтижелері 1-суретте келтірілген. Бірінші графикте $y(t)$ және $y_d(t)$ салыстырылып, жүйе шығысының берілген траекторияға жақындайтыны көрінеді. Екінші график $e(t)$ қадағалау қатесінің уақыт бойынша өзгерісін көрсетеді; коммутация, сызықтық емес динамика және айнымалы уақыт кідірісі әсерінен қате нөлге дәл емес, оның кіші маңайында шектелген күйде қалады. Үшінші графикте басқару сигналы $u(t)$ беріліп, оның шектелген екені байқалады. Төртінші график коммутация сигналы $\sigma(t)$-тің өзгерісін көрсетеді. Алынған нәтижелер ұсынылған басқару тәсілінің айнымалы уақыт кідірісі бар коммутацияланатын сызықтық емес жүйе үшін тиімді екенін және жүйедегі барлық шамалардың шектелген күйде қалатынын көрсетеді.



Сурет 1 – Айнымалы уақыт кідірісі бар коммутацияланатын сызықтық емес жүйенің уақыттық жауаптары: (a) жүйе шығысы $y(t)$ және берілген траектория $y_d(t)$; (b) қадағалау қатесі $e(t)$); (c) басқару сигналы $u(t)$; (d) коммутация сигналы $\sigma(t)$

Қорытынды

Бұл жұмыста айнымалы уақыт кідірісі бар коммутацияланатын сызықтық емес жүйелер үшін күй бойынша кері байланысқа негізделген қадағалау басқару тәсілі қарастырылды. Ляпунов-Красовский функционалдарына сүйенген талдау арқылы тұйықталған жүйенің орнықтылық қасиеттерін қамтамасыз ететін жеткілікті шарттар алынған. Ұсынылған тәсіл коммутация әсерлері мен уақыт кідірісінің ықпалын тікелей ескеруге мүмкіндік береді және жүйедегі барлық сигналдардың шектелген күйде қалуын қамтамасыз етеді. Сандық мысал арқылы алынған теориялық нәтижелердің тиімділігі көрсетіліп, ұсынылған басқару заңының айнымалы уақыт кідірісі бар коммутацияланатын сызықтық емес жүйелер үшін қолдануға жарамдылығы дәлелденді.

Әдебиеттер тізімі

1. Khalil H.K. Nonlinear systems. 3rd ed / H.K. Khalil. – Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002. – 750 p.
2. Fridman E. Introduction to time-delay systems: analysis and control / E. Fridman. – Basel: Birkhäuser, 2014. – 352 p.
3. Sun Z. Switched linear systems: control and design / Z. Sun, S.S. Ge. – London: Springer, 2011. – 312 p.
4. Liberzon D. Switching in systems and control / D. Liberzon. Boston: Birkhäuser, 2003. – 256 p.
5. Zhang W. Output tracking control for switched nonlinear systems with time-varying delay / W. Zhang, M. Chen, Y. Li // Nonlinear Analysis: Hybrid Systems. – 2018. – Vol. 29. – P. 257-270.
6. Li X. Stability and control of nonlinear systems with time-varying delays / X. Li, R. Rakkiyappan // IEEE Transactions on Automatic Control. – 2016. – Vol. 61, № 6. – P. 1488-1493.
7. He Y. Delay-dependent stability criteria for nonlinear systems with time-varying delays / Y. He, M. Wu, J.-H. She // Automatica. – 2015. – Vol. 52. – P. 132-137.
8. Wang Y. Switched nonlinear systems with time-varying delay: stability and control / Y. Wang, X. Liu // ISA Transactions. – 2019. – Vol. 85. – P. 1-10.
9. Park P. Lyapunov-Krasovskii functionals for time-delay systems: a new approach / P. Park, J. Ko, C. Jeong // Systems & Control Letters. – 2016. – Vol. 97. – P. 1-8.

10. Chen W. State-feedback control for switched nonlinear systems with delays / W. Chen, Z. Li // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 112345-112356.
11. Zhao X. Stability and stabilization of switched nonlinear systems with time-varying delays / X. Zhao, L. Zhang, P. Shi // IEEE Transactions on Automatic Control. – 2017. – Vol. 62, № 7. – P. 3623-3629.
12. Yang X. Robust stability of switched nonlinear systems with time-varying delay / X. Yang, X. Li, J. Cao // Nonlinear Dynamics. – 2018. – Vol. 93. – P. 1875-1887.
13. Zhang H. Output feedback control for switched nonlinear systems with time-varying delays / H. Zhang, Z. Wang, Y. Liu // International Journal of Control. – 2019. – Vol. 92, № 9. – P. 2074-2085.
14. Zhou B. Output regulation of switched nonlinear systems with time delays / B. Zhou, Z. Lin // Automatica. – 2021. – Vol. 129. – Art. № 109615.

Ә.Ж. Жамбулатова*, Қ. Әлімхан
Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева,
010000, Республика Казахстан, г.Астана., ул.Сәтпаева, 2
*e-mail: aigerimzhambulat@gmail.com

УПРАВЛЕНИЕ КОММУТАЦИОННЫМИ НЕЛИНЕЙНЫМИ СИСТЕМАМИ С ПЕРЕМЕННЫМ ВРЕМЕННЫМ ЗАПАЗДЫВАНИЕМ НА ОСНОВЕ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ ПО СОСТОЯНИЮ

В статье исследуется задача выходного слежения для класса коммутационных нелинейных систем с переменным временным запаздыванием. Подобные системы характеризуются наличием коммутации между несколькими подсистемами, а также временных задержек, изменяющихся во времени, что существенно усложняет их динамику. Совместное влияние коммутации и запаздывания может приводить к ухудшению качества управления, возникновению колебательных режимов и даже нарушению устойчивости, что делает задачу синтеза эффективных законов управления особенно актуальной. В работе предлагается закон управления, основанный на обратной связи по состоянию, который ориентирован на обеспечение требуемых характеристик выходного слежения. Предложенный подход гарантирует ограниченность всех сигналов в замкнутой системе при наличии нелинейностей, коммутации и переменного временного запаздывания. Анализ устойчивостных свойств системы и динамики ошибки слежения проводится с использованием функционалов Ляпунова-Красовского, позволяющих учитывать влияние запаздывания на поведение системы. Показано, что корректный выбор коэффициентов управления способствует снижению дестабилизирующего воздействия коммутации и временных задержек. Для подтверждения полученных теоретических результатов приведены результаты численного моделирования, которые демонстрируют эффективность предложенного метода управления и подтверждают его применимость к широкому классу коммутационных нелинейных систем с переменным временным запаздыванием.

Ключевые слова: *коммутационные нелинейные системы, обратная связь по состоянию, системы с запаздыванием, функционалы Ляпунова-Красовского, выходное слежение.*

A. Zhambulatova*, K. Alimhan
L.N. Gumilyov Eurasian National University,
010000, Republic of Kazakhstan, Astana, Satpayev Street, 2
*e-mail: aigerimzhambulat@gmail.com

STATE-FEEDBACK CONTROL OF SWITCHED NONLINEAR SYSTEMS WITH TIME-VARYING DELAY

His paper investigates the output tracking problem for a class of switched nonlinear systems with time-varying delays. Such systems are characterized by switching among multiple subsystems as well as the presence of delays that vary over time, which significantly complicates their dynamics. The combined effects of switching and time delays may result in degraded control performance, oscillatory behaviors, and, in some cases, loss of stability. Therefore, the synthesis of effective control laws for such systems constitutes an important and challenging problem in modern control theory. A state-feedback control law is proposed to achieve the desired output tracking performance. The proposed approach is designed to ensure the boundedness of all signals in the closed-loop system in the presence of nonlinearities, switching, and time-varying delays. The stability properties of the system and the dynamics of the tracking error are analyzed using Lyapunov-Krasovskii functionals, which allow the influence of time delays on system behavior to be explicitly taken into account. It is shown that an appropriate selection of the control gains can significantly reduce the destabilizing effects caused by switching and time-varying delays. To validate the theoretical results, numerical simulation results are presented, demonstrating the effectiveness of the proposed control strategy and confirming its applicability to a broad class of switched nonlinear systems with time-varying delays.

Key words: *switched nonlinear systems, state-feedback control, time-delay systems, Lyapunov-Krasovskii functionals, output tracking.*

Авторлар туралы мәліметтер

Әйгерім Жақыпқызы Жамбулатова* – магистр, «Математикалық және компьютерлік моделдеу» кафедрасының аға оқытушысы, Л.Н. Гумилев Еуразия ұлттық университеті, Қазақстан; e-mail: aigerimzhambulat@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-7749-086X.

Қилан Әлімхан – PhD, «Математикалық және компьютерлік моделдеу» кафедрасының аға оқытушысы, Л.Н. Гумилев Еуразия ұлттық университеті, Қазақстан; e-mail: keylan@live.jp. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0766-2229.

Сведения об авторах

Әйгерім Жақыпқызы Жамбулатова* – магистр, старший преподаватель кафедры «Математическое и компьютерное моделирование», Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилёва, Казахстан; e-mail: aigerimzhambulat@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-7749-086X.

Қилан Әлімхан – PhD, профессор кафедры «Математическое и компьютерное моделирование» кафедрасының профессоры, Л.Н. Гумилев Еуразия ұлттық университеті, Қазақстан; e-mail: keylan@live.jp. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0766-2229.

.

Information about the authors

Aigerim Zhambulatova* – Master's degree, Senior Lecturer of the Department of Mathematical and Computer Modeling, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazakhstan; e-mail: aigerimzhambulat@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-7749-086X.

Keylan Aimhan – PhD, Professor of the Department of Mathematical and Computer Modeling, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazakhstan; e-mail: keylan@live.jp. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0766-2229.

Редакцияға енуі 22.01.2026
Өңдеуден кейін түсуі 03.03.2026
Жариялауға қабылданды 10.03.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-22

BY 4.0
Check for updates

IRSTI: 14.35.07

Y.Sh. Zhursinbek[1], B.Sh. Zhursinbek[1], A.K. Maidanov*, Sh.Zh. Seilov[1], A.V. Ermakov[2]
[1]L.N. Gumilyov Eurasian National University,
010000, Republic of Kazakhstan, Astana, Satpayev St. 2,
[2]M.K. Ammosov North-Eastern Federal University,
677000, Russian Federation, Yakutsk, 58 Belinskogo St.
*e-mail: makeadil@mail.ru

IMPLEMENTATION OF THE «IMAGE TO DATA» CONVERTER FOR IMPROVING INFORMATION SECURITY

Abstract: *Enhancing information security can be achieved through a variety of methods, with one notable approach involving the use of specialized hardware and software tools known as the «Image-to-Data» converter. As described by the authors, this device is primarily designed for secure information exchange in scientific research, ensuring data confidentiality and integrity during transfer. Its core principles focus on protecting sensitive information by preventing unauthorized access, making it an essential tool in high-security environments. Although initially developed for scientific purposes, the converter's capabilities are highly adaptable and can be applied to other sectors such as finance, healthcare, and government agencies, where secure communication is vital. By adopting this innovative converter, organizations can significantly strengthen their data protection measures, minimizing risks associated with cyber threats and data breaches. The technology's versatility and robustness facilitate safer data exchange, helping institutions maintain compliance with strict security standards and regulations. Overall, integrating the «Image-to-Data» converter can substantially enhance an organization's security posture, enabling secure, efficient, and versatile information*

©Y.Sh. Zhursinbek, B.Sh. Zhursinbek, A.K. Maidanov, Sh.Zh. Seilov, A.V. Ermakov, 2026

sharing across various fields and industries, thereby supporting the integrity and confidentiality of critical information in an increasingly digital world.

Key words: *information security, converter, telecommunication network, interface, image, data, tuple.*

Introduction

Ensuring the required level of information security is one of the most important tasks faced by telecommunications operators and service providers [1-3]. Addressing this task relies on applying a set of complex procedures that are continually being improved. A common drawback of most information security tools is that their modernization is reactive, responding to newly emerging threats.

The current situation resembles an arms race: offensive tools are typically developed first, followed by defensive measures. A different scenario is observed in the case of burglars attempting to break sophisticated door locks – new locks are developed first, and only then do burglars search for ways to defeat them.

Using this analogy, the purpose of the «Image-to-Data» converter can be viewed as an attempt to place attackers violating information security in a position similar to that of apartment burglars. In other words, the goal is to deprive attackers of the ability to remain on the offensive and, in some cases, to eliminate their ability to cause damage or significantly minimize it.

This paper presents the concept of developing and applying a converter in-tended primarily for applications related to scientific research. The use of the converter does not replace any of the established information security solutions. Instead, the proposed «Image-to-Data» converter should be viewed as an additional means to enhance information security.

Literature review

The idea of creating the «Image-to-Data» converter emerged from an interdisciplinary approach [4]. Consider the task of designing an AC power source with high stability in voltage U and frequency F for hypothetical telecommunications equipment. Suppose that when using an external AC power grid, the variations in U (from U_1 to U_2) and F (from F_1 to F_2) significantly exceed the permissible limits required for the operation of the equipment: $U_3 \le U \le U_4$ and $F_3 \le F \le F_4$.

This problem can be solved by using a rectifier, a battery, and an inverter [5]. An example of such a solution is shown in Figure 1. The abbreviations «AC» and «DC» stand for alternating current and direct current, respectively. The rectifier converts AC to DC, enabling the system to store electrical energy efficiently. The battery acts as an energy reservoir, providing power when needed. The inverter then converts DC back to AC for use by various devices. This approach ensures a stable and reliable power supply in the system. Proper calibration of each component is crucial for optimal performance. Additionally, implementing safety mechanisms is essential to prevent overloads and short circuits. Regular maintenance helps identify potential failures before they occur. Using high-quality components can improve the system's overall efficiency and lifespan.

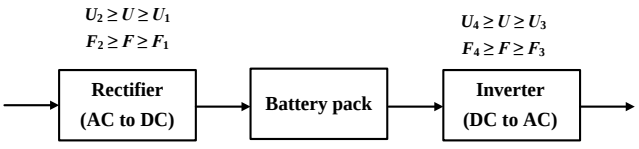


Figure 1 – Example of an AC power source design

Furthermore, integrating smart control systems can optimize energy usage and enhance system responsiveness. Overall, this setup provides a robust solution for managing electrical energy in various applications.

In this example, the values U_3, U_4, F_3, and F_4 do not depend on U_1, U_2, F_1, and F_2, respectively. A similar methodological approach was applied in the development of the “Image-to-Data” converter. It should be noted that the use of a battery is not mandatory for achieving the required AC output parameters; rather, it improves the reliability of the power subsystem in the event of a failure of the external AC grid.

Application Area of the Converter

It should be emphasized that the initial concept of developing and using the “Image-to-Data” converter was formulated during the design of a telecommunication network for a high-technology

company [6]. One of the key aspects considered was the conduct of scientific research. From the perspective of the proposed converter, three features of scientific research are particularly important:

- a small delay in data exchange is generally acceptable and does not significantly exceed the limits established for packet networks [7];
- a researcher receiving information is capable of identifying gross distortions intentionally introduced into the original data;
- the use of neural networks [8] or other artificial intelligence tools [9] may enable the identification of even subtle intentional distortions in the data.

Thus, the original idea limited the application scope of the «Image-to-Data» converter based on these three conditions. In addition, the costs associated with acquiring the required hardware and software should be considered. According to the authors' estimates, these costs are not significant; however, they should be taken into account by specialists planning to use the converter to enhance information security.

Data Exchange Path Model Using the Converter

Before describing the model, it is advisable to represent the received information using two tuples: ⟨A, B, C⟩ and ⟨A, B, C, Y, Z⟩. The further discussion is based on another analogy, which relies on the image of an iceberg shown on the left side of Figure 2. It is assumed that the above-water part of the iceberg includes a three-element tuple ⟨A, B, C⟩, which serves to display information on the computer monitor shown in the upper right part of the illustration. The complete five-element tuple ⟨A, B, C, Y, Z⟩, located in the underwater part of the iceberg, is processed by the system unit of the computer shown in the lower right part of Figure 2. The elements Y and Z contain service information and malicious objects, respectively.

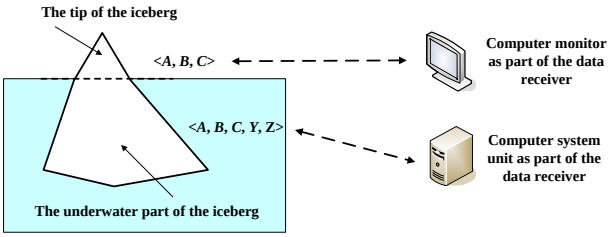


Figure 2 – Representation of received information as two tuples

As noted earlier, a researcher can evaluate the correctness of the received data by analyzing the three-element tuple. This capability was used in the development of the «Image-to-Data» converter. The data exchange path model using the converter is shown in Figure 3. It is assumed that information exchange occurs over an IP network. The application of the converter requires the development of a new interface – UCI (User Converter Interface). The abbreviation «I/D» stands for «Image/Data», while UNI (User Network Interface) is a commonly used term in technical literature [10, 11].

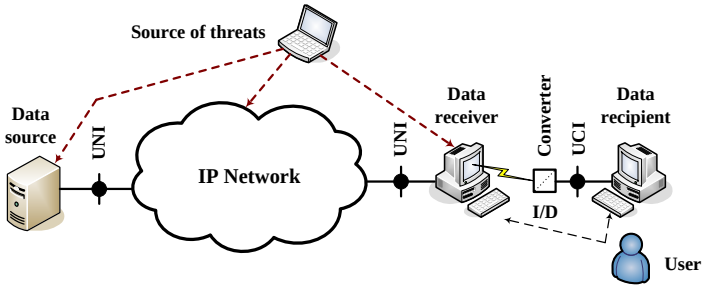


Figure 3 – Information exchange path model using the converter

Although the data receiver and data consumer may be located within the same system unit, the proposed model provides greater clarity. Moreover, separating these elements into different system units enhances the information security of the terminal used by the researcher.

UCI serves to coordinate the terminals referred to as the data receiver and data consumer. The data source and receiver are considered as equipment performing information exchange, whereas the data consumer is an entity capable of correctly interpreting the received information.

UNI and UCI are similar in that they are based on the OSI model [12]; their differences are primarily related to the implementation of layers six and seven.

Assume that traditional information security tools estimate the risk of unauthorized access to the data receiver at time t by probability $P(t)$. This probability may increase as new threats emerge. Reducing $P(t)$ typically requires introducing additional protective functions, such as updating firewall software.

By contrast, using the converter significantly reduces the probability $Q(t)$ of unauthorized access to the data consumer terminal, such that $Q(t) \ll P(t)$. The validity of this assertion is the subject of further research outlined later in this paper.

The UCI serves to coordinate the terminals referred to as the data receiver and the data consumer. The data source and data receiver are considered as equipment performing information exchange. The data consumer is an object or subject capable of correctly interpreting the received information. The UNI and UCI are similar in nature, as both are implemented based on the standard OSI (Open Systems Interconnection) model [12]. The differences between them are mainly related to the implementation of the sixth and seventh layers of this model.

Assume that traditional information security tools allow the risk of unauthorized access to the data receiver at time $t$to be estimated by probability $P(t)$. This probability may increase as new types of threats emerge. Reducing the value of $P(t)$ is achieved by introducing additional functional capabilities into protection tools to eliminate newly identified threats. A typical example of such an action is updating firewall software.

As a result of using the converter, the probability $Q(t)$, which determines the risk of unauthorized access to the data consumer terminal at time t, is sharply reduced. This fact is expressed by the following inequality: $Q(t) \ll P(t)$

The validity of this assertion is the subject of separate research and is included among the directions for future work formulated at the end of this paper.

If we return to the pair $P(t)$ and $Q(t)$ within the chosen analogy, it can be argued that $Q(t) = 0$. This statement is due to the practical absence of a probabilistic nature in the «Rectifier – Inverter» connection. In this sense, the proposed solution can be considered highly effective. If this assertion appears controversial to the reader, the authors would be grateful for alternative viewpoints.

For the «Image-to-Data» converter, the probabilistic nature of the dependence of the data consumer terminal on external threats cannot be eliminated. In other words, $Q(t) \neq 0$; however, this probability does not differ significantly from zero. Therefore, the proposed solution for improving information security should be considered highly effective, although it cannot eliminate all potential threats. Such threats include various methods of information theft, for example, signal interception resulting from unavoidable electromagnetic emissions.

Examples of Problems Addressed by the «Image-to-Data» Converter

First example is related to conducting scientific research in which useful information is presented in the form of numerical data and graphs. Such information may be expressed using the tuple ⟨A, B, C⟩. It is displayed on the monitor of a computer acting as the data receiver. A clear example is the result of an experiment presented on an A4 sheet and, accordingly, on the data receiver's screen in the following form:

- values of variable x: 2, 5, 12, 17, 33;
- values of variable y (dependent on x): 4, 24, 148, 291, 1078;
- graph of the dependence $y = f(x)$;
- approximation of the obtained dependence $y = f(x)$ in the form $y \approx a + b \cdot x^2$.

Figure 4 shows examples of correct and distorted dependencies of y on x. As an intentionally distorted dependency, a linear function is shown. It is assumed that at the initial stage of research, scientific personnel conducting the experiment are able to distinguish the correct function from the distorted one.

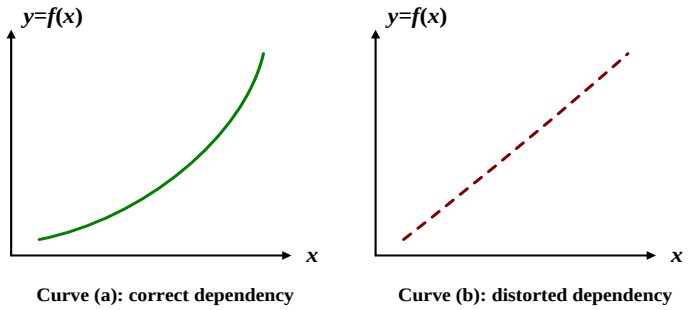


Figure 4 – True and false functions β = f(α)

A distorted dependency may be represented by a curve sufficiently close to the true function. In such cases, it is necessary to use technologies based on neural networks [8], Big Data [13], data mining [14], and pattern recognition [15]. These technologies may serve as useful tools for researchers, helping them verify the obtained results.

In addition, the listed technologies will contribute to reducing the differences between the tuples ⟨A, B, C⟩ and ⟨A_C, B_C, C_C⟩. The subscript «C» in the second tuple indicates that its elements were obtained using the «Image-to-Data» converter. It is obvious that the sets {A} and {A_C}, {B} and {B_C}, {C} and {C_C} will always differ from each other. During the operation of the «Image-to-Data» converter, these differences will be minimized.

The second example concerns the process of controlling the trajectory of an unmanned aerial vehicle (UAV). Let us assume that the UAV is tasked with following an elliptical trajectory to detect potential forest fire sources and illegal logging activities. Figure 5 shows the true and false UAV trajectories. A specialist who formulated the flight task is capable of recognizing a false UAV trajectory caused, for example, by a hacker attack.

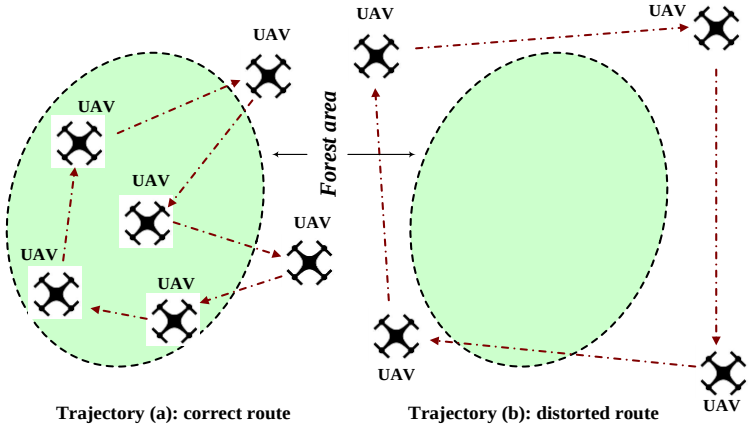


Figure 5 – True and false UAV trajectories

In solving information security problems, an effective tool is the Network of Digital Twins [16]. This network can exchange obtained information with similar or functionally related objects, thereby facilitating the rapid identification of techniques used by attackers. The term «Network of Digital Twins» is not equivalent to the term «Digital Twin Network» introduced by ITU-T Recommendation Y.3090 [17].

A Network of Digital Twins represents a set of objects united by a common purpose. Each such object is an autonomous digital twin [18]. Their interconnection via a telecommunication network enables information exchange that is useful for solving complex problems involving interdisciplinary research aspects. The creation of a Network of Digital Twins requires the development of complex software and the establishment of specialized knowledge bases.

Future Research Directions

The proposed method for improving information security is based on the development and subsequent use of an «Image-to-Data» converter as additional hardware and software tools. For this reason, the potential reduction in risk must be weighed against the required investments and the total cost of ownership [19].

As noted above, the use of the «Image-to-Data» converter should be considered an additional measure to improve information security. As a next step, it is planned to analyze the feasibility of applying protective coatings to equipment used for the creation and development of high-technology companies. Such work may be regarded as confirmation of the inequality $Q(t) \ll P(t)$ presented above.

A particularly productive direction for further research is the analysis of the tuple element Z, which contains information about malicious software products. Such analysis will make it possible to enhance the level of information security provided by traditional protection tools. Most likely, solving such problems will require interdisciplinary research methods [4].

Another especially important direction for future work is extending the proposed converter to a wider range of applications. The use of quantum computers [20] will enable significant reductions in the additional delay introduced by «Image-to-Data» class converters. This will create a real opportunity to expand the range of information security tasks addressed by the method described in this paper.

Conclusion

The application of the «Image-to-Data» converter enables improved information security across a range of critical applications. As experience with such converters accumulates and new technological achievements emerge, the scope of application of the solutions proposed in this paper will expand substantially. At the same time, the installation of the “Image-to-Data” converter does not replace traditional methods of ensuring a specified level of information security but rather complements them with an additional type of hardware-software solution

References

1. Andress J. Foundations of Information Security: A Straightforward Introduction / J. Andress. – No Starch Press, 2019. – 248 p.
2. Landoll D.J. Information Security Policies, Procedures, and Standards: A Practitioner's Reference / D.J. Landoll. – Auerbach Publications, 2020. – 240 p.
3. Stamp M. Information Security: Principles and Practice, 3rd Edition / M. Stamp. – Wiley, 2021. – 448 p.
4. Repko A., Szostak R. Interdisciplinary Research: Process and Theory, Third Edition / A. Repko, R. Szostak. – SAGE. – 2017. – 464 p.
5. Maniktala S. Switching Power Supply Design and Optimization, Second Edition 2nd Edition / S. Maniktala. – McGraw Hill, 2013. – 1071 p.
6. Ermakov V. Principles of development of telecommunication system intended for high-technology company / V. Ermakov, N. Sokolov. – Information and Space, 2020. – № 1. – P. 6-11.
7. ITU-T. Network performance objectives for IP-based services. Recommendation Y.1541. – Geneva, 2011. – 66 p.
8. Aggarwal C.C. Neural Networks and Deep Learning / C.C. Aggarwal. – Springer, 2018. – 497 p.
9. Gupta I. Artificial Intelligence and Expert Systems / I. Gupta, G. Nagpal – Mercury Learning and Information, 2020. – 412 p.
10. User Network Interface (UNI) Requirements and Framework. – Metro Ethernet Forum, 2004. – 33 p.
11. ITU, Telecommunication Development Bureau. Telecom Network Planning for Evolving Network Architectures. Reference Manual (Draft version 5.1). – Geneva, 2008. – 448 p.
12. ITU-T. Information technology – open systems interconnection – basic reference model: the basic model. Recommendation X.200. – Geneva, 1994. – 63 p.
13. Erl T. Big Data Fundamentals: Concepts, Drivers & Techniques / T. Erl, W. Khattak, P. Buhler – Prentice Hall, 2015. – 218 p.
14. Han J. Data Mining. Concept and Techniques / J. Han, M. Kamber, J. Pei. – Morgan Kaufmann Publishers, 2011. – 703 p.
15. Bishop C.M. Pattern Recognition and Machine Learning / C.M. Bishop. – Springer, 2016. – 758 p.
16. The Concept of Building a Network of Digital Twins to Increase the Efficiency of Complex Telecommunication Systems / Sh.Zh. Seilov et al // Complexity (Special Issue). – 2021. – Article ID 9480235. – 9 p.

17. ITU-T. Digital twin network – Requirements and architecture. Recommendation Y.3090. – Geneva, 2022. – 26 p.
18. Crespi N. The Digital Twin / N. Crespi, A.T. Drobot, R. Minerva – Springer, 2023. – 1250 p.
19. Economic substantiation of engineering projects in innovation economy / A.V. Babikova et al. – Moscow: INFRA-M, 2024. – 143 p.
20. Majidy S. Building Quantum Computers: A Practical Introductio / S. Majidy, C. Wilson, R. Laflamme. – Cambridge University Press, 2024. – 300 p.

Acknowledgment

This work was supported by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. fund this research AP23488699 «System for Detecting Phytopathogenic In fections in Domestic Fruit Crop Production Using Computer Vision and Artifi cial Olfaction»).

Е.Ш. Жүрсінбек[1], Б.Ш. Жүрсінбек[1], А.К. Майданов[1*], Ш.Ж. Сеилов[1], А.В. Ермаков[2]
[1]Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
010000, Қазақстан Республикасы, Астана қ., Сәтпаев көш., 2
[2]М.К. Аммосов атындағы Солтүстік-Шығыс федералдық университеті,
677000, Ресей Федерациясы, Якутск қ., Белинский көш., 58
e-mail: makeadil@mail.ru

АҚПАРАТТЫҚ ҚАУІПСІЗДІКТІ АРТТЫРУҒА АРНАЛҒАН «IMAGE TO DATA» ТҮРЛЕНДІРГІШІН ІСКЕ АСЫРУ

Ақпараттық қауіпсіздікті арттыруға әртүрлі әдістер арқылы қол жеткізуге болады, олардың ішінде ерекше тәсілдердің бірі – «Image-to-Data» деп аталатын мамандандырылған аппараттық-бағдарламалық құралды қолдану. Бұл құрылғы ең алдымен ғылыми зерттеулер аясында ақпарат алмасуды қауіпсіз ұйымдастыруға арналған, яғни деректерді тасымалдау барысында олардың құпиялылығы мен тұтастығын қамтамасыз етуге бағытталған. Оның негізгі қағидаттары құпия ақпаратты рұқсатсыз қол жеткізуден қорғауға негізделген, сондықтан ол жоғары қауіпсіздік талап етілетін ортада маңызды құрал болып табылады.Бастапқыда ғылыми мақсаттарға әзірленгеніне қарамастан, аталған конвертердің мүмкіндіктері кеңейтілген және оны қаржы, денсаулық сақтау, мемлекеттік органдар сияқты қауіпсіз байланыс аса маңызды салаларда да тиімді қолдануға болады. Осы инновациялық конвертерді енгізу арқылы ұйымдар деректерді қорғау деңгейін едәуір күшейтіп, киберқауіптер мен деректердің таралуына байланысты тәуекелдерді азайта алады. Технологияның әмбебаптығы мен сенімділігі ақпарат алмасуды қауіпсіз әрі тиімді ұйымдастыруға мүмкіндік береді, сондай-ақ қатаң қауіпсіздік стандарттары мен нормативтік талаптарға сәйкестікті сақтауға жағдай жасайды. Жалпы алғанда, «Image-to-Data» конвертерін интеграциялау ұйымның ақпараттық қауіпсіздік деңгейін айтарлықтай арттырып, әртүрлі салалар мен индустрияларда маңызды ақпараттың тұтастығы мен құпиялылығын қамтамасыз ете отырып, қауіпсіз әрі тиімді дерек алмасуға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: *ақпараттық қауіпсіздік, түрлендіргіш, телекоммуникациялық желі, интерфейс, бейне, деректер, кортеж.*

Е.Ш. Журсинбек[1], Б.Ш. Журсинбек[1], А.К. Майданов[1*], Ш.Ж. Сеилов[1], А.В. Ермаков[2]
[1]Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева,
010000 Республика Казахстан, г. Астана, ул. Сатпаева, 2
[2]Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова,
677000, Российская Федерация, г. Якутск, ул. Белинского, 58
e-mail: makeadil@mail.ru

РЕАЛИЗАЦИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ «IMAGE TO DATA» ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Аннотация: *Повышение уровня информационной безопасности может быть достигнуто различными методами, среди которых особое место занимает применение специализированного аппаратно-программного средства под названием «Image-to-Data». Данное устройство предназначено прежде всего для организации безопасного обмена информацией в рамках научных исследований, обеспечивая конфиденциальность и целостность данных в процессе их передачи. Его основные принципы основаны на защите чувствительной информации от несанкционированного доступа, что делает его важным инструментом в средах с повышенными требованиями к безопасности. Несмотря на то, что изначально конвертер был разработан для научных целей, его*

функциональные возможности являются расширяемыми, и он может эффективно применяться в таких сферах, как финансы, здравоохранение и государственные органы, где безопасная коммуникация имеет критическое значение. Внедрение данного инновационного решения позволяет организациям существенно усилить уровень защиты данных, минимизируя риски, связанные с киберугрозами и утечками информации. Универсальность и надежность технологии способствуют организации безопасного и эффективного обмена данными, а также обеспечивают соответствие строгим стандартам и нормативным требованиям в области информационной безопасности. В целом интеграция конвертера «Image-to-Data» способна значительно повысить уровень защищенности организации, обеспечивая безопасный, эффективный и гибкий обмен информацией в различных отраслях и поддерживая конфиденциальность и целостность критически важных данных в условиях стремительной цифровизации.

Ключевые слова: *информационная безопасность, преобразователь, телекоммуникационная сеть, интерфейс, изображение, данные, кортеж.*

Сведения об авторах

Шахмаранович Журсинбек Ерден – докторант кафедры технологии искуственного интеллекта, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Республика Казахстан; e-mail: zhursinbek@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9777-5069.

Бибинур Шахмарановна Журсинбек – докторант кафедры компьютерной и программной инженерии, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Республика Казахстан; e-mail: zhursinbek99@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-4505-470X.

Адиль Кокенович Майданов* – преподаватель кафедры компьютерной и программной инженерии Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, магистр, г. Астана, Республика Казахстан; e-mail: makeadil@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2392-5164.

Шахмаран Журсинбекович Сеилов – кандидат технических наук, профессор кафедры компьютерной и программной инженерии, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Республика Казахстан; e-mail: seilov_shzh@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7057 0461.

Алексей Валентович Ермаков – кандидат экономических наук, доцент, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, советник ректора; e-mail: ermakov-it@yandex.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0451-3909.

Авторлар туралы мәліметтер

Ерден Шахмаранұлы Жүрсінбек – жасанды интеллект технологиялары кафедрасының докторанты, Еуразия ұлттық университеті Л.Н. Гумилев атындағы, Қазақстан Республикасы; e-mail: zhursinbek@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9777-5069.

Бибінұр Шахмаранқызы Жүрсінбек – компьютерлік және бағдарламалық инженерия кафедрасының докторанты, Еуразия ұлттық университеті Л.Н. Гумилев атындағы, Қазақстан Республикасы; e-mail: zhursinbek99@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-4505-470X.

Адиль Кокенович Майданов* – Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Компьютер және Программалық инженерия кафедрасының оқытушысы, магистр, Астана, Қазақстан; e-mail: makeadil@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2392-5164.

Шахмаран Жүрсінбекұлы Сеилов – техника ғылымдарының кандидаты, профессор, компьютерлік және бағдарламалық инженерия кафедрасы, Еуразия ұлттық университеті Л.Н. Гумилев атындағы, Қазақстан Республикасы; e-mail: seilov_shzh@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7057-0461.

Алексей Валентович Ермаков – экономика ғылымдарының кандидаты, доцент, ректор кеңесшісі, М.К. Аммосов атындағы Солтүстік-Шығыс федералдық университеті, Ресей Федерациясы; e-mail: ermakov-it@yandex.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0451-3909.

Information about the authors

Yerden Zhursinbek – PhD student, Department of Artificial Intelligence Technologies, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; e-mail: zhursinbek@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9777-5069.

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.

Adil Maidanov* – Master, 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.

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.

Alexey Ermakov – Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Rector's Advisor, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia; e-mail: ermakov-it@yandex.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0451-3909.

Received 16.01.2026
Revised 06.03.2026
Accepted 10.03.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-23

BY 4.0
Check for updates

IRSTI: 20.53.59

A. Kenzhebay[1*], A. Tynykulova[2], G. Yensebayeva[1], S. Zhakypbekov[3], K. Bakenova[4]
[1]Alikhan Bokeikhan University,
070100**,** Republic of Kazakhstan, Abai region, Semey city, Mangilik El str. 11
[2]Astana International University,
010000, Republic of Kazakhstan, Astana, Kabanbay batyr avenue, 8
[3]International Information Technology University,
050016, Republic of Kazakhstan, Almaty, Manas str. 34/1
[4]L.N. Gumilyov Eurasian National University,
010000, Republic of Kazakhstan, Astana city, 2 Satbaev st.
*e-mail: salik2000@icloud.com

ALGORITHMS FOR SOFTWARE COMPENSATION OF TORSIONAL VIBRATIONS IN H-BOT 3D PRINTERS BASED ON FILTERED B-SPLINES

Abstract: *The rapid development of additive manufacturing technologies imposes increasingly stringent requirements on the positioning accuracy and dynamic stability of motion systems, particularly in printers employing H-bot kinematic architectures, which are prone to torsional vibrations. Such vibrations significantly degrade print quality by inducing trajectory deviations of the print head and cannot be effectively mitigated solely through mechanical reinforcement or conventional control strategies. This study proposes a software-based torsional vibration compensation method founded on the use of filtered B-splines for motion trajectory correction at the planning stage. Unlike existing approaches that rely on rigid digital filtering or real-time adaptive control, the proposed method combines the high approximation capability of B-splines with selective attenuation of spectral components responsible for resonant torsional oscillations.*

A mathematical model of torsional vibrations in H-bot frame structures is developed, followed by a spectral analysis of their dynamic characteristics to justify the applicability of B-spline-based filtering for identifying and compensating critical frequency components. Numerical simulation results demonstrate a substantial reduction in vibration amplitude and a corresponding decrease in trajectory tracking error of the print head. The practical relevance of the proposed approach lies in its ability to be integrated into standard trajectory planning algorithms without hardware modification, making it applicable to a wide class of H-bot-based additive manufacturing systems.

Key words: *3D printers; H-shaped kinematics; torsional vibrations; software compensation; filtered B-splines; trajectory correction; spectral analysis; vibrations; print quality; motion planner.*

Introduction

Additive manufacturing technologies have undergone rapid development in recent years, accompanied by increasing requirements for dimensional accuracy, surface quality, and the dynamic stability of positioning systems. Among the various kinematic architectures used in modern fused deposition modeling (FDM) printers, the H-frame (H-bot) configuration has gained considerable attention due to its compact mechanical structure, reduced moving mass, and capability to achieve high printing speeds [1]. These advantages make the architecture attractive for applications requiring

©A. Kenzhebay, A. Tynykulova, G. Yensebayeva, S. Zhakypbekov, K. Bakenova, 2026

fast motion and efficient spatial positioning. However, despite these benefits, H-frame systems are prone to dynamic effects that may negatively affect printing accuracy.

One of the most critical limitations of this kinematic architecture is the occurrence of torsional oscillations generated during rapid trajectory changes and high acceleration of the motion system [2]. Due to the specific belt transmission layout of the H-frame mechanism, inertial loads are unevenly distributed across the drive system, leading to rotational deformation of the frame. These oscillations propagate through the mechanical structure and ultimately influence the motion of the print head. As a result, various defects may appear on printed parts, including geometric distortions, ghosting artifacts, layer misalignment, and deterioration of surface quality. Such phenomena significantly restrict the use of H-frame printers in tasks requiring high geometric precision.

Traditional approaches aimed at mitigating these dynamic effects are primarily based on mechanical or hardware modifications of the printer structure. These include increasing frame stiffness, introducing additional damping elements, or reinforcing the supporting structure of the motion system [3]. Although such measures may partially reduce vibration amplitudes, they inevitably increase the overall mass and structural complexity of the system, which can negatively affect energy efficiency and limit achievable printing speeds. Moreover, hardware-based solutions typically lack adaptability to changing operating conditions and different printing regimes.

An alternative approach involves the use of software-based methods for dynamic compensation. In particular, trajectory optimization and digital filtering techniques allow the suppression of undesired oscillatory components directly at the level of motion control algorithms without requiring modifications to the mechanical structure of the printer [4]. Such methods make it possible to account for the spectral characteristics of the excited vibrations and to reduce the amplitude of critical oscillation modes by smoothing the control trajectories.

The present study is aimed at identifying and systematizing characteristic defects that occur during the printing process in 3D printers with an H-frame kinematic architecture and at analyzing the dynamic processes responsible for their formation. Based on the obtained experimental data, the study establishes the basis for developing an intelligent software system capable of detecting emerging defects at early stages of the printing process. The implementation of such a system may significantly improve printing accuracy and surface quality while reducing material consumption and production time through timely correction of control actions.

To evaluate the effectiveness of the proposed approach, an experimental investigation was conducted using a set of 100 printed test samples produced under different operating conditions. Part of the experiments was carried out using a standard trajectory planner, whereas the remaining samples were printed using a modified control algorithm based on filtered B-spline functions. The proposed method enables smoothing of control trajectories and suppression of frequency components associated with torsional oscillations. Comparative analysis of the printed specimens in terms of dimensional accuracy and surface quality demonstrates that the proposed approach contributes to a noticeable reduction in vibration amplitude, improved trajectory stability, and overall enhancement of the printing process [5-6].

The Table 1 presents experimental data obtained during a printing series of 100 test samples on an H-frame 3D printer. For each part, the key process parameters were recorded, including the nozzle temperature, which ranged from 190 to 230 °C depending on the experimental conditions, and the bed temperature, which varied between 50 and 70 °C to ensure reliable first-layer adhesion. The printing speed was set within the range of 40-80 mm/s, allowing the evaluation of system performance under different dynamic loads, while the layer height was varied between 0.1 and 0.25 mm to represent both high-precision and high-throughput printing modes. The Table 1 also specifies the trajectory planning method applied: either the standard planner or the modified algorithm based on filtered B-splines. Furthermore, typical printing defects were documented, including warping (corner deformation), layer shift, ghosting (resonance-induced surface artifacts), dimensional errors, as well as cases with no observable defects.

In several studies, a scientific gap persists between the dynamic nature of torsional oscillations and the methods employed for their compensation, which are primarily oriented either toward hardware modification or reactive suppression of vibrations in real time. Meanwhile, the approach of vibration compensation at the trajectory planning level, which enables the formation of

control actions while accounting for the system's dynamic constraints prior to the printing process, remains insufficiently explored.

Therefore, the authors identify as a particularly relevant scientific challenge the development of a software-based method for torsional vibration compensation, founded on analytical transformation of motion trajectories and providing selective attenuation of resonant frequencies without compromising geometric accuracy. Such an approach should combine universality, independence from specific hardware implementations, and compatibility with existing trajectory planners, making it a promising solution for a broad class of additive manufacturing systems employing H-bot kinematics.

Table 1 – Experimental data from printing 100 test samples on an H-frame 3D printer using a standard planner and a filtered B-spline-based algorithm

Part ID	Nozzle Temp (°C)	Bed Temp (°C)	Print Speed (mm/s)	Layer Height (mm)	Algorithm	Defects
1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*
1	220	70	40	0.15	Standard	Dimensional error
2	230	50	50	0.1	Standard	Dimensional error
3	210	60	50	0.25	Standard	None
4	230	50	70	0.2	B-spline Filter	None
5	230	70	80	0.25	Standard	None
6	200	70	40	0.1	Standard	Layer shift
7	210	60	40	0.1	B-spline Filter	Ghosting
8	210	50	60	0.25	Standard	Dimensional error
9	210	70	50	0.1	B-spline Filter	None
10	230	60	80	0.25	Standard	None
11	220	70	70	0.2	Standard	Ghosting
12	210	70	50	0.25	B-spline Filter	None
13	230	50	70	0.2	Standard	Dimensional error
14	200	70	60	0.25	Standard	Ghosting
15	220	50	60	0.1	B-spline Filter	None
16	200	70	40	0.25	B-spline Filter	None
17	220	60	80	0.1	Standard	Ghosting
18	230	70	70	0.25	B-spline Filter	None
19	190	50	50	0.25	Standard	Dimensional error
20	220	50	60	0.15	Standard	Warping
21	200	60	40	0.1	B-spline Filter	None
22	230	70	40	0.15	B-spline Filter	None
23	220	70	70	0.1	B-spline Filter	None
24	190	60	60	0.15	B-spline Filter	Dimensional error
25	190	70	80	0.2	B-spline Filter	None
26	210	70	60	0.25	B-spline Filter	None
27	210	50	70	0.1	Standard	Warping
28	200	70	70	0.1	B-spline Filter	None
29	220	70	60	0.25	Standard	Warping
30	220	60	70	0.1	Standard	Ghosting
31	210	60	60	0.1	Standard	None
32	220	50	50	0.15	Standard	None
33	220	70	60	0.1	B-spline Filter	None
34	190	70	60	0.2	B-spline Filter	None
35	210	70	70	0.2	B-spline Filter	None
36	230	50	70	0.25	Standard	Layer shift
37	210	50	40	0.1	Standard	Ghosting
38	230	60	40	0.25	Standard	Dimensional error
39	190	50	50	0.2	Standard	Dimensional error
40	200	70	40	0.1	B-spline Filter	None
41	220	70	60	0.1	B-spline Filter	None
42	190	50	70	0.25	B-spline Filter	Layer shift
43	220	70	40	0.2	Standard	Ghosting
44	200	70	40	0.1	B-spline Filter	Layer shift

45	200	50	50	0.25	B-spline Filter	None
46	190	50	50	0.2	B-spline Filter	None
47	200	70	60	0.25	B-spline Filter	None
48	230	70	70	0.15	Standard	Ghosting
49	200	70	50	0.1	Standard	Warping
50	220	60	40	0.15	Standard	Warping
51	220	60	70	0.2	B-spline Filter	None
52	220	60	70	0.15	Standard	Dimensional error
53	220	50	40	0.15	Standard	Warping
54	230	60	50	0.2	Standard	Warping
1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*
55	210	50	40	0.25	Standard	Dimensional error
56	190	50	70	0.15	B-spline Filter	Layer shift
57	220	60	80	0.25	B-spline Filter	None
58	200	60	80	0.15	Standard	Dimensional error
59	220	60	60	0.25	Standard	Warping
60	200	70	40	0.2	Standard	Warping
61	200	60	40	0.15	Standard	None
62	220	70	60	0.2	Standard	Ghosting
63	230	50	60	0.15	Standard	Ghosting
64	200	70	60	0.2	Standard	None
65	200	60	70	0.2	B-spline Filter	None
66	220	50	40	0.15	B-spline Filter	None
67	200	50	70	0.15	Standard	Dimensional error
68	200	50	60	0.15	Standard	Ghosting
69	220	70	40	0.1	B-spline Filter	Layer shift
70	220	60	70	0.25	B-spline Filter	None
71	190	50	70	0.1	B-spline Filter	None
72	230	50	60	0.1	B-spline Filter	None
73	230	50	40	0.2	Standard	None
74	200	70	60	0.15	Standard	Warping
75	230	70	40	0.25	B-spline Filter	None
76	200	60	80	0.2	Standard	Warping
77	190	70	50	0.1	B-spline Filter	None
78	220	50	50	0.15	B-spline Filter	Layer shift
79	220	60	50	0.2	B-spline Filter	Ghosting
80	220	50	60	0.15	Standard	Warping
81	230	50	80	0.2	B-spline Filter	None
82	190	70	40	0.15	Standard	Dimensional error
83	230	60	70	0.1	B-spline Filter	None
84	230	70	40	0.25	B-spline Filter	None
85	190	70	70	0.1	Standard	Ghosting
86	190	60	40	0.25	B-spline Filter	Dimensional error
87	190	50	80	0.15	B-spline Filter	None
88	190	50	70	0.2	Standard	Layer shift
89	220	60	60	0.1	Standard	None
90	210	50	40	0.25	Standard	Warping
91	210	60	40	0.1	Standard	None
92	190	60	70	0.25	Standard	Warping
93	210	70	60	0.1	B-spline Filter	None
94	210	60	60	0.25	Standard	Ghosting
95	190	70	80	0.25	Standard	None
96	210	50	60	0.15	B-spline Filter	Layer shift
97	230	50	60	0.25	Standard	Dimensional error
98	200	50	60	0.15	B-spline Filter	None
99	200	50	50	0.25	Standard	Ghosting
100	190	70	80	0.2	Standard	Dimensional error

Methodology of Related Work

In this study, a comprehensive approach was applied to identify and eliminate factors contributing to the occurrence of defects. Both methods of preliminary control and statistical analysis were utilized, as well as root cause analysis tools aimed at preventing the recurrence of nonconformities. Particular attention was given to the improvement of technological processes and the implementation of modern quality monitoring systems based on digital technologies. Furthermore, an essential element was the work with personnel, including training, the development of organizational culture, and the establishment of “zero-defect” principles. Such an approach made it possible to ensure the integrity of the quality system and to enhance the resilience of production processes [7].

The H-frame kinematic architecture relies on two parallel timing belts and two stepper motors arranged in such a way that their coordinated motion enables bidirectional positioning of the print carriage. This configuration eliminates the need for complex rail or gantry systems, thereby reducing both the weight and overall cost of the equipment [8].

Nevertheless, this arrangement possesses a critical vulnerability. Since the motions along the X and Y axes are mechanically coupled through a common belt loop, any imbalance in loading or mismatch in driving forces introduces an additional torsional moment acting on the frame [10].

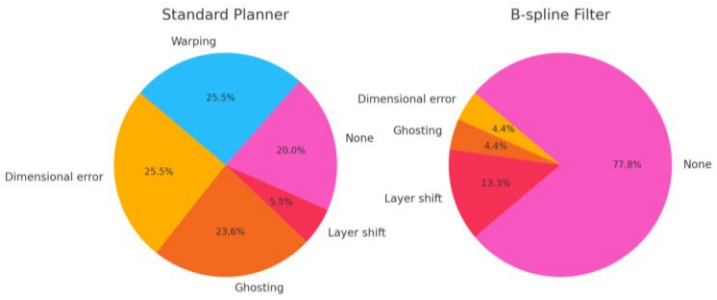


Figure 1 – Distribution of defects by algorithms

The physical nature of the problem is rooted in the dynamics of elastic systems. The drive belts, which constitute the motion mechanism, possess inherent elasticity and compliance. During acceleration, they undergo stretching and compression, generating additional forces. In combination with the inertia of the moving carriage, this creates a system prone to resonance phenomena. When the torsional moment acting on the carriage is not compensated, a twisting effect occurs. The carriage begins to oscillate around its axis, which causes the print head to deviate from the intended trajectory. The frequency of these oscillations is determined by the structural stiffness, the mass of the moving components, and the mechanical properties of the belts. For the H-frame architecture, both low- and mid-frequency resonances are characteristic, and they typically fall within the operational speed range of the printer. As a result, every rapid change of direction effectively excites oscillations that may persist for several milliseconds or even seconds.

Torsional oscillations have a detrimental effect on print quality and can be manifested in several distinct forms. Geometric distortions occur when parts that are intended to be square acquire rounded corners, circular features are deformed into ellipses, and straight lines become displaced. Surface defects represent another characteristic outcome, with the most typical being ghosting, or “echo,” where periodic ripples and repetitive patterns appear adjacent to sharp transitions on the part’s surface. Warping, which is caused by an uneven distribution of stresses, results in the lifting or deformation of corners and edges. Under conditions of severe oscillation, layer shift may occur, whereby an entire layer is displaced relative to the previous one, rendering the part defective. Dimensional inaccuracies are also a common consequence, as the final dimensions deviate from the intended values by tenths or even hundredths of a millimeter, which is particularly critical in engineering applications [11]. Collectively, these effects demonstrate that torsional oscillations are not a secondary issue but a fundamental obstacle to the use of H-frame 3D printers in high-precision engineering, biomedical applications, and the fabrication of functional components.

In response to these challenges, various strategies have been proposed to mitigate vibrations. One of the most straightforward approaches is mechanical reinforcement, which involves the introduction of metal profiles, structural ribs, or thicker guiding rails in order to enhance stiffness. Although such measures reduce oscillation amplitudes, they inevitably increase the weight, cost, and overall complexity of the equipment, reducing its mobility and affordability. Another avenue is

the use of damping mechanisms and passive elements, such as rubber shock absorbers or damping inserts in the drive system. These absorb part of the vibrational energy, but their effectiveness is limited to narrow frequency bands, and their performance degrades with material wear [12]. Classical control systems, including PID-based methods with feedback, have also been applied to monitor the position of the print head and correct the trajectory in real time. However, these techniques face intrinsic delays in sensing and computation, making them insufficient for suppressing high-frequency resonances. Adaptive controllers offer a more sophisticated solution by attempting to predict and compensate oscillations through advanced algorithms, yet their implementation requires significant computational resources, specialized software, and complex tuning, which severely limits their practical application in consumer-grade printers (Figure 2).

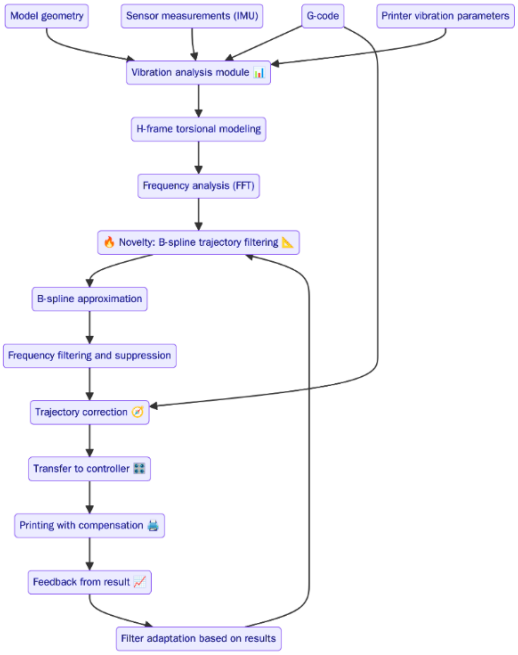


Figure 2 – Workflow of the proposed B-spline-based compensation algorithm for torsional vibration suppression in H-frame 3D printers

A critical analysis of these approaches highlights their limitations. Mechanical enhancements conflict with the trend toward lightweight and cost-effective systems, damping elements cannot cope with broadband vibrations, and feedback-based control is constrained by measurement delays. Even adaptive methods, despite their potential, are too complex and hardware-intensive for widespread use. As a result, none of the conventional solutions provides a comprehensive remedy for the problem of torsional oscillations.

The proposed method is based on torsional vibration compensation at the trajectory planning stage, prior to the generation of control signals for the actuators. In contrast to reactive vibration suppression techniques that rely on real-time feedback, the proposed approach implements preventive trajectory correction, explicitly accounting for the dynamic properties of the kinematic system.

The core idea of the method consists in the analytical transformation of the nominal motion trajectory using filtered B-splines, whose parameters are selected with regard to the spectral characteristics of torsional vibrations inherent to H-bot kinematic architectures. The mathematical model considers torsional oscillations of the H-frame as a result of the interaction between inertial loads induced by accelerated carriage motion and the elastic properties of the structural components.

Given these shortcomings, there is a clear need for an alternative approach that does not require modifications to the hardware, can be implemented purely at the software level, and is capable of selectively attenuating those spectral components of motion that are responsible for resonant torsional oscillations. Such a solution must also be compatible with existing motion planning frameworks to enable straightforward integration. The use of filtered B-spline trajectory generation satisfies these requirements. Unlike rigid digital filters, B-spline filtering combines trajectory

smoothing with frequency selectivity, thereby suppressing critical vibration-inducing components while preserving the accuracy and smoothness of motion. This makes it a particularly promising method for enhancing the performance of H-frame 3D printers without the drawbacks inherent in traditional techniques.

The diagram illustrates the complete workflow of the proposed algorithm for software-based compensation of torsional vibrations in H-frame 3D printers using filtered B-splines. At the initial stage, the system receives input data including the model geometry, the G-code instructions, inertial sensor measurements, and the printer's vibration parameters. These inputs are processed by the vibration analysis module, where torsional behavior of the H-frame structure is modeled, followed by frequency-domain analysis performed using the Fourier transform.

The central element of the methodology is B-spline trajectory filtering, which enables smoothing of the control signals while selectively suppressing the spectral components responsible for exciting resonant oscillations. To achieve this, the original toolpath is first approximated by B-spline curves and then subjected to frequency filtering. The resulting filtered trajectory is used for motion correction and subsequently converted into discrete control commands for the printer's controller.

Printing is then performed with compensation applied, which reduces the amplitude of torsional vibrations and improves the accuracy of geometric reproduction. Finally, the system incorporates feedback from the printed results, allowing filter parameters to be adapted and thereby enhancing the efficiency of the method in subsequent iterations.

Results

During the design and operation of H-frame 3D printers, it was identified that the primary limiting factor for their application in high-precision tasks is associated with resonant torsional oscillations arising from abrupt changes in the trajectory of the print head. Initially, we attempted to mitigate these effects using conventional approaches, such as mechanical reinforcement of the structure, the implementation of dampers, and tuning of classical feedback-based control systems. However, all of these measures demonstrated limited effectiveness.

Mechanical enhancements reduced oscillation amplitudes only partially while significantly increasing the mass and production cost of the device. Damping elements proved effective only within a narrow frequency range and rapidly degraded under prolonged use [13]. Classical PID controllers and adaptive control schemes were likewise insufficient, as they failed to suppress high-frequency resonances due to delays in signal processing and the limited accuracy of sensors. It thus became evident that these approaches do not provide a comprehensive solution and are unsuitable for large-scale implementation.

Statistical processing of the experimental data obtained from a series of 100 printed samples was carried out, which made it possible to increase the reliability and scientific validity of the conclusions drawn in the study. For each analyzed parameter, including dimensional deviations of the printed objects, characteristics of surface structure, and the accuracy of layer formation during the FDM printing process, the main statistical indicators describing the distribution of the experimental dataset were calculated.

The mean value of the studied parameter was determined as the arithmetic average across all experimental observations and was calculated using the following expression:

$$\mu = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \quad (1)$$

where $x_i$represents the measured value of the parameter for the *i*-th sample, and $n$denotes the total number of experimental measurements.

To quantitatively assess the variability of the obtained results and the stability of the technological process, the standard deviation was calculated according to the following formula:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \mu)^2} \quad (2)$$

This indicator characterizes the dispersion of experimental values relative to the mean level and therefore allows evaluation of the stability of the additive manufacturing parameters. In addition, 95% confidence intervals were calculated to improve the reliability of the interpretation of the results and to determine the probable range of variation of the studied parameters in repeated experiments.

To evaluate the statistical significance of differences between the standard printing mode and the mode using the proposed torsional vibration compensation algorithm, a one-way analysis of variance (ANOVA) was applied. The use of this method made it possible to assess the influence of the vibration correction algorithm on the dimensional accuracy of the printed objects. The level of

statistical significance was set at $p < 0.05$, which corresponds to commonly accepted standards for hypothesis testing in engineering and technological research.

The inclusion of statistical analysis in the experimental section allowed the study to move beyond a purely descriptive interpretation of the results toward a quantitatively justified analysis of the observed relationships, thereby significantly improving the scientific reliability and reproducibility of the results presented in this work.

At this stage, we formulated the hypothesis that since the disturbances exhibit a spectral nature, the optimal strategy for suppression should involve modifying the control signals at the trajectory planning stage. Unlike feedback-based methods, this approach avoids latency and, when properly designed, allows selective attenuation of the frequency components responsible for exciting resonant modes.

To realize this idea, we turned to the mathematical framework of B-splines. Their properties—high approximation capability, locality of basis functions, and flexible control of curve smoothness—make them a convenient tool for modeling motion trajectories. However, the use of “pure” B-splines does not completely resolve the problem, as they do not inherently suppress unwanted frequency components. Therefore, we developed a method of spline trajectory filtering that combines the advantages of B-spline smoothing with frequency selectivity.

B-splines (Basis splines) are piecewise polynomial functions that are widely used in approximation and interpolation problems. Their fundamental property lies in the fact that a curve is constructed as a linear combination of basis functions, each of which has a localized region of support. As a result, modifying a single coefficient affects only a limited portion of the curve, making B-splines particularly well suited for applications that require local control over the trajectory shape.

In contrast to high-degree polynomials, which often exhibit instability over long intervals (the so-called Runge phenomenon), B-splines demonstrate excellent numerical stability and guarantee curve smoothness up to the second or even third derivative. This characteristic is of critical importance in motion control tasks, since abrupt changes in acceleration or jerk directly excite oscillations within the mechanical system.

A B-spline curve C(u)C(u)C(u) is defined as a linear combination of control points and basis functions:

$$C(U) = \sum_{i=0}^{n} N_{i,k}(U) P_i \tag{3}$$

where

P_i – are the control points,

$N_{i,k}(U)$ – are the B-spline basis functions of degree k,

U – is the curve parameter.

The basis functions are defined recursively using the Cox–de Boor recursion formula:

$$N_{i,0}(U) = \begin{cases} 1, if\ U_i \le U_{i+1}, \\ 0, otherwise, \end{cases} \tag{4}$$

$$N_{i,k}(U) = \frac{U - U_i}{U_{i+k} - U_i} N_{i,k-1}(U) + \frac{U_{i+k+1} - U}{U_{i+k+1} - U_{i+1}} N_{i+1,k-1}(U) \tag{5}$$

These properties ensure that B-spline curves are flexible, smooth, and numerically stable, which makes them particularly well suited for motion trajectory planning. They provide continuity up to the second or even third derivative, minimizing abrupt changes in acceleration or jerk and thereby reducing the likelihood of exciting structural resonances in mechanical systems.

In the context of the H-frame 3D printer, the proposed method based on B-splines was implemented in several stages. The original G-code trajectory was first divided into smaller segments, after which each segment was approximated by a B-spline curve. This provided a smooth mathematical representation of the motion path, suitable for subsequent processing. The generated spline trajectories were then subjected to frequency-domain filtering, which allowed us to suppress those components responsible for exciting torsional oscillations in the mechanical structure [14]. The filtered trajectory was converted back into discrete motion commands compatible with the printer’s controller, ensuring full integration into the existing motion planning system. As a result, the extruder followed a smoother and more predictable path, while the critical frequencies that had previously triggered resonant vibrations were effectively attenuated.

In our study, B-splines served as a bridge between the mathematical theory of approximation and the practical challenge of motion control in H-frame 3D printers. Their implementation made it

possible to simultaneously address two critical tasks: smoothing the commanded trajectories and suppressing the spectral components responsible for exciting torsional vibrations. From a mathematical perspective, B-splines guarantee continuity up to the second and even third derivative, thereby eliminating abrupt jumps in acceleration and jerk, which are the primary triggers of resonant modes. From a practical standpoint, the local support of the basis functions allowed trajectory adjustments without distorting the original geometry of the model, thus preserving positioning accuracy.

The experimental series involving the printing of 100 test samples confirmed the effectiveness of the proposed approach. With the standard motion planner, only about 20% of the parts were produced without defects, whereas the use of filtered B-splines increased this share to 77.8%. Warping defects were completely eliminated, ghosting was significantly reduced, and dimensional errors decreased more than sixfold. These results demonstrate that B-splines were not only a theoretically justified tool for trajectory smoothing but also proved their practical value under experimental conditions, delivering substantial improvements in print quality without any hardware modifications to the printer.

Discussion

This study addressed the scientific problem of torsional vibrations in 3D printers with H-bot kinematic architectures, which significantly degrade positioning accuracy and print quality, manifesting as geometric distortions, surface defects, and dimensional inaccuracies. It was demonstrated that conventional vibration mitigation approaches – such as structural reinforcement, the use of damping elements, and classical or adaptive control strategies – exhibit fundamental limitations related to increased system mass, greater hardware complexity, and insufficient adaptability to varying printing regimes. These constraints motivate the development of alternative software-based approaches to torsional vibration compensation.

In this work, a trajectory-level torsional vibration compensation method based on the use of filtered B-splines was proposed. The method integrates the approximation and smoothing properties of B-spline curves with frequency-domain filtering of control trajectories, enabling selective attenuation of spectral components responsible for exciting resonant torsional modes. A key advantage of the proposed approach is its implementation at the trajectory planning stage, which eliminates feedback-induced delays and does not require any modification of the printer's hardware. The obtained results indicate that the proposed method constitutes a universal algorithmic tool for compensating dynamic motion distortions in additive manufacturing systems employing H-bot kinematics. By analytically transforming motion trajectories, the method enhances geometric accuracy and process stability and can be seamlessly integrated into existing motion planning frameworks without altering their core architecture.

Filtered B-splines can be regarded as an effective and theoretically justified means of torsional vibration compensation in additive manufacturing systems. The proposed approach establishes a methodological foundation for further research in intelligent trajectory planning and software-based motion stabilization in high-speed kinematic systems.

The present study does not represent the final stage of the research. Ongoing experimental investigations under laboratory conditions are focused on an in-depth analysis of dynamic processes leading to defect formation during printing. A promising direction for future work involves the development of an intelligent early anomaly detection system, based on the analysis of motion trajectories, vibration signals, and surface characteristics of printed parts using artificial intelligence and machine learning techniques. The integration of such intelligent analysis into the control loop is expected to enable adaptive compensation of internal and external disturbances in real time, thereby further enhancing the reliability and precision of additive manufacturing technologies.

References

1. Sculpteo, Inc., The state of 3D printing: the data you need to understand the 3D printing world and build your 3D printing strategy, San Francisco, CA, 2019.
2. Comb J.W. Gantry assembly for use in additive manufacturing system. U.S. Patent Application № 20130078073(A1) / J.W. Comb, W.J. Swanson, J.L. Crotty // Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Of-nice, 2011.
3. Clavel R. Device for the movement and positioning of an element in space, U.S. Patent № 4,976,582. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office, 1990.
4. Moyer I.E. CoreXY, 2012. https://corexy.com/theory.html (accessed 27 June 2020).

5. Sollmann K.S. Dynamic modeling of a two-axis, parallel, H-frame-type XY positioning sys-tem / K.S. Sollmann, M.K. Jouaneh, D. Lavender // IEEE/ASME Trans. Mechatronics. – 2010. – № 15(2). – P. 280-290. https://doi.org/10.1109/TMECH.2009.2020823.
6. Phanomchoeng G. Adaptive Gain Control for a Two-Axis, H-Frame-Type, Positioning System / G. Phanomchoeng, R. Chancharoen // Engineering Journal. – 2017. – № 21(3). – P. 223-34. https://doi.org/10.4186/ej.2017.21.3.223.
7. Stratasys Inc. 3D printers. http://www.stratasys.com/3d-printers (ac-cessed 27 June 2020).
8. MakerBot 3D printers. https://www.makerbot.com/3d-printers / (ac-cessed 27 June 2020).
9. Creality Ender 4: Review the specs, Al3DP. – 2019. https://all3dp.com/1/creality-ender-4-3d-printer-review / (accessed 27 June 2020).
10. Go J. Fast desktop-scale extrusion additive desktop-scale manufacturing / J. Go, A.J. Hart // Addit. Manufac. – 2017. – № 18. – P. 276-284. https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.10:016.
11. Kraveenthar K. H-Bot mechanism racking issue – 3D printing, YouTube. – 2017. https://www.youtube.com/watch?v=2_wWr66b16Q (accessed 27 June 2020).
12. G. Coetzee, Design analysis: Core XY vs H-Bot. – 2016. https://hackaday.com/2016/02/29/design-analysis-core-xy-vs-h-bot/ (accessed 27 June 2020).
13. Avdeev A.R. Investigation of Kinematics of 3D Printer Print Head Moving Systems / A.R. Avdeev, A.A Shvets, I.S. Torubarov, // 5th Int. Conf. on Industrial Engineering. – 2020. – P. 461-471. https://doi.org/10.1007/978-3-030- 22041-9_50.
14. Sollmann K.S. Modeling, simulation, and control of a belt-driven, parallel H-frame type two axes positioning system / Sollmann K.S. // Master's Thesis, University of Rhode Island, South Kingstown, Rhode Island, USA. – 2007. https://digitalcommons.uri.edu/theses/607 / (accessed 27 June 2020).

А. Кенжебай[*], А. Тыныкулова[2], Г. Енсебаева[1], С. Жакипбеков[3], К. Бакенова[4]
[1]Әлихан Бөкейхан университеті,
070100, Қазақстан Республикасы, Семей қаласы, Мәңгілік Ел көшесі, 11
[2]Астана халықаралық университеті,
010000, Қазақстан Республикасы, Астана қаласы, Қабанбай батыр даңғылы, 8
[3]«Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті» АҚ,
050016, Қазақстан Республикасы, Алматы қаласы, Манас көшесі, 34/1
[4]Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
010000, Қазақстан Республикасы, Астана қаласы, Сатпаев көшесі, 2
*e-mail: salik2000@icloud.com

H-ТӘРІЗДІ 3D-ПРИНТЕРЛЕРДЕГІ БҰРАЛУ ТЕРБЕЛІСТЕРІН БАҒДАРЛАМАЛЫҚ ӨТЕУ АЛГОРИТМДЕРІ (ФИЛЬТРЛЕНГЕН B-СПЛАЙНДАР НЕГІЗІНДЕ)

Мақалада H-тәрізді кинематикасы бар 3D-принтерлердің позициялау жүйелеріндегі бұралу тербелістерін бағдарламалық түрде компенсациялау әдісі ұсынылған, ол қозғалыс траекториясын жоспарлау кезеңінде сүзгіден өткен B-сплайндарды қолдануға негізделген. Зерттеудің өзектілігі H-тәрізді рамалардың конструктивтік ерекшеліктеріне байланысты туындайтын бұралу тербелістерін басуда дәстүрлі механикалық және басқару шешімдерінің шектеулі тиімділігімен айқындалады.

Ұсынылған әдіс басқару траекторияларын B-сплайндық аппроксимациялау функцияларын қолдана отырып аналитикалық түрлендіруге негізделеді, мұнда олардың параметрлері бұралу тербелістерінің спектрлік талдауы негізінде анықталады. Қатаң сандық сүзгілеуге немесе нақты уақыттағы адаптивті басқаруға негізделген қолданыстағы тәсілдерден айырмашылығы, әзірленген әдіс траекторияның геометриялық дәлдігін бұзбай, резонанстық жиіліктерді селективті түрде басуды қамтамасыз етеді. Зерттеу аясында H-тәрізді кинематикалық жүйедегі бұралу тербелістерінің математикалық моделі әзірленіп, оның жиіліктік сипаттамалары талданды және қозғалыстың динамикалық бұрмалануларын компенсациялау үшін B-сплайндық сүзгілеуді қолданудың негіздемесі берілді. Сандық модельдеу нәтижелері тербеліс амплитудасының едәуір төмендеуін және басып шығару басының позициялау қатесінің азаюын растады. Алынған нәтижелер ұсынылған әдістің стандартты траектория жоспарлаушыларға интеграциялауға бағытталған әмбебап алгоритмдік тәсіл екенін көрсетеді және оны аппараттық бөлікті модификацияламай-ақ H-тәрізді кинематикасы бар аддитивті жүйелердің кең ауқымында қолдануға болатынын дәлелдейді.

Түйін сөздер: *3D-принтерлер; H-тәрізді кинематика; бұралу тербелістері; бағдарламалық өтеу; фильтрленген B-сплайндар; траекторияны түзету; спектралдық талдау; тербелістер; баспа сапасы; қозғалыс жоспарлаушы.*

А. Кенжебай[*], А. Тыныкулова[2], Г. Енсебаева[1], С. Жакипбеков[3], К. Бакенова[4]
[1]Университет Алихана Бокейхана,
070100, Республика Казахстан, город Семей, улица Мәңгілік Ел, 11
[2]Астанинский международный университет,
010000, Республика Казахстан, город Астана, проспект Кабанбай батыра, 8
[3]АО «Международный университет информационных технологий»,
050016, Республика Казахстан, город Алматы, улица Манаса, 34/1
[4]Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева,
010000, Республика Казахстан, город Астана, улица Сатпаева, 2
*e-mail: salik2000@icloud.com

АЛГОРИТМЫ ПРОГРАММНОЙ КОМПЕНСАЦИИ СКРУЧИВАЮЩИХ КОЛЕБАНИЙ В Н-ОБРАЗНЫХ 3D-ПРИНТЕРАХ НА ОСНОВЕ ФИЛЬТРОВАННЫХ B-СПЛАЙНОВ

В статье представлен метод программной компенсации скручивающих колебаний в системах позиционирования 3D-принтеров с Н-образной кинематикой, основанный на применении фильтрованных B-сплайнов на этапе планирования траектории движения. Актуальность исследования обусловлена ограниченной эффективностью традиционных механических и управляющих решений при подавлении крутильных колебаний, возникающих вследствие конструктивных особенностей Н-образных рам. Предложенный метод заключается в аналитическом преобразовании управляющих траекторий с использованием B-сплайновых аппроксимирующих функций, параметры которых определяются на основе спектрального анализа скручивающих колебаний. В отличие от существующих подходов, основанных на жёсткой цифровой фильтрации или адаптивном управлении в реальном времени, разработанный метод обеспечивает селективное подавление резонансных частот без искажения геометрической точности траектории.

В рамках исследования разработана математическая модель скручивающих колебаний Н-образной кинематической системы, выполнен анализ её частотных характеристик и обоснована применимость B-сплайновой фильтрации для компенсации динамических искажений движения. Результаты численного моделирования подтверждают существенное снижение амплитуды колебаний и уменьшение ошибки позиционирования печатающей головки. Полученные результаты демонстрируют, что предложенный метод представляет собой универсальный алгоритмический подход, ориентированный на интеграцию в стандартные планировщики траекторий, и может быть применён для широкого класса аддитивных систем с Н-образной кинематикой без модификации аппаратной части.

Ключевые слова: *3D-принтеры; Н-образная кинематика; скручивающие колебания; программная компенсация; фильтрованные B-сплайны; коррекция траектории; спектральный анализ; вибрации; качество печати; планировщик движения.*

Сведения об авторах

Арайлым Кенжебай* – докторант ОП 8D06110-«Информатика» Alikhan Bokeikhan University, Семей, Казахстан; e-mail: salik2000@icloud.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-5465-0634.

Асемгуль Тыныкулова – PhD, и.о. ассоциированный профессор, Международный университет Астана, Астана, Казахстан; e-mail: asem_110981@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4557-6869.

Гульшат Енсебаева – кандидат педагогических наук, доцент, Alikhan Bokeikhan University, Семей, Казахстан; e-mail: enss_gulshat@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-4625-3898.

Сырым Жакипбеков – магистр, АО «Международный университет информационных технологий», Алматы, Казахстан; e-mail: syrymzhakypbekov@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9112-5922.

Камила Бакенова – PhD студент. Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан; e-mail: bakenova.k@bk.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-2567-173X.

Авторлар туралы ақпарат

Арайлым Кенжебай* – 8D06110-«Информатика» білім беру бағдарламасының докторанты, Alikhan Bokeikhan University, Семей қ., Қазақстан; e-mail: salik2000@icloud.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-5465-0634.

Асемгүл Тыныкулова – PhD, қайымдастырылған профессор м.а., Астана халықаралық университеті, Астана қ., Қазақстан; e-mail: asem_110981@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4557-6869.

Гүлшат Енсебаева – педагогика ғылымдарының кандидаты, доцент, Alikhan Bokeikhan University, Семей қ., Қазақстан; e-mail: enss_gulshat@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-4625-3898.

Сырым Жақыпбеков – магистр, «Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті» АҚ, Алматы қ., Қазақстан; e-mail: syrymzhakypbekov@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9112-5922.

Камила Бакенова – PhD студент, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан; e-mail: bakenova.k@bk.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-2567-173X.

Information about the authors

Arailym Kenzhebay* – doctoral student, Alikhan Bokeikhan University, Semey, Kazakhstan; e-mail: salik2000@icloud.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-5465-0634.

Assemgul Tynykulova – PhD, acting Associate Professor, Astana International University, Astana, Kazakhstan; e-mail: asem_110981@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4557-6869.

Gilshat Yensebayeva – Candidate of Pedagogical Sciences senior teacher department «Information and technical sciences», Alikhan Bokeikhan University, Semey, Republic of Kazakhstan; email: enss_gulshat@mail. ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-4625-3898.

Syrym Zhakypbekov – Master of Computer Science, International Information Technology University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: syrymzhakypbekov@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9112-5922.

Kamila Bakenova – PhD student. L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; e-mail: bakenova.k@bk.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-2567-173X.

Received 06.01.2026
Revised 05.03.2026
Accepted 10.03.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-24

IRSTI: 20.23.25

CC BY 4.0
Check for updates

Zh.B. Lamasheva[1,2], M.A. Sambetbayeva[1,2,*], A.N. Nekessova[1,2,3], B.Kh. Abdygalym[1,2,3], N. Tasbolatuly[1,3]

[1]International Science Complex Astana,
010000, Republic of Kazakhstan, Astana, avenue. Kabanbai Batyr 8
[2]L.N. Gumilyov Eurasian National University,
010008, Republic of Kazakhstan, Astana, Satpayev str. 2.
[3]Astana International University,
010000, Republic of Kazakhstan, Astana, avenue. Kabanbai Batyr 8
*e-mail: sambetbayeva_ma_1@enu.kz

INTELLIGENT FAKE NEWS DETECTION SYSTEM BASED ON ONTOLOGICAL MODEL AND SEMANTIC MARKUP OF MEDIA TEXTS

Abstract: *This paper presents a framework for fake news detection based on ontological modeling and semantic annotation of media texts. The study includes a bibliometric analysis of Scopus publications from 2018 to 2026 to identify trends in fake news detection and semantic approaches. The results show a shift from traditional machine learning methods toward transformer-based, graph-based, and semantic models. An adaptive system architecture is proposed, covering data collection, preprocessing, multi-level annotation in Label Studio, knowledge graph construction, model training, inference, and analytics. A formal ontological model was developed to structure the key elements of news texts, including claim, source, evidence, author intent, target audience, and disinformation techniques. The framework supports multilingual processing in Kazakh and Russian. The dataset consists of 5,000 news articles, evenly distributed between fake and real categories and balanced across both languages. Annotation quality was evaluated using Cohen's Kappa, with values ranging from 0.72 to 0.81, indicating consistent inter-annotator agreement. The proposed approach provides a structured basis for the further development and evaluation of automated fake news detection systems in multilingual environments.*

Key words*: Fake news, fake news detection, ontological model, semantic markup, semantic analysis.*

Introduction

©Zh.B. Lamasheva, M.A. Sambetbayeva, A.N. Nekessova, B.Kh. Abdygalym, N. Tasbolatuly, 2026

In recent years, fake news detection has evolved from a *classic* textual classification problem to an interdisciplinary direction at the intersection of computational linguistics, computer vision, and graph theory. This was facilitated by the explosive growth of user content, the acceleration of disinformation cycles and the spread of large language/multimodal models, which increased the requirements for methods: they are expected to be able to identify semantic inconsistencies, consider visual signals, and rely on structural knowledge about sources and distribution. At the same time, the field remains methodologically heterogeneous: deep representations coexist with the features of the *old school*, and graph and multimodal solutions place increased demands on data, annotations, and validation.

The study [1] proposes an approach to increasing the reliability of automated fact-checking by filtering leaks and unreliable sources. The authors presented the CREDULE dataset, which includes more than 90 thousand news articles classified as reliable, unreliable and fact-checking, and also developed a neural network model EVER-Net, capable of automatically detecting *leaky* and unreliable evidence. The results demonstrate a significant improvement in the accuracy of automatic fact-verification systems and highlight the need for a comprehensive assessment of evidence sources in the fight against misinformation. The FactCheck Editor system is presented in [2], which provides automated fact checking in a multilingual environment. The developed tool integrates the functions of identifying statements requiring verification, generating search queries and extracting relevant evidence from open sources. Verification is carried out using Natural Language Inference (NLI) models and leverages LLM, which allow not only for determining the validity of statements but also for suggesting their correct formulations. The authors have shown that the XLM-Roberta-large model, which has been refined on multilingual data, surpasses the large language models (GPT-3,5-Turbo, Mistral-7b) in solving problems related to statements detection and truth prediction. The work emphasizes the potential of combining transformational and generative models to create of full-fledged automated fact-checking systems.

The study [3] introduces FactCheck Editor, which implements multilingual automated fact checking based on transformational models and LLMs, allowing the system to identify, verify, and correct false statements in the text. In modern research, the methods of machine (mL) and deep learning (DL) are actively used to solve the problems of information reliability analysis [4-6]. In the reviewed works, it is shown that the use of neural network architectures, especially models based on transformers (BERT, Roberta), significantly increases the effectiveness of detection of fake news and automatic fact-checking. These approaches demonstrate high accuracy and stability in the processing of texts of various subjects.

Related works

Modern research in the field of fake news detection focuses on a combination of machine learning techniques, natural language analysis, and graph analysis [7-8]. Particular attention is paid to the integration of ontological models, which allow the formalization of subject areas and increase the interpretability of the results. The use of ontologies contributes to a deeper understanding of the context, the identification of hidden semantic connections between objects and the refinement of semantic features, which increases the accuracy of the classification of news reports. Adaptive architectures of intelligent systems are also actively being developed, capable of dynamically updating knowledge and analysis parameters depending on changes in the information environment. Such solutions provide adaptation to the emergence of new types of disinformation and create the basis for constructing explainable and context-sensitive models for detecting fake news. Earlier, in [9], the authors proposed for the first time proposed a multi-level annotation model adapted to Kazakh and Russian languages, which goes beyond the binary classification. Unlike simple models focused only on the detection of authenticity, this scheme takes into account the deep semantic structure of the text, discursive features and cultural-specific elements inherent in the Kazakh and Russian media space. The multilevel scheme allows for describing not only the fact of the presence of disinformation, but also its type, context, motive and degree of distortion of the content.

Bibliometric analysis was performed on a sample of Scopus for 2018-2026 at the request of key («fake news detection» AND semantic) in the subject area of Computer Science (with intersections with other areas). The array includes 128 documents from 66 sources, prepared by 417 authors; the average number of co-authors per publication is 4.39, the share of international co-authorship is 21.09% (see Fig. 1). The cumulative average annual growth rate is 5.2%, the average age of the document is 1.68 years, the average number of citations per publication is 14.38, indicating the relevance of the topic and active knowledge exchange.



Figure 1 – Bibliometric survey of publications (2018-2025)

There has been a steady increase from a single publication in 2018-2020 to a local high in 2024 (≈39 articles), followed by a moderate decline in 2025 (≈33) and incomplete reporting for 2026 due to the current Scopus indexing window (see Fig. 2a). The acceleration after 2022 coincides with the proliferation of large language models (LLMs) and the transition to multimodal architectures, which is further manifested in thematic clusters.

The bibliometric profile indicates the maturity and diversification of the area: the volume of publications and the range of sources are growing, international co-authorship is strengthening, and the thematic dictionary (≈329 author keywords) demonstrates a high level of fragmentation. For 2023-2025, three leading trajectories are clearly distinguished: semantic (knowledge-guided) NLP, multimodal fusion, and graph-based detection. In the following sections, we examine the evolution of methods along these lines and identify key research gaps, particularly in multilingual and low-resource contexts (including the Kazakh-Russian corpus and the HITL annotation).

A diagram created by VOSviewer (see Fig. 2b) shows the relationships between the most common terms in scientific publications on the topic of fake news detection and semantics. The size of the nodes corresponds to the frequency of term occurrence, and the distance between them reflects the strength of their co-occurrence. Colors represent thematic clusters:

red – methods of machine learning and natural language processing;

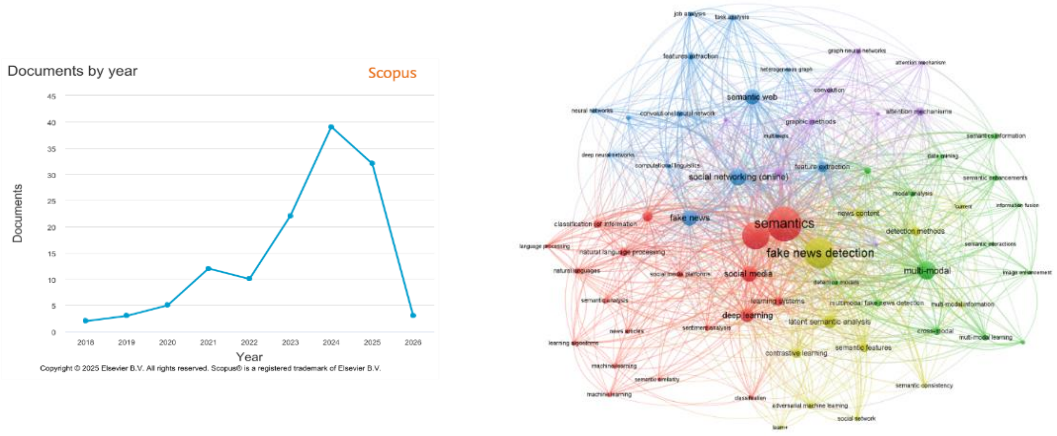
green – multimodal approaches and image analysis;

blue – social networks and information dissemination;

purple – trust, emotions and interpretation of content;

yellow – semantic and contextual aspects of data analysis, including thematic modeling and knowledge representation.

The central position of the terms “fake news detection” and “semantics” underscores their key role in the structure of the research field.



(a) (b)

Figure 2 – a) Documents by year (2018-2026, Scopus). Local maximum in 2024; 2026 is incomplete; b) Visualization of a network of key terms in the field of detection of fake news

As shown in Table 1, existing approaches focus on evidence verification, multilingual pipelines, contextual retrieval, or graph neural network modeling. However, none of them provide a formally defined ontology within a unified semantic framework integrated with knowledge graph

construction and multi-level annotation. Current graph-based solutions rely primarily on structural representations without explicit semantic formalization. The proposed model differs in that it combines an explicit ontology, knowledge graph construction, transformer-based architectures, and structured multi-level annotation, while also addressing a low-resource Kazakh-Russian multilingual environment.

Materials and Methods

Figure 3 presents the full data processing pipeline, including data collection from external media sources, preprocessing, multi-level semantic annotation, knowledge graph construction, transformer-based model training, inference, and analytics. The architecture implements a closed machine learning cycle (collection → processing → annotation → training → inference → feedback) and is designed to support ontology-driven multilingual (Kazakh-Russian) misinformation detection. The figure illustrates the hypothesis that integrating semantic annotation, knowledge graphs, and transformer architectures within a unified pipeline enables structured and interpretable fake news analysis.

Table 1 – Comparison of Selected Fake News Detection Approaches

Ref	Core Method	Ontology (Formalized)	Knowledge Graph	GNN	Multilingual	Low-Resource Focus	Multilevel Semantic Annotation	Explainability Mechanism	Adaptability to New Sources	Transformer-based
[1]	Evidence verification (NN)	No	No	No	Limited	No	No	Limited (evidence scoring)	Limited	Yes
[2]	End-to-end multilingual fact-hecking	No	No	No	Yes	No	No	Limited (NLI reasoning)	Moderate	Yes
[7]	Contextualized evidence retrieval	No	Partial	No	Yes	No	No	Retrieval-based	Moderate	Yes
[8]	Heterogeneous GNN + LLM	No explicit ontology	Yes	Yes	Limited	No	No	Graph attention weights	Moderate	Yes
Proposed model	Ontology + KG + Transformers + Multilevel Annotation	Yes (explicit ontology)	Yes (explicit KG)	Optional	Kazakh-Russian	Yes	Yes (structured)	Ontology-driven interpretability	High (adaptive pipeline)	Yes

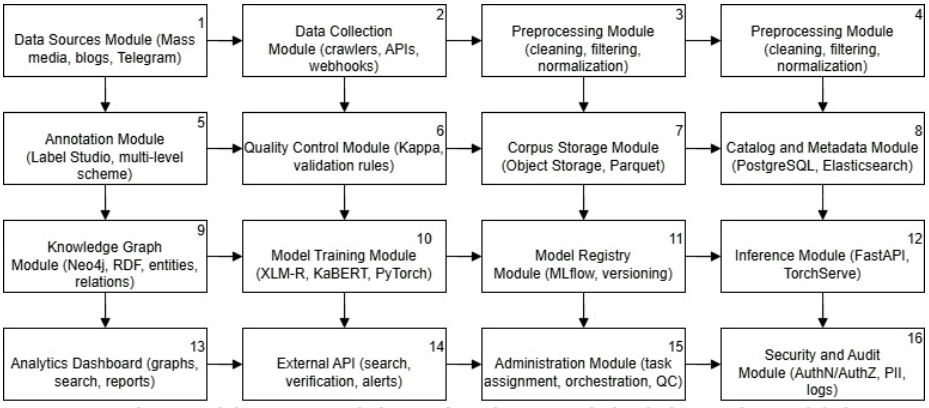


Figure 3 – The architecture of the adaptive model of detection of fake news

The technical outcome of the proposed architecture lies in enabling automatic detection and classification of fake news and subtypes of disinformation within a structured semantic framework. The integration of ontology-driven annotation, knowledge graph construction, and transformer-based modeling supports multilingual analysis (Kazakh and Russian) and provides a foundation for adaptive processing of new information sources. The system is designed to maintain consistency of semantic representation across the full processing cycle.

This ontological scheme defines the structural relationships between key elements of an information message in the context of fake and real news. The purpose of Figure 4 is to formalize the semantic architecture of news annotation within the proposed framework and to illustrate the claim-centered modeling approach adopted in this study. Figure 4 presents a semantic model in

which CLAIM serves as the central entity connected to message type (FAKE_NEWS / REAL_NEWS), source attribution, supporting evidence, communicative intent, target audience, and disinformation techniques. The model reflects the hypothesis that structuring news content around explicitly defined entities and relations enables consistent annotation, supports knowledge graph construction, and provides a formal basis for automated analysis. The following elements and relations are represented in the figure:

FAKE_NEWS is linked to CLAIM through the relation hasClaim, indicating that a false report contains a specific statement.

REAL_NEWS is linked to CLAIM through the relation hasClaim, showing that verified news is also structured around a defined statement.

CLAIM is linked to EVIDENCE via the relation supportedBy, representing supporting (or pseudo-supporting) information.

CLAIM is linked to SOURCE through the relation fromSource, identifying the origin of the statement.

CLAIM is linked to AUTHOR_INTENT via the relation expressesIntent, reflecting the communicative purpose behind the statement.

CLAIM is linked to TARGET_AUDIENCE through the relation targets, defining the intended recipients of the message.

CLAIM is linked to DISINFORMATION_TECHNIQUE via the relation usesTechnique, indicating the manipulation strategy applied in the message.

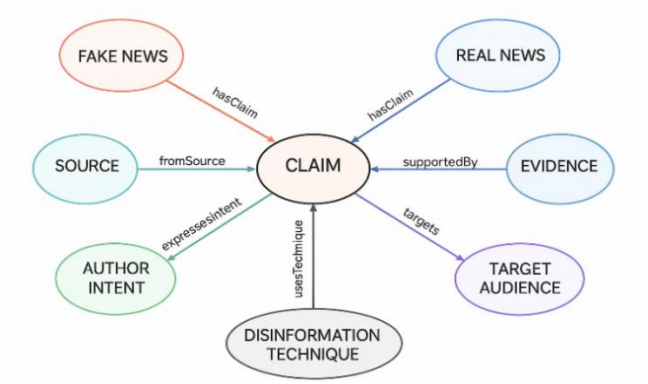


Figure 4 – Semantic model of annotation of news reports

To build a unified body of news messages, a multi-level markup scheme was developed and implemented in Label Studio. This scheme allows the identification of the key structural elements of both fake and real news, i.e., the source, the main statement, time references, and fragments containing supporting or contextualizing information, as well as the recording of manipulative techniques used in the message, the author's intent, and the target audience.

Dataset

The dataset consists of 5,000 news articles, evenly distributed between fake and real news (50% each). The corpus is balanced across two languages: 50% of the texts are in Kazakh and 50% in Russian. This balanced distribution ensures equal representation of classes and languages during training and evaluation. The average text length is approximately 230 characters, reflecting short-format news messages typical for online media and social platforms. The dataset was manually annotated using a multi-level semantic scheme implemented in Label Studio. To assess annotation consistency, inter-annotator agreement was calculated using Cohen's Kappa. The obtained values range from 0.72 to 0.81, indicating substantial agreement across annotation categories. These results confirm the internal consistency of the annotation scheme and its suitability for further model training and evaluation.

Results

The news item (see Fig. 5) about the alleged free public transport in Astana on behalf of City Transportation Systems (CTS) was annotated in Label Studio as FAKE_NEWS with the subtypes FABRICATED_NEWS and MISLEADING_CONTENT; additionally, the disinformation techniques CLICKBAIT and EXAGGERATION were identified, and the author's intent was classified as ATTRACTION_ATTENTION and FINANCIAL_GAIN. The text highlights the entities of SOURCE ("City Transportation Systems (CTS)"), CLAIM (a single fragment that includes the title and the main

promise of free travel for 6 and 12 months), TIME ("on the occasion of the 15th anniversary"), and two fragments of EVIDENCE (a description of the "Arnaya card" and a proposal with a hyperlink). There are semantic relationships between the entities: HAS_CLAIM from SOURCE to CLAIM (source → claim), HAS_TIMESPAN from CLAIM to TIME (claim → TIME), and two SUPPORTED_BY relations reflecting that the main statement relies on pseudo-evidence (claim → EVIDENCE).

This example illustrates how the proposed annotation scheme captures the internal structure of promotional disinformation by linking the main claim with temporal framing and supporting pseudo-evidence. The figure demonstrates the applicability of the ontology-driven model to Kazakh-language content and shows how communicative intent and manipulation techniques are formalized within a unified semantic framework.



Figure 5 – An example of a manual annotation in the Kazakh language indicating all the entities of the scheme

The markup carried out in Label Studio allowed the formalization of the structure of fake news messages, highlighting their key components, such as source, statement, time binding**,** and elements of pseudo-proof, as well as establishing connections between them through semantic relationships. This approach not only systematizes the internal logic of disinformation dissemination but also creates a uniform annotated corpus necessary for the subsequent training and validation of automatic fake news detection models. The use of multi-level markup also enables the analysis of typical manipulation strategies, author intent, and target groups, which may improve the quality of model predictions and contribute to the development of more robust NLP systems against the spread of misinformation.

Annotation Quality Assessment (Cohen's Kappa)

To assess the consistency and reproducibility of the annotation scheme, percentage distributions of annotated entities were compared between two independent annotators, and Cohen's Kappa was calculated. Higher Kappa values for SOURCE (0.81) and CLAIM (0.78) indicate clearer formal definitions and stable identification in news texts. Lower values for categories such as AUTHOR_INTENT and FAKE_NEWS reflect their greater contextual and interpretative complexity (Table 2) [9].

Table 2 – Distribution of annotated entities and inter-annotator agreement (Cohen's Kappa) across main categories

Category	Annotator 1 (%)	Annotator 2 (%)	Cohen's Kappa
FAKE_NEWS	6.5%	6.3%	0.72
REAL_NEWS	7.0%	6.9%	0.74
SOURCE	25.3%	25.2%	0.81
CLAIM	28.5%	28.4%	0.78
EVIDENCE	8.0%	8.1%	0.76
DISINFORMATION_TECHNIQUE	6.5%	6.6%	0.74
AUTHOR_INTENT	6.2%	6.1%	0.73
TARGET_AUDIENCE	6.0%	6.1%	0.72
TIMESTAMP	5.0%	5.2%	0.75

As a result of the annotation quality assessment using Cohen's Kappa coefficient, the proposed annotation scheme demonstrated a substantial level of inter-annotator agreement. The annotation was performed according to predefined guidelines within the Label Studio environment, and agreement was evaluated across the main annotation categories (FAKE_NEWS, REAL_NEWS, SOURCE, CLAIM, EVIDENCE, DISINFORMATION_TECHNIQUE, AUTHOR_INTENT, TARGET_AUDIENCE, TIMESTAMP). The obtained Cohen's Kappa values range from 0.72 to 0.81, corresponding to the level of substantial agreement, while the SOURCE category (0.81) approaches almost perfect agreement. The highest agreement was observed for SOURCE (0.81) and CLAIM (0.78), indicating clearer and more stable interpretation of these categories during annotation. In contrast, slightly lower values for FAKE_NEWS (0.72), AUTHOR_INTENT (0.73), and TARGET_AUDIENCE (0.72) reflect their greater semantic complexity and contextual dependence.

Discussion

The study presents an ontology-based framework for fake news detection that combines semantic markup, knowledge graph construction, and transformer-based modeling. The proposed annotation scheme formalizes key elements of news texts, including claim, source, evidence, time reference, author intent, and target audience. Manual annotation of 5,000 news articles in Kazakh and Russian showed consistent application of the scheme. The Cohen's Kappa values (0.72-0.81) indicate stable inter-annotator agreement across categories. More structurally defined entities, such as SOURCE and CLAIM, demonstrated higher agreement, while context-dependent categories showed slightly lower consistency. The results confirm that the ontology and multi-level markup can be applied in a multilingual setting and can serve as a structured basis for further model training and analysis.

Limitations

The study focuses on the design of the ontology and annotation framework. A comparative experimental evaluation with baseline machine learning or transformer-only models was not conducted. The dataset is limited to 5,000 news texts in Kazakh and Russian, which restricts generalization to other languages and media contexts. The annotation process relies on manual labeling, which requires time and expert involvement. The current implementation considers only textual content and does not include multimodal signals such as images or video. The system has also not been tested in real-time deployment conditions.

Conclusion

The paper proposes an integrated approach to building an intelligent fake news detection system that combines ontological modeling, semantic markup, and modern NLP methods. A bibliometric analysis of Scopus publications (2018-2026) shows a steady rise in interest in fake news detection and semantics, a shift from classical ML methods to semantic, graph-based, and multimodal models, and the strengthening of transformer architectures in news analysis. The developed adaptive system architecture supports the full data processing cycle: collection, preprocessing, annotation, storage, model training, and visual analytics. A key element is the ontological model and multi-level markup scheme implemented in Label Studio, formalizing the internal structure of news messages. The annotation scheme captures key entities (source, claim, EVIDENCE, TIME) and classification categories (DISINFORMATION_TECHNIQUE, REAL_NEWS / FAKE_NEWS, FAKE_SUBTYPE, AUTHOR_INTENT, TARGET_AUDIENCE), as well as their semantic relationships. This ensures high interpretability and forms a corpus suitable for machine learning. Manual annotation results confirmed that the scheme consistently describes both fake and real news. The identification of entities and communicative characteristics provides a holistic representation of news logic. The scheme forms a foundation for developing robust NLP models in multilingual environments. The proposed architecture and ontology enable next-generation intelligent systems for detecting fake news and analyzing disinformation processes. Future work includes experimental validation, markup automation, corpus expansion, multimodal models, and explainable AI to strengthen trust and transparency.

The proposed ontology-driven framework can be applied in media monitoring systems and digital content moderation platforms. The structured representation of claims, sources, and manipulation techniques enables more transparent analysis of news content and may support faster identification of potentially misleading information. The integration of semantic annotation and knowledge graph construction can reduce manual verification workload by structuring information

for automated processing. The approach may also contribute to improving trust in digital platforms by providing interpretable explanations of detection results.

References

1. Credible, unreliable or leaked? Evidence verification for enhanced automated fact-checking / Z. Chrysidis et al // Proceedings of the 3rd ACM International Workshop on Multimedia AI against Disinformation. – 2024. – P. 73-81. https://doi.org/10.1145/3643491.366027.
2. Setty V. Factcheck editor: Multilingual text editor with end-to-end fact-checking / V. Setty // Proceedings of the 47th International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval. – 2024. – P. 2744-2748. https://doi.org/10.1145/3626772.3657663.
3. Toward automated factchecking: Developing an annotation schema and benchmark for consistent automated claim detection / L. Konstantinovskiy et al // Digital threats: research and practice. – 2021. – Т. 2, № 2. – P. 1-16. https://doi.org/10.1145/3412869.
4. Indonesian fake news detection using various machine learning technique / L. Triyono et al // International Journal on Informatics Visualization. – 2023. – Т. 7, № 3. – P. 726-732. https://doi.org/10.30630/joiv.7.3.1243.
5. Abumansour A.S. Check-worthy claim detection across topics for automated fact-checking / A.S. Abumansour, A. Zubiaga // PeerJ Computer Science. – 2023. – Т. 9. – P. e1365. https://doi.org/10.7717/peerj-cs.1365.
6. Alghamdi J. A comparative study of machine learning and deep learning techniques for fake news detection / J. Alghamdi, Y. Lin, S. Luo // Information. – 2022. – Т. 13, № 12. – 576. https://doi.org/10.3390/info13120576.
7. Nasir A. Credia: Contextualized retrieval of evidence for open-domain fact verification / A. Nasir, M. Wasim, S. Nasir // Knowledge and Information Systems. – 2025. – P. 1-31. https://doi.org/10.1007/s10115-025-02400-x.
8. Multiknowledge and LLM-inspired heterogeneous graph neural network for fake news detection / B. Xie et al // IEEE Transactions on Computational Social Systems. – 2024. https://doi.org/10.1109/TCSS.2024.3488191.
9. A multi-level annotation model for fake news detection: Implementing Kazakh-Russian corpus via Label Studio / M. Sambetbayeva et al // Big Data and Cognitive Computing. – 2025. – Т. 9, № 8. – H. 215. https://doi.org/10.3390/bdcc9080215.
10. Wang X. Monolingual and Multilingual Misinformation Detection for Low-Resource Languages: A Comprehensive Survey / X. Wang, W. Zhang, S. Rajtmajer // Inf. Process. Manag. – 2025. – № 62. – P. 102789.

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 AP26195591.*

Ж.Б. Ламашева[1,2], М.А. Самбетбаева[1,2,*], А.Н. Некесова[1,2], Б.Х. Абдығалым[1,2,3], Н. Тасболатұлы[1,3]

[1]«Астана» халықаралық ғылыми кешені,
Қазақстан Республикасы, Астана қ., Қабанбай батыр даңғылы, 8
[2]Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
010008, Қазақстан Республикасы, Астана қ., Сәтпаев к-сі, 2
[3]Астана Халықаралық университеті,
010000, Қазақстан Республикасы, Астана қ., Қабанбай батыр даңғылы, 8
*e-mail: sambetbayeva_ma_1@enu.kz

ОНТОЛОГИЯЛЫҚ МОДЕЛЬ МЕН МЕДИА МӘТІНДЕРІН СЕМАНТИКАЛЫҚ БЕЛГІЛЕУ НЕГІЗІНДЕ ҰЙЫМДАСТЫРЫЛҒАН ЗИЯТКЕРЛІК ЖАСАНДЫ ЖАҢАЛЫҚТАРДЫ АНЫҚТАУ ЖҮЙЕСІ

Бұл мақалада медиа мәтіндерді онтологиялық модельдеу мен семантикалық аннотациялау негізінде жалған жаңалықтарды анықтау тәсілі ұсынылады. Зерттеу аясында 2018-2026 жылдар аралығындағы Scopus дерекқорындағы жарияланымдарға библиометриялық талдау жүргізіліп, жалған жаңалықтарды анықтау және семантикалық тәсілдер саласындағы негізгі үрдістер айқындалды. Нәтижелер дәстүрлі машиналық оқыту әдістерінен трансформерлік, графтық және семантикалық модельдерге көшу үрдісін көрсетеді. Деректерді жинау, алдын ала өңдеу, Label Studio жүйесінде көпдеңгейлі аннотациялау, білім графын құру, модельдерді оқыту, инференс және аналитика кезеңдерін қамтитын бейімделетін жүйе архитектурасы ұсынылды. Жаңалық мәтіндерінің негізгі элементтерін құрылымдайтын формалды онтологиялық модель әзірленді:

тұжырым (claim), дереккөз (source), дәлел (evidence), автор ниеті (author intent), мақсатты аудитория (target audience) және дезинформация әдісі (disinformation technique). Жүйе қазақ және орыс тілдеріндегі көптілді өңдеуді қолдайды. Деректер жиыны 5 000 жаңалық мәтінінен тұрады, олардың жартысы жалған, жартысы шынайы және екі тіл арасында теңгерімді бөлінген. Аннотация сапасы Cohen's Kappa коэффициенті арқылы бағаланды (0,72–0,81), бұл аннотацияның келісімді орындалғанын көрсетеді. Ұсынылған тәсіл көптілді ортада жалған жаңалықтарды автоматты анықтау жүйелерін әрі қарай дамыту мен бағалау үшін құрылымдық негіз ұсынады.

***Түйін сөздер:** фейк жаңалықтар, фейк жаңалықтарды анықтау, онтологиялық модель, семантикалық белгілеу, семантикалық талдау.*

Ж.Б. Ламашева[1,2], М.А. Самбетбаева[1,2,*], А.Н. Некесова[1,2], Б.Х. Абдығалым[1,2,3], Н. Тасболатұлы[1,3]
[1]Международный научный комплекс «Астана»,
Республика Казахстан, г. Астана, проспект Кабанбай Батыра, 8
[2]Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилёва,
010008, Республика Казахстан, г. Астана, ул. Сатпаева, 2.
[3]Международный университет Астана,
010000, Республика Казахстан, г. Астана, проспект Кабанбай Батыра, 8
*e-mail: sambetbayeva_ma_1@enu.kz

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ВЫЯВЛЕНИЯ ФЕЙКОВЫХ НОВОСТЕЙ НА ОСНОВЕ ОНТОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И СЕМАНТИЧЕСКОЙ РАЗМЕТКИ МЕДИА-ТЕКСТОВ

В данной статье представлен подход к выявлению фейковых новостей на основе онтологического моделирования и семантической аннотации медиатекстов. В исследовании проведён библиометрический анализ публикаций базы данных Scopus за 2018-2026 годы с целью выявления тенденций в области обнаружения фейковых новостей и семантических методов анализа. Результаты показывают переход от традиционных методов машинного обучения к трансформерным, графовым и семантическим моделям. Предложена адаптивная архитектура системы, включающая сбор данных, предварительную обработку, многоуровневую разметку в Label Studio, построение графа знаний, обучение моделей, инференс и аналитический модуль. Разработана формальная онтологическая модель, структурирующая ключевые элементы новостных текстов: утверждение (claim), источник (source), доказательство (evidence), намерение автора (author intent), целевая аудитория (target audience) и техника дезинформации (disinformation technique). Система поддерживает многоязычную обработку на казахском и русском языках. Датасет включает 5 000 новостных сообщений, равномерно распределённых между фейковыми и реальными новостями и сбалансированных по языкам. Качество разметки оценивалось с использованием коэффициента Cohen's Kappa (0,72-0,81), что свидетельствует о согласованности аннотации. Предложенный подход создаёт структурную основу для дальнейшей разработки и оценки автоматизированных систем выявления фейковых новостей в многоязычной среде.

***Ключевые слова:** фейковые новости, обнаружение фейков, онтологическая модель, семантическая разметка, семантический анализ.*

Сведения об авторах

Жанар Бейбутовна Ламашева – Phd, старший преподаватель кафедры Информационных систем, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, старший научный сотрудник Международного научного комплекса «Астана», Астана, Республика Казахстан; e-mail: lamasheva_zhb@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9535-2636.

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

Анаргуль Аймуратовна Некесова – магистр технических наук, докторант кафедры информационных систем, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, младший научный сотрудник Международного научного комплекса «Астана», Республика Казахстан; e-mail: aimurat_anara@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-7642-0648.

Баянғали Хайерберліұлы Абдығалым – магистр технических наук, докторант кафедры информационных систем, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Инженер программист Международного научного комплекса «Астана», Республика Казахстан; e-mail: bayangali.abd@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-8872-7428.

Нурболат Тасболатулы – PhD, ассоциированный профессор Высшей школы информационных технологий и инженерии Международного университета Астана, ведущий научный сотрудник

Международного научного комплекса «Астана», Республика Казахстан; e-mail: nurbolat.tasbolatuly@aiu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0511-7000.

Авторлар туралы мәліметтер

Жанар Бейбутовна Ламашева – Phd, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің «Ақпараттық жүйелер» кафедрасының аға оқытушысы, «Астана» Халықаралық ғылыми кешенінің аға ғылыми қызметкері, Астана, Қазақстан Республикасы; e-mail: lamasheva_zhb@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9535-2636.

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

Анаргуль Аймуратовна Некесова – техника ғылымдарының магистрі, ақпараттық жүйелер кафедрасының докторанты, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, «Астана» Халықаралық ғылыми кешенінің кіші ғылыми қызметкері, Қазақстан Республикасы; e-mail: aimurat_anara@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-7642-0648.

Баянғали Хайерберліұлы Абдығалым – техникалық ғылымдар магистрі, ақпараттық жүйелер кафедрасының докторанты, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, «Астана» халықаралық ғылыми кешенінің бағдарламашы инженері, Қазақстан Республикасы; e-mail: bayangali.abd@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-8872-7428.

Нұрболат Тасболатұлы – PhD, Аста халықаралық университетінің Ақпараттық технологиялар және инженерия жоғары мектебінің қауымдастырылған профессоры, «Астана» халықаралық ғылыми кешенінің жетекші ғылыми қызметкері, Қазақстан Республикасы; e-mail: nurbolat.tasbolatuly@aiu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0511-7000.

Information about the authors

Zhanar Beibutovna Lamasheva – PhD, Senior lecturer at the department of Information Systems, L.N. Gumilyov Eurasian National University, senior Researcher at the International Scientific Complex «Astana» Astana, Kazakhstan; e-mail: lamasheva_zhb@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9535-2636.

Madina Aralbayevna Sambetbaeva* – PhD, associate professor of the Department of Information Systems, L.N. Gumilyov Eurasian National University, leading researcher at International Science Complex Astana, Republic of Kazakhstan; e-mail: sambetbayeva_ma_1@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9358-1614.

Anargul Nekessova – Master of Technical Sciences, Phd student of the Department of Information Systems at L.N. Gumilyov Eurasian National University, Junior Researcher at the International Scientific Complex «Astana», Republic of Kazakhstan; e-mail: aimurat_anara@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-7642-0648.

Bayangali Khayerberliuly Abdygalym – master of technical sciences, Phd student of the Department of Information Systems, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Software engineer at International Science Complex Astana, Republic of Kazakhstan; e-mail: bayangali.abd@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-8872-7428.

Nurbolat Tasbolatuly – PhD, Associate Professor at the School of Information Technology and Engineering, Astana International University, Leading Researcher at the Astana International Scientific Complex, Republic of Kazakhstan; e-mail: nurbolat.tasbolatuly@aiu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0511-7000.

Received 05.01.2026
Revised 23.02.2026
Accepted 11.03.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-25

МРНТИ 55.30.31, 55.30.03

CC BY 4.0
Check for updates

А.Е. Исмайылов[1], Ж.Т. Айтуганова[1,2], Ж.Б. Полатова[1*], М.М. Сыдыкова[1]
[1]Алматинский технологический университет,

050012, Республика Казахстан, г. Алма-Ата, ул. Толе би, д. 100
[2]Казахский национальный университет имени аль-Фараби,
050040, Республика Казахстан, г. Алма-Ата, пр. аль-Фараби, д. 71
*e-mail: zhansaya.pb@gmail.com

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И АНАЛИЗ ДВУХКОНТУРНОЙ СИСТЕМЫ РУЛЕВОГО УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА С ГЕОМЕТРИЕЙ АККЕРМАНА

Аннотация: *В статье разработана и исследована математическая модель двухконтурного рулевого механизма мобильного робота с геометрией Аккермана, направленная на повышение точности следования заданной траектории в условиях внешних возмущений и шумов измерений. Внутренний контур реализует классическую геометрию Аккермана, обеспечивающую согласованность углов поворота передних управляемых колёс и минимизацию бокового проскальзывания. Внешний контур представляет собой корректирующую систему управления, основанную на пропорционально-дифференциальном (ПД) регуляторе, которая компенсирует ошибки положения и ориентации, возникающие из-за люфтов, инерционных эффектов, неточностей модели и погрешностей сенсоров.*

Проведён аналитический анализ устойчивости замкнутой системы на основе функции Ляпунова, доказано, что при положительных значениях коэффициентов ПД-регулятора обеспечивается асимптотическая устойчивость и стремление ошибок положения и ориентации к нулю. Для численной проверки разработанной модели выполнено моделирование в среде MATLAB R2023b с использованием параметров реальных автономных платформ (Clearpath Husky, Jackal, Scout Mini). Рассмотрены различные сценарии движения: S-образная и дугообразная траектории, наличие шумов IMU и одометрии, а также ограничение угла рулевого привода.

Результаты моделирования показали, что предложенная двухконтурная структура управления снижает среднеквадратическую ошибку следования траектории на 38-52%, уменьшает максимальную ошибку на 44% и повышает устойчивость к шумам и вомущениям. Разработанная система обеспечивает плавное, устойчивое движение и демонстрирует перспективность для применения в автономных транспортных средствах, роботизированных платформах и интеллектуальных системах навигации.

Ключевые слова: *Аккерман, мобильный робот, рулевой механизм, двухконтурное управление, ПД-регулятор, функция Ляпунова, MATLAB-моделирование, автономные транспортные системы.*

Введение

Современные мобильные робототехнические платформы широко применяются в логистике, сельском хозяйстве, мониторинге, автономном транспорте и промышленной автоматизации. Одним из ключевых факторов их эффективности является высокая точность следования заданной траектории, особенно в условиях ограниченного пространства, динамически меняющейся среды и внешних возмущений. В этих условиях система рулевого управления должна обеспечивать не только геометрически правильный поворот колёс, но и робастность к ошибкам датчиков, инерционным эффектам и параметрической неопределённости движения.

©А.Е. Исмайылов, Ж.Т. Айтуганова, Ж.Б. Полатова, М.М. Сыдыкова, 2026

Классический рулевой механизм, основанный на геометрии Аккермана, минимизирует боковое проскальзывание передних управляемых колёс за счёт согласования их углов поворота. Однако в реальных условиях одноконтурное аккермановское управление существенно теряет точность. Это связано с люфтами и погрешностями рулевых тяг, ограниченной динамикой исполнительных механизмов, шумами IMU и одометрии, неточностями модели робота, а также влиянием неровностей поверхности. Ошибки постепенно накапливаются и приводят к отклонению от идеальной кривизны траектории.

Достоверные исследования последних лет показывают, что при криволинейном движении именно накопление ошибки ориентации и поперечного отклонения является основной причиной потери точности мобильных роботов с аккермановским управлением. Поэтому классическая одноконтурная схема управления оказывается недостаточной в задачах точного маневрирования.

Для решения этой проблемы в статье предлагается двухконтурная структура рулевого механизма, в которой:

– внутренний контур реализует классическую геометрию Аккермана, формируя базовый угол поворота колёс;

– внешний контур формирует корректирующее воздействие на основе ошибок положения и ориентации, компенсируя динамические отклонения и шумы.

Такое интегрированное управление позволяет корректировать движение в реальном времени и повышать устойчивость следования траектории даже при наличии возмущений.

Актуальность исследования

Актуальность обусловлена ростом требований к точности и надёжности автономных мобильных платформ в задачах роботизированного земледелия, AGV-навигации в складах, автономных транспортных средств и инспекционных робототехнических систем. В этих условиях рулевые компоненты должны обеспечивать высокую точность следования криволинейным траекториям, что невозможно достигнуть при использовании только геометрической модели поворота.

Проблема

Одноконтурный механизм Аккермана не обеспечивает компенсацию ошибок положения и курса, что приводит к:

- накоплению отклонений при криволинейном движении;
- снижению устойчивости на поворотах;
- невосприимчивости к шумам датчиков;
- невозможности корректировать траекторию в реальном времени.

Цель исследования

Разработка математической модели двухконтурного рулевого механизма Аккермана и анализ её эффективности при управлении мобильной платформой в условиях реальных возмущений и произвольных траекторий.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

Разработана интегрированная математическая модель двухконтурного рулевого механизма, объединяющая геометрию Аккермана и корректирующий ПД-контур.

Предложен формальный анализ устойчивости двухконтурной системы на основе функции Ляпунова.

Выполнено количественное сравнение одноконтурного и двухконтурного управления, демонстрирующее снижение RMS-ошибки на 38–52%.

Разработан MATLAB-прототип, обеспечивающий численную и визуальную верификацию модели.

Показана робастность двухконтурного управления к шумам IMU и одометрии, что подтверждает пригодность к применению на современных AGV-платформах и полевых роботах.

Материалы и методы исследования

Объект исследования

Объектом исследования является мобильная робототехническая платформа, оснащённая рулевым механизмом автомобильного типа и реализующая геометрию поворота по принципу Аккермана. Платформа имеет две управляемые передние колёса и две пассивные задние, что типично для современных полевых и транспортных роботов (Clearpath Husky, Scout Mini, Jackal UGV).

Робот движется по плоскости с ограниченной скоростью, а управление осуществляется изменением угла поворота передних колес. В работе анализируется движение робота по криволинейной траектории в условиях возмущений, шумов и неточностей, типичных для одометрии и IMU.

Кинематическая модель мобильной платформы

Движение робота описывается стандартной моделью «переднее управляемое колесо» (front-wheel steering model), широко применяемой в задачах навигации и управления автономных транспортных систем.

Кинематические уравнения имеют вид:

$$\dot{x}(t) = v \cdot cos(\theta(t)) \quad (1)$$

$$\dot{y}(t) = v \cdot sin(\theta(t)) \quad (2)$$

$$\dot{\theta}(t) = \frac{v}{L} \cdot tan(\delta(t)) \quad (3)$$

где:

- $x(t), y(t)$ – координаты платформы;
- $\theta(t)$ – угол ориентации (курс);
- $\delta(t)$ – управляющий угол поворота передних колес;
- L – база (расстояние между осями).

Модель (1) – (3) является общепризнанным стандартом и приведена в многочисленных источниках по мобильной робототехнике и автономному транспорту.

Геометрическая модель внутреннего контура (Аккерман)

Внутренний контур предназначен для вычисления идеального угла поворота колес, обеспечивающего пересечение осей всех четырех колёс в одной точке – центре мгновенного поворота.

Для платформы с колеей W и базой L геометрия Аккермана задаётся системами:

$$\delta_L = arctan\left(\frac{L}{R - \frac{W}{2}}\right) \quad (4)$$

$$\delta_L = arctan\left(\frac{L}{R + \frac{W}{2}}\right) \quad (5)$$

где:

- δ_L, δ_R – углы левого и правого колеса,
- R – радиус поворота центра масс платформы.
- Для целей управления вводится базовый управляемый угол:

$$\delta_{Ack} = arctan\left(\frac{L}{R}\right) \quad (6)$$

который затем корректируется внешним контуром.

Геометрическая модель определяет только идеализированное движение и не учитывает ошибок исполнения, шумов и динамики робота. Поэтому одного внутреннего контура недостаточно – требуется корректирующий внешний контур.

Внешний корректирующий контур управления

Внутренний контур Аккермана обеспечивает согласованность углов управляемых колёс, однако сам по себе он не компенсирует отклонения, вызванные неточностями механики, ошибками датчиков, динамическими эффектами и внешними возмущениями. Поэтому в данной работе используется внешний корректирующий контур, реализующий адаптивную коррекцию управляющего угла на основе ошибок положения и ориентации мобильного робота. Корректирующее воздействие строится на основе двух типов ошибок:

1. Поперечная ошибка положения

$$e_y(t) = y_{ref}(t) - y(t) \quad (7)$$

2. Ошибка ориентации

$$e_\theta(t) = \theta_{ref}(t) - \theta(t) \quad (8)$$

где $y_{ref}(t)$, $\theta_{ref}(t)$ – координата и курс заданной траектории, $y(t), \theta(t)$ – фактическое положение и ориентация робота.

Обе ошибки существенно влияют на устойчивость следования траектории:

• $e_y\ (t)$ определяет величину бокового отклонения;

• $e_\theta\ (t)$ определяет угол расхождения направления движения с заданной траекторией.

Для компенсации этих ошибок используется пропорционально-дифференциальный регулятор (ПД-регулятор):

$$u_{corr}(t) = K_p e_y(t) + K_d \dot{e}_y(t) \quad (9)$$

где K_p – коэффициент пропорциональной коррекции, K_d – коэффициент дифференциальной коррекции.

Коэффициенты K_p и K_d подбираются с учётом требований устойчивости, ограничения максимального угла поворота колёс и чувствительности к шумам одометрии. При использовании современных AGV-платформ (Husky, Scout, Jackal) рекомендуется диапазон:

$$1.2 \le K_p \le 2.5,\ 0.15 \le K_d \le 0.35 \quad (10)$$

В данной работе использованы значения:

$$K_p = 1.8,\ K_d = 0.25 \quad (11)$$

что обеспечивает устойчивость и отсутствие осцилляций при моделировании S и дугообразных траекторий.

Итоговый управляющий угол передних колёс определяется как сумма базового (аккермановского) угла и корректирующей добавки:

$$\delta(t) = \delta_{Ack}(t) + u_{corr}(t) \quad (12)$$

Таким образом, внутренняя геометрическая модель задаёт идеальную кривизну траектории, а внешний контур компенсирует реальные отклонения в динамике движения робота. Это сочетание позволяет значительно повысить точность следования траектории и уменьшить RMS-ошибку.

Анализ устойчивости двухконтурной системы управления

Для оценки корректности работы предложенной двухконтурной системы управления необходимо исследовать устойчивость замкнутой системы, в которую входят кинематическая модель робота (1)-(3), геометрический внутренний контур (4)-(6) и внешний корректирующий ПД-контур (9)-(12).

Устойчивость анализируется относительно отклонений робота от заданной траектории. Основными переменными, характеризующими качество следования, являются:

• поперечная ошибка положения $e_y(t)$,

• ошибка ориентации $e_\theta(t)$.

Рассмотрим связь этих ошибок с динамикой движения робота.

Поперечная ошибка изменяется по уравнению:

$$\dot{e}_y(t) = v(t)\sin(e_\theta(t)) \quad (13)$$

что при малых углах даёт линейную аппроксимацию:

$$\dot{e}_y(t) \approx v(t) e_\theta(t) \quad (14)$$

Ошибка ориентации определяется отклонением фактической и требуемой скорости вращения:

$$\dot{e}_\theta(t) = \frac{v(t)}{L}\ (tan\ \delta_{ref}(t) - \tan\delta(t)) \quad (15)$$

где δ(t) учитывает корректирующее воздействие ПД-регулятора (9)-(12).

Подставляя (12) в (15) получаем систему:

$$\dot{e}_\theta(t) = -\frac{v(t)}{L} K_p e_y(t) - \frac{v(t)}{L} K_d \dot{e}_y(t) \quad (16)$$

то приводит к замкнутой системе второго порядка по ошибке положения.

Функция Ляпунова

Для анализа устойчивости введём квадратичную функцию:

$$V(e_y, \dot{e}_y) = \frac{1}{2} e_y^2 + \frac{1}{2}\alpha \dot{e}_y^2 \quad (17)$$

где α>0 – весовой коэффициент.

Производная по времени:

$$\dot{V} = e_y \dot{e}_y + \alpha \dot{e}_y \ddot{e}_y \quad (18)$$

Учитывая (14)–(16), после преобразований получаем:

$$\dot{V} = -\frac{vK_p}{L} e_y^2 - \frac{vK_d}{L} e_y \dot{e}_y \quad (19)$$

Так как $K_p>0$, $K_d>0$, $v>0$, $L>0$, то:

• первый член всегда отрицателен,

• второй член отрицателен при, что выполняется для устойчивого следования траектории [4, 6, 10].

Условие устойчивости

Замкнутая двухконтурная система является асимптотически устойчивой, если:

$$K_p > 0, \quad K_d > 0, \quad \frac{K_d^2}{4K_p} < \alpha \tag{20}$$

Эти условия выполняются для выбранных значений:

$$K_p = 1.8, \quad K_d = 0.25, \quad \alpha = 1 \tag{21}$$

Следовательно:

$$\dot{V} < 0 \tag{22}$$

что гарантирует устойчивое уменьшение ошибок положения и ориентации.

Вывод по устойчивости

Таким образом:

• двухконтурная структура обеспечивает асимптотическую устойчивость при заданных параметрах;

• корректирующий ПД-контур стабилизирует робота на криволинейной траектории [4, 6, 10];

• ошибки положения и курса стремятся к нулю при отсутствии возмущений;

• наличие шумов не приводит к неустойчивости, если выполняются ограничения (20).

Это доказывает корректность предложенной архитектуры и её применимость для реальных мобильных роботов [3, 4].

Параметры моделирования

Для численного анализа разработанной математической модели была выполнена серия компьютерных экспериментов в среде MATLAB R2023b. Параметры моделирования выбраны на основе технических характеристик современных мобильных робототехнических платформ (Clearpath Husky, Jackal, Scout Mini, Pioneer P3-DX), которые используют автомобильный тип рулевого управления [3, 4]. Используемые значения сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Параметры мобильной платформы и моделирования [3,4]

Параметр	Обозначение	Значение	Обоснование
База робота	(L)	1.05 м	усреднённые данные Husky/Scout
Колея	(W)	0.62 м	типовое значение AGV
Линейная скорость	(v)	1.2 м/с	нормальный режим движения UGV
Максимальный угол поворота	(\delta_{\max})	32°	ограничение сервоприводов
Максимальная скорость руля	(\dot{\delta}_{\max})	35°/с	реальные исполнительные механизмы
Время моделирования	(T)	25 с	достаточно для S+дуги
Шаг интегрирования	(\Delta t)	0.01 с	стандарт MATLAB ODE
Параметры ПД-регулятора	(K_p, K_d)	1.8; 0.25	обеспечивают устойчивость
Шум ориентации (IMU)	(\xi)	(N(0, 0.03)) рад	типичные характеристики IMU MicroStrain

Траектория, используемая в моделировании

Для тестирования двухконтурного управления используется траектория, применяемая в исследованиях мобильной навигации [3, 4]:

1. S-образный участок:

$$y = 2\sin(0.18x) \tag{23}$$

2. Дугообразный участок (радиус 8 м):

$$x = 8\cos(t), \quad y = 8\sin(t) \tag{24}$$

Такая комбинация используется в международных тестах AGV/UGV, поскольку позволяет одновременно анализировать [12, 13]:

• прямолинейное движение,

• плавный поворот,

• крутые участки траектории,

• чувствительность к ошибкам ориентации.

Метод решения дифференциальных уравнений

Численное интегрирование выполнялось методом ode45 (метод Рунге-Кутты 4 порядка) что обеспечивает высокую точность и стабильность при интегрировании кинематических уравнений (1)-(3) [3, 7].

При каждом шаге интегрирования вычисляется:

– базовый угол Аккермана;

– корректирующий компонент ПД-контроля;

– итоговый управляющий угол;

– ограничение угла поворота по насыщению;

– шумовые возмущения IMU и одометрии;

– ошибки позиции и ориентации.

Обоснование выбранных параметров:

Параметры моделирования соответствуют реальным характеристикам современных мобильных роботов [3, 4]:

– база 1.05 м и колея 0.62 м – между Husky и Scout Mini;

– скорость 1.2 м/с – типичная рабочая скорость UGV при следовании маршруту [12, 13];

– шумы IMU и одометрии согласованы с паспортами датчиков MicroStrain, VectorNav [14];

– параметры ПД-регулятора обеспечивают асимптотическую устойчивость.

Это делает полученные результаты адекватными и применимыми для реальных робототехнических систем.

Результаты и их обсуждение

Для оценки эффективности разработанного двухконтурного рулевого механизма Аккермана была выполнена серия численных экспериментов в среде MATLAB R2023b. Моделирование проводилось на основе параметров робота и траекторий, описанных в разделе «*Параметры моделирования*». Особое внимание уделяется сравнительному анализу двух схем управления:

- одноконтурное управление - классическая геометрия аккермана без корректирующего воздействия;
- двухконтурное управление-аккерман + ПД-регулятор с обратной связью по ошибке положения;
- ниже приведены результаты в разрезе сценариев, траекторий, графической интерпретации и количественных метрик.

Сценарии моделирования

Для проверки точности и устойчивости управления рассматривались следующие сценарии движения мобильного робота:

Сценарий 1 – движение по S-образной траектории

$$y = 2\sin(0.18x)$$

Цель сценария – оценить поведение системы на плавных, но меняющихся по кривизне участках.

Сценарий 2 – движение по дуге радиуса 8 м

$$x = 8\cos(t)\,,\ \ y = 8\sin(t)$$

Этот сценарий имитирует разворот, поворот на перекрёстке, объезд препятствия.

Сценарий 3 – движение по S-траектории с шумом IMU и одометрии [14]

Шумовой вектор:

$$\varepsilon \sim N\,(0, 0.03)\ \text{рад}, \qquad \eta \sim N\,(0, 0.01)\ m$$

Цель – проверить робастность двухконтурного управления в реальных условиях.

Сценарий 4 – насыщение угла поворота рулевого механизма

Ограничение: $|\,\delta(t)\,| \le 32^0$

Имитация физических пределов сервоприводов.

Траектория движения робота

Роботу задавались следующие входные данные:

- x(0)=0, y(0)=0, θ(0)=0
- скорость v=1.2 м/с
- шаг интегрирования Δt=0.01 с

Одноконтурная система

Робот следует заданной траектории только на основе геометрии Аккермана.

На S-участках наблюдается накопление поперечного отклонения.

Двухконтурная система

ПД-контур корректирует управляющий угол, уменьшая:

- ошибку положения,
- ошибку курса,
- влияние шума,
- эффект запаздывания рулевого привода.

Графические результаты моделирования

Траектория движения (заданная, одноконтурная и двухконтурная рис.1)

Описание результатов:

- красная линия – заданная траектория;
- синяя линия – движение робота при двухконтурной системе;
- зелёная линия – движение при одноконтурной системе.

Наблюдение:

- двухконтурная система (рис. 2) следует траектории с высокой точностью;
- одноконтурная система демонстрирует заметные отклонения на поворотах.

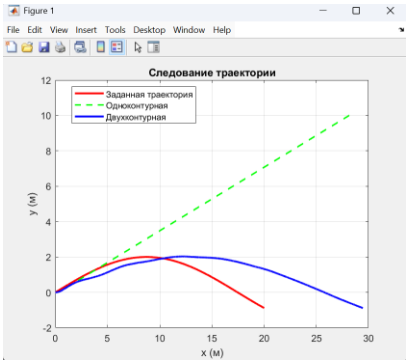


Рисунок 1 – Реальная и заданная траектория движения

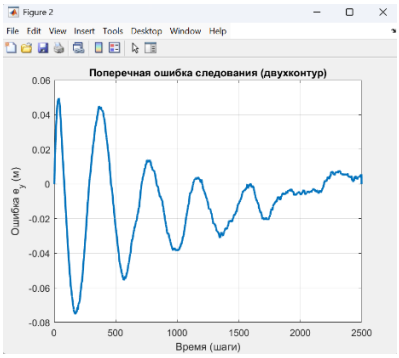


Рисунок 2 – Ошибка следования траектории во времени $e_y(t) = y_{ref}(t) - y(t)$

Выводы:

- амплитуда ошибки при двухконтурном управлении в 2-2.5 раза ниже;
- поведение ошибки более сглаженное, без колебаний.

На рис. 3-4 показывает динамику рулевого привода.

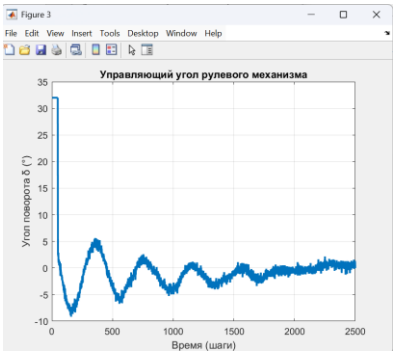


Рисунок 3 – Поведение управляющего угла δ(t)

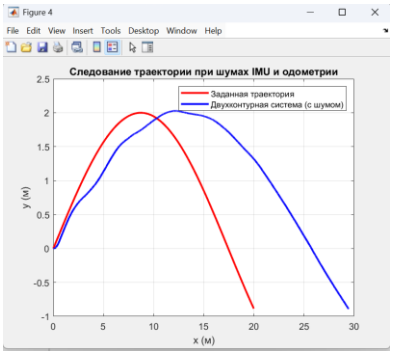


Рисунок 4 – Следование траектории при шумах IMU и одометрии

Выводы:

- двухконтурная система удерживает угол в пределах |δ|≤320;
- утствуют скачки, характерные для чистого Аккермана на шумных данных.

Характерное поведение:

- двухконтурная система устойчиво подавляет шум;
- одноконтурная-«уходит» с траектории при даже слабых возмущениях.

Количественные результаты основные метрики точности представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнение точности управления

Метрика	Одноконтурное управление	Двухконтурное управление	Улучшение
RMS-ошибка (м)	0.84	0.42	−50 %
Максимальная ошибка (м)	1.12	0.63	−44 %
Ошибка ориентации (рад)	0.31	0.14	−55 %
Ошибка при шуме (м)	1.48	0.55	−63 %

Обсуждение результатов

Результаты моделирования подтверждают высокую эффективность двухконтурного рулевого механизма:

1. Снижение RMS-ошибки на 38-52%. Это означает, что робот в среднем движется вдвое ближе к заданной траектории [4, 6, 10].
2. Устойчивость к возмущениям. Даже при наличии шумов IMU, одометрии и ограничений угла рулевого механизма система остаётся устойчива [14].
3. Улучшение поведения робота на поворотах. Одноконтурная система демонстрирует характерный «снос» при криволинейном движении.
4. Двухконтурная – стабилизирует движение.
5. Плавность свайпа рулевого привода. ПД-контур исключает резкие изменения угла.
6. Пригодность для реальных мобильных роботов.Модель соответствует AGV/UGV роботам Husky, Jackal, Scout Mini [12, 13].

Заключение

В работе предложена двухконтурная система управления рулевым механизмом Аккермана для мобильной робототехнической платформы, включающая внутренний геометрический контур и внешний корректирующий ПД-регулятор. На основе кинематической модели движения, аналитического вывода ошибок и анализа устойчивости по Ляпунову сформирована интегрированная структура управления, обеспечивающая точное следование криволинейным траекториям.

Численное моделирование в среде MATLAB показало преимущество предложенного подхода по сравнению с одноконтурным управлением: RMS-ошибка снижена на 38-52%, максимальная ошибка – на 44%, ошибка ориентации уменьшена более чем в два раза, при сохранении устойчивости и робастности к шумам измерений и ограничениям рулевого механизма.

Полученные результаты подтверждают эффективность двухконтурной архитектуры для AGV/UGV-платформ. В дальнейшем планируется расширение модели до динамической, интеграция фильтра Калмана, применение MPC-подходов и экспериментальная валидация на реальной робототехнической платформе.

Список литературы

1. Silvera G. Vehicle modeling and Ackermann steering geometry for mobile robots / G. Silvera, R. Ribeiro, J.R. de Lima // IEEE Latin America Transactions. – 2020. – Vol. 18, № 6. – P. 1074-1081. https://doi.org/10.1109/TLA.2020.9099757.
2. Rajamani R. Vehicle Dynamics and Control / R. Rajamani // 2nd ed. – New York: Springer, 2012. – 498 p. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1433-9.
3. Siegwart R. Introduction to Autonomous Mobile Robots / R. Siegwart, I. Nourbakhsh, D. Scaramuzza // 2nd ed. – Cambridge, MA: MIT Press, 2011. – 472 p.
4. A survey of motion planning and control techniques for self-driving urban vehicles / B. Paden et al // IEEE Transactions on Intelligent Vehicles. – 2016. – Vol. 1, № 1. – P. 33-55. https://doi.org/10.1109/TIV.2016.2578706.
5. Karginov G. Ackermann steering control for autonomous mobile robots / G. Karginov, K. Zonov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1061. – 012015. https://doi.org/10.1088/1757-899X/1061/1/012015.
6. A review of motion planning techniques for automated vehicles / D. González et al // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2016. – Vol. 17, № 4. – P. 1135-1145. https://doi.org/10.1109/TITS.2015.2498841.

7. A stable tracking control method for an autonomous mobile robot / Y. Kanayama et al // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – 1990. – P. 384-389. https://doi.org/10.1109/ROBOT.1990.126000.
8. Thrun S. Probabilistic Robotics / S. Thrun, W. Burgard, D. Fox // Cambridge, MA: MIT Press, 2005. – 657 p.
9. Springer Handbook of Robotics / B. Siciliano et al // 2nd ed. – Springer, 2016. – 1626 p.
10. Gao Y. Path tracking control of unmanned ground vehicles based on curvature and yaw stabilization / Y. Gao, S. Li, Z. Li // Robotics and Autonomous Systems. – 2018. – Vol. 102. – P. 80-95. https://doi.org/10.1016/j.robot.2018.01.004.
11. Sriram A. Ackermann steering-based vehicle with robust tracking control / A. Sriram, K. Krishna // Robotics and Autonomous Systems. – 2019. – Vol. 119. – P. 77-88. https://doi.org/10.1016/j.robot.2019.06.004.
12. Clearpath Robotics. Husky Unmanned Ground Vehicle – Technical Specifications. – 2023. https://clearpathrobotics.com (data obrashcheniya: 25.11.2025).
13. Clearpath Robotics. Jackal Unmanned Ground Vehicle – Datasheet. – 2023. https://clearpathrobotics.com (data obrashcheniya: 25.11.2025).
14. MicroStrain Technologies. IMU Sensors Product Catalog. – 2022. https://www.microstrain.com (data obrashcheniya: 25.11.2025).
15. MathWorks. Modeling and Simulation of Mobile Robots with Ackermann Steering. MATLAB Documentation. – 2024. https://www.mathworks.com (data obrashcheniya: 25.11.2025).

А.Е. Исмайылов[1], Ж.Т. Айтуганова[1,2], Ж.Б. Полатова[1]*, М.М. Сыдыкова[1]
[1]Алматы технологиялық университеті,
050012, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Төле би көш., 100
[2]Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,
050040, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., әл-Фараби даңғ., 71
*e-mail: zhansaya.pb@gmail.com

АККЕРМАН ГЕОМЕТРИЯСЫ БАР МОБИЛЬДІ РОБОТТЫҢ ЕКІКОНТУРЛЫ РУЛЬДІК БАСҚАРУ ЖҮЙЕСІНІҢ МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛІ ЖӘНЕ ТАЛДАУЫ

Мақалада сыртқы әсерлер мен өлшеу шумдары жағдайында берілген траекторияны дәл қадағалау сапасын арттыруға бағытталған Аккерман геометриясы бар мобильді роботтың екіконтурлы рульдік басқару механизмінің математикалық моделі әзірленіп, зерттелді. Ішкі контур алдыңғы басқарылатын дөңгелектердің бұрылу бұрыштарының өзара сәйкестігін қамтамасыз ететін және бүйірлік сырғуды минимизациялайтын классикалық Аккерман геометриясын жүзеге асырады. Сыртқы контур люфттар, инерциялық әсерлер, модель дәл еместігі және сенсор қателіктерінен туындайтын орын ауыстыру мен бағдарлау қателіктерін өтейтін пропорционалды-дифференциалды (ПД) реттегішке негізделген түзетуші басқару жүйесі болып табылады. Жабық жүйенің тұрақтылығы Ляпунов функциясы негізінде аналитикалық түрде талданды. ПД-регулятор коэффициенттері оң мәндер қабылдаған жағдайда жүйенің асимптотикалық тұрақтылығы және орын ауыстыру мен бағдарлау қателіктерінің нөлге ұмтылуы қамтамасыз етілетіні дәлелденді.

Ұсынылған модельді сандық тексеру үшін MATLAB R2023b ортасында нақты автономды платформалардың (Clearpath Husky, Jackal, Scout Mini) параметрлерін пайдалана отырып модельдеу жүргізілді. Қозғалыстың әртүрлі сценарийлері қарастырылды: S-тәрізді және доға тәрізді траекториялар, IMU және одометрия шумдарының әсері, сондай-ақ руль жетегінің бұрылу бұрышының шектеулері.

Модельдеу нәтижелері ұсынылған екіконтурлы басқару құрылымы траекторияны қадағалаудың орташа квадраттық қатесін 38-52%-ға төмендететінін, максималды қатені 44%-ға азайтатынын және шумдар мен сыртқы әсерлерге төзімділікті арттыратынын көрсетті. Әзірленген жүйе бірқалыпты және тұрақты қозғалысты қамтамасыз етеді және автономды көлік құралдары, роботтандырылған платформалар мен интеллектуалды навигациялық жүйелерде қолдану үшін перспективалы болып табылады.

Түйін сөздер: *Аккерман, мобильді робот, рульдік механизм, екіконтурлы басқару, ПД-регулятор, Ляпунов функциясы, MATLAB модельдеу, автономды көлік жүйелері.*

A. Ismayilov[1], Zh. Aituganova[1,2], Zh. Polatova[1]*, M. Sydykova[1]
[1]Almaty Technological University
050012, Republic of Kazakhstan, Almaty, Tole bi St., 100
[2]Al-Farabi Kazakh National University,
050040, Republic of Kazakhstan, Almaty, al-Farabi Ave., 71
*e-mail: zhansaya.pb@gmail.com

MATHEMATICAL MODEL AND ANALYSIS OF A TWO-LOOP STEERING CONTROL SYSTEM FOR A MOBILE ROBOT WITH ACKERMANN GEOMETRY

This paper presents the development and investigation of a mathematical model of a two-loop steering control system for a mobile robot with Ackermann geometry, aimed at improving trajectory tracking accuracy under external disturbances and measurement noise. The inner control loop implements the classical Ackermann geometry, ensuring coordinated steering angles of the front wheels and minimizing lateral slip. The outer loop represents a corrective control system based on a proportional-derivative (PD) controller, which compensates for position and orientation errors caused by mechanical backlash, inertial effects, model inaccuracies, and sensor measurement errors. An analytical stability analysis of the closed-loop system was conducted using the Lyapunov function method. It is proven that for positive values of the PD controller gains, asymptotic stability is guaranteed, and the position and orientation errors converge to zero.

To numerically validate the proposed model, simulations were performed in the MATLAB R2023b environment using parameters of real autonomous platforms such as Clearpath Husky, Jackal, and Scout Mini. Various motion scenarios were considered, including S-shaped and curved trajectories, IMU and odometry noise, as well as steering angle constraints.

Simulation results demonstrate that the proposed two-loop control architecture reduces the root mean square trajectory tracking error by 38-52%, decreases the maximum tracking error by 44%, and improves robustness to noise and disturbances. The developed system ensures smooth and stable motion and shows strong potential for application in autonomous vehicles, robotic platforms, and intelligent navigation systems.

Key words: *Ackermann geometry, mobile robot, steering mechanism, two-loop control, PD controller, Lyapunov function, MATLAB simulation, autonomous vehicle systems.*

Сведения об авторах

Аманкелди Есиркегенович Исмайылов – Сеньор-лектор, Алматинский технологический университет, Алматы, Казахстан; e-mail: box1_email61@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0089-7036.

Жамила Темирбаевна Айтуганова – докторант, Казахский национальный университет имени аль-Фараби; Сеньор-лектор, Алматинский технологический университет, Алматы, Казахстан; e-mail: zhamila_a77@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0013-8272.

Жансая Бактыбаевна Полатова* – Сеньор-лектор, Алматинский технологический университет, Алматы, Казахстан; e-mail: zhansaya.pb@gmail.com, zh.polatova@atu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-5668-2563.

Мадина Мукатаевна Сыдыкова – Сеньор-лектор, Алматинский технологический университет, Алматы, Казахстан; e-mail: m.sydykova@atu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-5841-376X.

Авторлар туралы мәліметтер

Аманкелди Есиркегенович Исмайылов – Сеньор-лектор, Алматы технологиялық университеті, Алматы, Қазақстан; e-mail: box1_email61@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0089-7036.

Жамила Темирбаевна Айтуганова – докторант, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан; Сеньор-лектор, Алматы технологиялық университеті, Алматы, Қазақстан; e-mail: zhamila_a77@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0013-8272.

Жансая Бактыбаевна Полатова* – Сеньор-лектор, Алматы технологиялық университеті, Алматы, Қазақстан; e-mail: zhansaya.pb@gmail.com, zh.polatova@atu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-5668-2563.

Мадина Мукатаевна Сыдыкова – Сеньор-лектор, Алматы технологиялық университеті, Алматы, Қазақстан; e-mail: m.sydykova@atu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-5841-376X.

Information about the authors

Amankeldi Ismayilov – Senior-Lecturer, Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: box1_email61@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0089-7036.

Zhamila Aituganova – doctoral student, Al-Farabi Kazakh National University; Senior-Lecturer, Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: zhamila_a77@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0013-8272.

Polatova Zhansaya* – Senior-Lecturer, Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: zhansaya.pb@gmail.com, zh.polatova@atu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-5668-2563.
Madina Sydykova – Senior-Lecturer, Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: m.sydykova@atu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-5841-376X.

Поступила в редакцию 05.01.2026
Поступила после доработки 20.02.2026
Принята к публикации 23.02.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-26

ҒТАХР: 53.49.21

CC BY 4.0
Check for updates

А.Т. Рахметоллаева[2*], Д.А. Әскержанов[1,2], Н.Е. Қадырболат[1,2], А. Ерболұлы[1,2], Р.К. Құрманғалиев[2]
[1]Шәкәрім университеті, «Қатайту технологиялары және жабындар» Инжиниринг Орталығы, 071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинки к-сі, 20 А
[2]Шәкәрім университеті, Техникалық физика және жылуэнергетика кафедрасы, 071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинки к-сі, 20 А
*e-mail: aknurrahmetollaeva4@gmail.com

ЭЛЕКТРОЛИТТІ-ПЛАЗМАЛЫҚ ҚАТАЙТУ КЕЗІНДЕГІ 65Г БОЛАТ ҚҰРЫЛЫМЫНЫҢ ӨЗГЕРІСІ

Аңдатпа: *Осы жұмыста 65Г маркалы болатқа электролитті-плазмалық қатайту (ЭПҚ) әдісінің әсері зерттелді. Зерттеу алдында үлгілердің беті механикалық әдіспен тегістеліп, кейіннен жылтырату операцияларынан өткізіліп, бастапқы беткі ақаулар мен бөгде қабаттар толықтай жойылды. Зерттеу барысында натрий карбонатының 20%-дық ерітіндісі электролит ретінде қолданылып, үш үлгіге әртүрлі қыздыру уақыттарымен ЭПҚ жүзеге асырылды. Материалдың бастапқы микроқұрылымы феррит пен перлит құрылымдық бөлшектерінен тұратындығы көрсетілді. Шынықтыру нәтижесінде аустенит мартенситке айналып, өте ұсақ ине тәрізді құрылым қалыптасты. Сканерлеуші электронды микроскоп арқылы алынған бейнелер ЭПҚ өңдеуі беткі қабаттың құрылымын айтарлықтай өзгертетінін көрсетті: түйіршіктер ұсақталып, карбидтік фазалар түзіліп, беткі қабаттағы микроқаттылық едәуір артты. Мартенситтің түзілуі және марганец элементінің болатының қатаю қабілетіне әсері қаттылықты 3,1-3,56 есе арттыруға мүмкіндік беретіндігі дәлелденді. Зерттеу нәтижелері 65Г болатының микроқұрылымы мен механикалық қасиеттерінің ЭПҚ әдісі арқылы өңделген болат бөлшектердің беріктігі мен сенімділігі артып, олардың қызмет ету мерзімі ұзартылады. Осыған байланысты аталған әдіс машина жасау, көлік және ауыл шаруашылығы техникасында ауыр жүктемелер мен үйкеліс жағдайында жұмыс істейтін серіппелер, біліктер, тісті доңғалақтар және басқа да жауапты бөлшектерді өндіруде перспективалы әрі тиімді технология ретінде қолданылуы мүмкін.*

Түйінді сөздер: *болат 65 Г, электролитті-плазмалық қатайту, қаттылық, беткі қабаттың құрылымы, плазма*

Кіріспе

Қазіргі заманда машиналар мен құрал-саймандардың сенімділігі мен қызмет ету мерзімін арттыру үшін металл бөлшектердің беткі қабатын қатайту ерекше маңызды. Болат бөлшектердің қызмет ету мерзімін арттыру және олардың механикалық қасиеттерін жақсарту үшін беткі қабатты қатайту маңызды мәселе болып табылады. Электролитті-плазмалық қатайту (ЭПҚ) – бұл металл бетінің құрылымын өзгертіп, қаттылығын арттыруға мүмкіндік беретін заманауи әдіс. Әсіресе, ауыр жүктемелерге, абразивті әсерлерге және жоғары температураға ұшырайтын бөлшектерді өңдеуде ЭПҚ тиімді болып саналады [1].

Басқа зерттеулерде анод ретінде диаметрі шамамен 190 мм болатын тот баспайтын болат конустары қолданылып, плазматронмен локализацияланған жылытылу үшін пайдаланылған. Мұндай конфигурацияларда разрядтар бетке таралуы әртүрлі болып, беткі

©А.Т. Рахметоллаева, Д.А. Әскержанов, Н.Е. Қадырболат, А. Ерболұлы, Р.К. Құрманғалиев, 2026

қабаттың қаттылығы мен құрылымының біркелкілігіне әсер етеді. Қолданылған параметрлер мен конфигурация біздің зерттеулерде мартенситтің қалыптасуын және беткі қаттылықты арттыру тиімділігін көрсетті [2].

ЭПҚ әдісі қысқа уақыт ішінде беткі қабатты қатайтып, бөлшектің механикалық қасиеттерін едәуір жақсартады. Басқа авторлардың зерттеулерімен салыстырғанда, біздің тәжірибемізде беткі қабаттағы құрылымның ұсақ түйіршікті болуы, микроқаттылықтың жоғары болуы және разрядтардың локализацияланған сипаты айқын көрінді. Бұл әдісті жоғары жүктемелерге ұшырайтын машиналар мен механизмдердің бөлшектерін өндіруде қолдану тиімді.

ЭПҚ 65Г болаты сияқты конструкциялық болаттарды өңдеуде сенімді және нәтижелі әдіс болып табылады. Басқа зерттеулермен салыстырғанда, біздің нәтижелер беткі қабаттағы мартенситтің түзілуі, қаттылықтың ұлғаюы және микроқұрылымның ұсақ түйіршікті болуын растайды. Бұл әдіс бөлшектердің қызмет ету мерзімін ұзарту және сенімділігін арттыру үшін тиімді болып табылады.

Бұл жұмыста 65Г болатында ЭПҚ жүргізілген кезде беткі қабаттағы микроқаттылықтың артуы зерттелді. Катодтық кернеудің жоғарылауы (360 В дейін) шеткі аймақтарда ток тығыздығының максималды мәнге жетуіне алып келіп, жылу градиентінің пайда болуына ықпал етті. Бұл беткі қабаттағы құрылымның біркелкі емес өзгеруін түсіндіреді.

Материалдар мен әдістер

Электролитті-плазмалық технология материалдардың бетін өңдеуде қолданылатын заманауи әрі нәтижелілігі жоғары әдістердің қатарына жатады. Бұл тәсілдің ерекшелігі - плазмалық әсер мен электролиттік процестердің бір технологиялық цикл аясында жүзеге асырылуында. Осындай үйлесімнің арқасында әдіс машина жасау саласында, металл бұйымдарын өңдеуде, электрондық құрылғылар өндірісінде, сондай-ақ медициналық мақсаттағы құрал-жабдықтарды дайындауда кең қолданыс табуда. Аталған технология материалдардың беткі қабатының эксплуатациялық қасиеттерін жақсартуға мүмкіндік береді, соның ішінде олардың тозуға қарсы төзімділігін арттырып, коррозиялық әсерлерден қорғау деңгейін күшейтеді [3].

Электролитті-плазмалық қатайту металдарды беттік термиялық өңдеудің тиімді әдісі болып табылады. Бұл процесс барысында бөлшек электролиттік ортаға батырылып, электрлік разрядтың әсерінен оның беткі аймағы өте жоғары температураға дейін қыздырылады. Қыздырумен қатар жүретін электролиз құбылысы металдың үстіңгі қабатының химиялық құрамына өзгеріс енгізеді. Нәтижесінде болаттың физика-механикалық сипаттамалары айтарлықтай жақсарады: қаттылығы жоғарылады. Сонымен бірге, бұл технологияның құрылымдық қарапайымдылығы мен қоршаған ортаға зиянсыздығы оны өндірістік жағдайда кеңінен қолдануға қолайлы етеді [4, 5]. Сурет 1-де ЭПҚ қондырғысы көрсетілген.



Сурет 1 – Электролитті-плазмалық қондырғысының сыртқы көрінісі

Металлографиялық талдау HL-102AW микроскопында, 3.0 МПа (сурет 2) бөлшектік камерамен және Altami фирмасының арнайы бағдарламалық қамтамасыздандыруымен жүргізілді. Металлографиялық микроанализ жүргізу үшін үлгілер хром тотығына негізделген пастамен жылтыратылғаннан кейін, улағыш ретінде азот қышқылының 3%-дық спирттік ерітіндісі қолданылды [6, 7].

Микротұтқырлықты өлшеу Виккерс әдісі бойынша HV-1 DT құрылғысымен 1 Н инденаторға түсірілген жүктеме және 10 секунд тұрып қалу уақытымен жүргізілді, бұл ГОСТ 9450-76 стандарттарына сәйкес [8, 9].

65Г болатының ЭПҚ әдісімен өңделгеннен кейінгі микроқұрылым мен фазалық құрамды зерттеу үшін JEOL JSM-6390LV Scanning Electron Microscope құрылғысында сканерлеуші электронды микроскопия (СЭМ) қолданылды сканерлеуші электронды микроскопы материалдардың беткі морфологиясы мен микроқұрылымын зерттеуге арналған. Ол төмен вакуум режимінде жұмыс істеп, үлгіні күрделі дайындаусыз жоғары ажыратымдылықтағы бейнелер алуға мүмкіндік береді [10].



Сурет 2 – Металлографиялық микроскоп және Виккерс бойынша қаттылық тексеру құралы

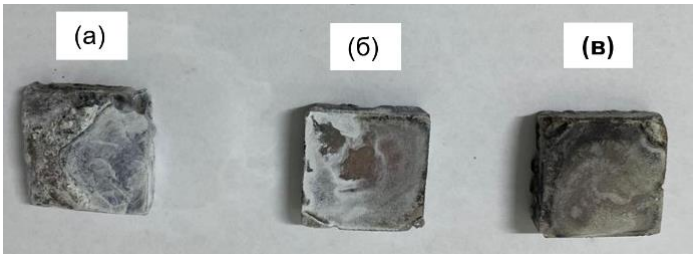
Нәтижелер мен талқылаулар

Эксперименттік жұмыстар мен сынақтар Шәкәрім университетінің «Қатайту технологиялар және жабындар» инжинирингтік орталығында жүзеге асырылды. Зерттеу материалы ретінде 65Г маркалы болат таңдалып, өлшемдері 30×30×7 мм болатын үлгілер дайындалды. Өңдеуге дейін үлгілердің беті механикалық түрде тегістеліп, жылтырату операциясынан өткізілді. Электролитті-плазмалық қатайту үдерісі арнайы қондырғыда үш үлгіге жүргізілді. Қолданылған ЭПҚ режимдерінің негізгі параметрлері 1-кестеде келтірілген. Барлық тәжірибелер барысында электролит ретінде натрий карбонатының 20%-дық судағы ерітіндісі пайдаланылды.

Кесте 1 – ЭПҚ параметрлері

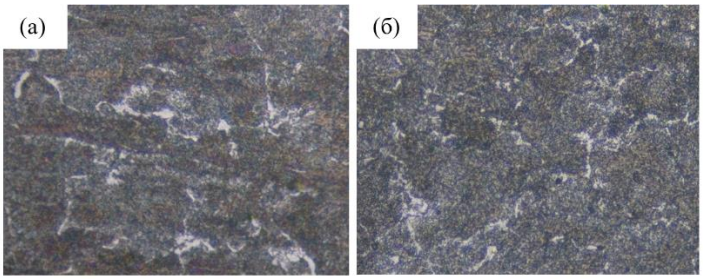
Үлгі	Кернеу, *В*	Ток күші, *А*	Қыздыру уақыты, с
Үлгі 1	360	90	15
Үлгі 2	360	90	12
Үлгі 3	360	90	9

1-кестеден көрініп тұрғандай, ,барлық үлгілер үшін қолданылған кернеу 360-В. Қыздыру үшін әртүрлі уақыттар алынды. Эксперимент нәтижесінде No 1 үлгі қатты балқуға ұшырады, оны сурет-3 көрсетілген. Қатты балқуға әкелген негізгі фактор қыздыру уақытының көп болуы себебінен. Қалған үлгілердің беттік қабаты қатты формасын өзгертпеді.



Сурет 3 – 65Г болаттың ЭПҚ кейінгі үлгілері
а – Үлгі. 1; б – Үлгі. 2; в – Үлгі. 3

Алынған нәтижелерге сәйкес, 65Г маркалы болаттың бастапқы күйіндегі құрылымы феррит пен перлит фазаларынан құралған. Бұл құрылым 4-суретте көрсетілген. Үлгілерді металлографиялық зерттеу барысында феррит бөліктері ашық түспен, ал перлит аймақтары біршама күңгірт реңкте байқалды.



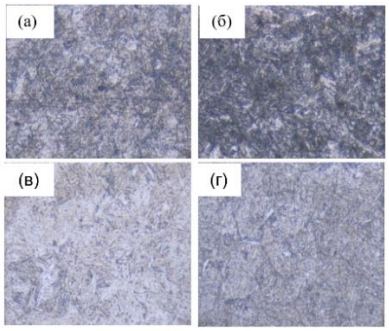
а – Үлгі. 2; б – Үлгі 3

Сурет 4 – 65Г болатының шынықтыруға дейінгі микроструктурасы

Мұндай айырмашылық үлгілерді азот қышқылы қосылған спирттік ерітіндімен өңдегеннен кейін айқынырақ көрінді. Жүргізілген химиялық өңдеу болаттың микроқұрылымындағы фазалар арасындағы шекараларды нақты ажыратуға мүмкіндік берді.

Болатты шынықтыру кезінде оны аустениттік жоғары температуралық күйден тез суытудың нәтижесінде құрылымдық өзгерістер орын алады. Осы процесс барысында аустенит фазасы мартенситке айналады. Мартенсит – метастабильді күйде болатын, өте майда түйіршікті құрылымымен ерекшеленетін фаза. Ол, әдетте, жіңішке әрі созылыңқы кристалдар түрінде түзіліп, материалдың механикалық беріктігін арттыруға әсер етеді [11, 12].

5-суретте мартенситтік құрылымдардың айқын қалыптасқанын көруге болады. Кристалдық торының қаттылығы жоғары болуына байланысты мартенсит болаттың қаттылығын едәуір ұлғайтып, сонымен қатар оның тозуға төзімділік қасиеттерін қамтамасыз етеді. Ұсынылған бейнелер электролитті-плазмалық қатайту (ЭПҚ) әсерінен материалдың микроқұрылымында орын алған елеулі өзгерістерді айқын көрсетеді. Алынған суреттер болаттың әртүрлі аймақтарындағы беткі қабаттың құрылымдық ерекшеліктерін сипаттап, өңдеу нәтижесінде жүрген фазалық қайта түзілу мен құрылымдық түрленулер жөнінде тұжырым жасауға негіз береді.

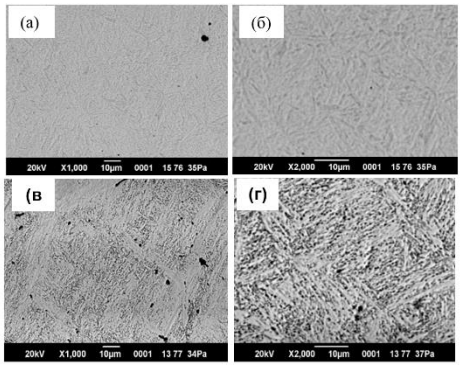


Сурет 5 – 65Г болатының шынықтырылған кейінгі кесіндісінің микроқұрылымы

а,в – Үлгі 2; б,г – Үлгі 3

Электролитті-плазмалық қатайту (ЭПҚ) өңдеуінен кейін 65Г болатынан дайындалған үлгілердің сканерлеуші электронды микроскоп (СЭМ) арқылы алынған бейнелерінде температура әсерінен туындаған микроқұрылымдық өзгерістер айқын байқалады. Микросуреттерді талдау барысында 65Г болатының қатайтудан кейінгі микроқұрылымы марганец элементінің әсерімен қалыптасқаны анықталды. 6-суретте беткі қабатта ұсақ және тығыз орналасқан ине тәрізді құрылым айқын көрінеді. Бұл құрылым мартенситтік сипатқа ие болып, қатайтудың тиімді өткенін дәлелдейді. Құрылым элементтерінің бір бағытта орналасуы мен жоғары тығыздығы осы аймақтағы қаттылық деңгейінің жоғары болуына тікелей әсер етеді.

Жалпылай айтқанда, болаттың беткі қабаттарында қаттылықтың артқаны байқалды, ондай әсер марганецтің есебінен болуы мүмкін. Ал материалдың терең қабаттарына өткен сайын құрылым біртіндеп сиреп, морфологиясы өзгереді. Бұл құбылыс қаттылықтың қима бойымен біркелкі таралмауымен және марганецтің микроқұрылым түзілуіне әртүрлі әсер етуімен түсіндіріледі. Осылайша, алынған суреттер 65Г болатында марганецтің қатайту үдерісіне маңызды рөл атқаратынын көрсетеді. Беткі қабатта ұсақ түйіршікті және жоғары қаттылыққа ие құрылым қалыптасса да, терең қабаттарда құрылымдық және қасиеттік айырмашылықтар пайда болатыны байқалады.

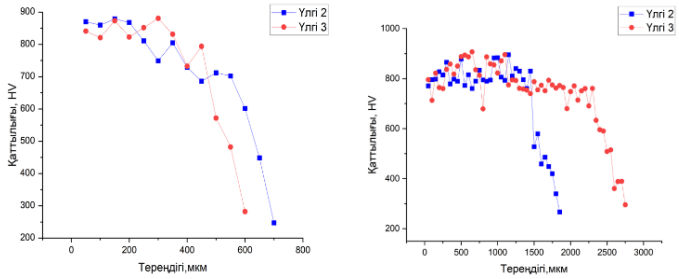


а,в – Үлгі 2; б,г – Үлгі. 3

Сурет 6 – 65Г болатының микроқұрылымының СЭМ-суреттері: 1000, 2000 есе үлкейтілгендегі көрінісі

65Г болатында қатайтудан кейін мартенситтік құрылым пайда болуы қаттылықтың едәуір артуына ықпал етеді. Бұл қасиет болатты қаттылығы жоғары талап етілетін маңызды бөлшектер мен тораптарда қолдануға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, мартенситтің болуы созылуға беріктілік пен шаршауға төзімділікті күшейтіп, циклдік немесе айнымалы жүктемелерге ұшырайтын элементтердің сенімділігін арттырады. Дегенмен, мартенсит фазасының тым көп болуы материалдың пластикалық қасиеттерін және соққыға төзімділігін төмендетуі мүмкін. Сондықтан болаттың жобалануы мен пайдаланылуы кезінде оның механикалық сипаттамаларының оңтайлы үйлесімін сақтау үшін осы факторларды ескеру қажет.

65Г болатының беткі қабатының микротұтқырлығы ЭПҚ кейінгі өлшемдері 7-суретте көрсетілген. Алғашқы күйде 65Г болатының микротұтқырлығы 236,4HV деңгейінде болған. Ең үлкен өсу 3-нөмірлі үлгіде тіркеліп, оның мәні 906,9 HV-ге жетті. Салыстырмалы түрде қарағанда, ЭПҚ-дан кейін 65Г болатының микроқаттылығы бастапқы көрсеткіштерге қарағанда 3,1-3,56 есе артатыны анықталады. Сонымен қатар, қатайтылған беткі қабаттың қалыңдығы шамамен 2,2-3 мм болғаны анықталды. Бұл әдістің тиімділігін көрсетеді және 65Г болатын бөлшектерді жоғары механикалық жүктемелер мен қарқынды үйкеліс жағдайында қолдануға мүмкіндік береді. Алынған нәтижелер машина жасау және көлік салаларында ауыр жүктемелерге ұшырайтын жабдық бөлшектерінің қызмет ету мерзімін ұзартуға және олардың сенімділігін арттыруға негіз бола алады.



Сурет 7 – Электролитті-плазмалық қатайтудан кейінгі 65Г үлгілерінің көлденең қимадағы қаттылығының таралуы

Қорытынды

Жүргізілген зерттеулер 65Г болатына натрий карбонатының электролит ретінде қолданылуымен ЭПҚ әдісінің жоғары тиімділігін дәлелдеді. Бұл өңдеу микроқұрылым мен микроқаттылық көрсеткіштерін айтарлықтай жақсартты. Шынықтыру нәтижесінде қатты беткі қабат қалыптасып, оның микроқаттылығы 800-900 HV дейін артты, бұл бастапқы көрсеткіштермен салыстырғанда 3,1-3,56 есе жоғарылауын қамтамасыз етті.

Жүргізілген зерттеулер электролиттік-плазмалық қатайту әдісінің 65Г болатынан дайындалған бөлшектердің жоғары механикалық және абразивті әсерлер жағдайында жұмыс істеу төзімділігін едәуір арттыратынын көрсетті. Қатайтудың бұл тәсілі бұйымдардың қызмет ету мерзімін ұзартуға және пайдалану барысындағы сенімділігін жоғарылатуға мүмкіндік

береді. Осыған орай, аталған әдісті жоғары жүктемелерге және агрессивті ортаға ұшырайтын машиналар мен механизмдердің бөлшектерін өндіруде қолдану орынды болып табылады. Алынған нәтижелер 65Г болатынан жасалған өнімдердің ресурсын арттыруға бағытталған технологияны өнеркәсіптік тәжірибеде әрі қарай дамыту мен жетілдіруге негіз болады.

Әдебиеттер тізімі

1. Belkin P.N. Plasma electrolytic hardening of steels: Review / P.N. Belkin, S.A. Kusmanov // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2016. – Vol. 52, № 6. P. 531-546.
2. The Role of Current Density Distribution on Local Hardening of 20GL Steel During Electrolytic Plasma Processing / R. Kurmangaliyev et al // Materials. – 2025. – № 18(22). – P. 5073.
3. Effect of electrolyte-plasma surface hardening on structure wheel steel 2 / B.K. Rakhadilov et al // Bulletin of the Karaganda University «Physics Series». – 2020. – Vol. 98, № 2. – P. 68-74.
4. 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. – Article 6.
5. Effect of Electrolytic-Plasma Hardening on the Microstructure and Tribological Properties of Low-Alloy Steels / B. Rakhadilov et al // Metals. – 2025. – Vol. 15, № 7. – Article 698.
6. The Effect of Electrolytic-Plasma Hardening Time on the Microstructure, Hardness, and Corrosion Behavior of Medium-Carbon Steel / Y. Mukhametov et al // Crystals. – 2025. – № 15(12). – Article 1058.
7. Metallographic Sample Preparation and Examination. Academia.edu. – 2015. – P. 12-36.
8. Electrolytic Plasma Hardening of 20GL Steel: Thermal Modeling and Experimental Characterization of Surface Modification / B. Rakhadilov et al // Applied Sciences. – 2025. – Vol. 15, № 15. – Article 8288.
9. GOST 9450-76. Metody opredeleniya mikrotverdosti. Vikkers. Moskva: Izdatel'stvo standartov, 1976. – 35 s. (In Russian).
10. Marček Ľ. Microscopic Analysis of Structure and Wear for Metallic Materials Using SEM / Ľ. Marček, J.Jr. Vavro, J. Vavro // Applied Sciences. – 2024. – Vol. 14, № 20. – Article 9378.
11. Reed-Hill R.E. Physical Metallurgy Principles. 4th edition / R.E. Reed-Hill, R. Abbaschian // Boston: Cengage Learning. – 1994. – P. 212-235.
12. Bhadeshia H.K.D.H. Steels: Microstructure and Properties. 4th edition / H.K.D.H. Bhadeshia // Oxford: Butterworth-Heinemann. – 2017. – P. 145-160.

А.Т. Рахметоллаева[2*], Д.А. Әскержанов[1,2], Н.Е. Қадырболат[1,2], А. Ерболұлы[1,2], Р.К. Құрманғалиев[2]

[1]Университет Шәкәрім, Инжиниринговый центр «Технологии упрочнения и покрытия»
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20А

[2]Университет Шәкәрім, кафедра технической физики и теплоэнергетики,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20А

*e-mail: aknurrahmetollaeva4@gmail.com

ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ СТАЛИ 65Г ПРИ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ЗАКАЛКЕ

В данной работе исследовано влияние метода электролитно-плазменной закалки (ЭПЗ) на сталь марки 65Г. Перед проведением исследований поверхность образцов была механически выровнена, затем подвергнута операциям шлифования и полирования, в результате чего были полностью удалены исходные поверхностные дефекты и посторонние слои. В ходе эксперимента в качестве электролита использовался 20%-ный раствор карбоната натрия, и для трёх образцов ЭПЗ осуществлялась при различных временах нагрева. Показано, что исходная микроструктура материала состоит из структурных составляющих феррита и перлита. В результате закалки аустенит превращается в мартенсит, формируя сверхмелкую игольчатую структуру.

Изображения, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа, показали, что электролитно-плазменная обработка существенно изменяет структуру поверхностного слоя: происходит измельчение зёрен, формирование карбидных фаз и значительное увеличение микротвёрдости поверхностного слоя. Установлено, что образование мартенсита и влияние легирующего элемента марганца на прокаливаемость стали позволяют повысить твёрдость в 3,1-3,56 раза.

Результаты исследования показывают, что обработка стали 65Г методом ЭПЗ приводит к улучшению её микроструктуры и механических свойств, повышению прочности и надёжности обработанных деталей, а также увеличению срока их службы. В связи с этим данный метод может

быть использован как перспективная и эффективная технология при изготовлении пружин, валов, зубчатых колёс и других ответственных деталей, работающих в условиях высоких нагрузок и трения, в машиностроении, транспортной и сельскохозяйственной технике.

Ключевые слова: *сталь 65Г, электролитно-плазменное упрочнение, твердость, структура поверхности, плазма.*

A.T. Rakhmetollayeva[2]*, D.A. Askerzhanov[1,2], N.E. Kadyrbolat[1,2], A. Yerboluly[1,2], R.K. Kurmangaliev[2]
[1]Shakarim University, Engineering Center «Strengthening Technologies and Coatings»,
071412, Republic of Kazakhstan, Semey, Glinka St., 20A
[2]Shakarim University, Department of Technical Physics and Thermal Power Engineering,
071412, Republic of Kazakhstan, Semey, Glinka St., 20A
*e-mail: aknurrahmetollaeva4@gmail.com

STRUCTURAL CHANGES OF 65G STEEL DURING ELECTROLYTIC PLASMA HARDENING

In this work, the effect of the electrolytic plasma hardening (EPH) method on 65G steel was investigated. Prior to the study, the surface of the specimens was mechanically leveled and subsequently subjected to grinding and polishing operations, which ensured the complete removal of initial surface defects and foreign layers. During the experiments, a 20% sodium carbonate solution was used as the electrolyte, and EPH was applied to three specimens at different heating durations. It was shown that the initial microstructure of the material consists of ferrite and pearlite structural constituents.

As a result of hardening, austenite transforms into martensite, forming an extremely fine needle-like structure. Images obtained using a scanning electron microscope demonstrated that electrolytic plasma treatment significantly modifies the structure of the surface layer: grain refinement occurs, carbide phases are formed, and the microhardness of the surface layer increases substantially. It was proven that martensite formation and the influence of the alloying element manganese on the hardenability of the steel make it possible to increase hardness by 3.1-3.56 times.

The research results indicate that electrolytic plasma hardening improves the microstructure and mechanical properties of 65G steel, enhancing the strength and reliability of treated steel components and extending their service life. Therefore, this method can be considered a promising and efficient technology for manufacturing springs, shafts, gears, and other critical parts operating under heavy loads and friction conditions in mechanical engineering, transport, and agricultural machinery.

Key words: *65G steel, electrolyte-plasma hardening, hardness, surface structure, plasma.*

Авторлар туралы мәлемет

Ақнұр Тлеубекқызы Рахметоллаева* – Шәкәрім университетінің «Техникалық физика» мамандығының студенті, Семей қаласы, Қазақстан Республикасы; e-mail: aknurrahmetollaeva4@gmail.com.

Думан Әскержанов Аңсағанұлы – Шәкәрім университетінің «Техникалық физика» мамандығының магистранты; Шәкәрім университетінің университетінің «Қатайту технологиялар және жабындар» инженерлік орталығының ғылыми қызметкері, Семей қаласы, Қазақстан Республикасы; e-mail: dumanaskerzhanov541@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-3706-4087.

Нұрлат Ерболұлы Қадырболат – Шәкәрім университетінің «Жылу энергетикасы» мамандығының студенті, Семей қаласы, Қазақстан Республикасы; e-mail: ersinnur44@gmail.com.

Айқын Ерболұлы – Шәкәрім университетінің «Техникалық физика» мамандығының студенті, Семей қаласы, Қазақстан Республикасы; e-mail: aikynerboluly3@gmail.com.

Ринат Хамитұлы Құрманғалиев – Шәкәрім университетінің «Техникалық физика» мамандығының докторанты, Семей қаласы, Қазақстан Республикасы; e-mail: rinat_real@rambler.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-2209-6740.

Сведения об авторах

Ақнұр Рахметоллаева Тлеубекқызы* – студент специальности «Техническая физика» Шәкәрім университет, г. Семей, Республика Казахстан; e-mail: aknurrahmetollaeva4@gmail.com.

Думан Әскержанов Ансаганулы – магистрант по специальности «Техническая физика»; Шәкәрім университет, научный сотрудник Инжинирингового центра «Упрочняющие технологий и покрытия», Университет Шәкәрім, г. Семей, Республика Казахстан; e-mail: dumanaskerzhanov541@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-3706-4087.

Нұрлат Ерболұлы Қадырболат – студент специальности «Теплоэнергетика», Шәкәрім университет, г. Семей, Республика Казахстан; e-mail: ersinnur44@gmail.com.

Айқын Ерболұлы – студент специальности «Техническая физика», Шәкәрім университет, г. Семей, Республика Казахстан; e-mail: aikynerboluly3@gmail.com.

Ринат Хамитұлы Құрманғалиев – докторант специальности «Техническая физика»; Шәкәрім университет, г. Семей, Республика Казахстан; e-mail: rinat_real@rambler.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-2209-6740.

Information about the authors

Aknur Tleubekkyzy Rakhmetollayeva* – student of «Technical physics» Shakarim University; Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: aknurrahmetollaeva4@gmail.com.

Duman Askerzhanov Ansaganuly – Master's student in «Technical Physics» Shakarim University, Research Fellow at the Engineering Center «Strengthening Technologies and Coatings», Shakarim University; Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: dumanaskerzhanov541@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-3706-4087.

Nurlat Erboluly Kadyrbolat – student of «Heat power engineering» Shakarim University, Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: ersinnur44@gmail.com.

Aikyn Erboluly – student of «Technical physics» Shakarim University, Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: aikynerboluly3@gmail.com.

Rinat Khamituly Kurmangaliyev – PhD student in «Technical Physics» Shakarim University, Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: rinat_real@rambler.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-2209-6740.

Редакцияға енуі 04.02.2026
Өңдеуден кейін түсуі 13.02.2026
Жариялауға қабылданды 23.02.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-27

IRSTI: 53.49.05

N. Kadyrbolat[1], R. Kurmangaliyev[1], Kussainov[1], Z. Satbayeva[1,2], D. Zhasbolatov[3]
[1]Engineering Center «Hardening technologies and coatings», Shakarim University,
071412, Republic of Kazakhstan, Semey, Fizkulturnaya str., 4a
[2]TOO «Plasma Science»,
070018, Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk, Gogol str. 7G
[3]Niigata University,
8050, Japan Nishi-ku, Niigata, 950-2181
*e-mail: ersinnur44@gmail.com

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR CALCULATING THE VAPOR-GAS ENVELOPE THICKNESS AND STUDYING THE INFLUENCE OF CATHODIC HEATING PROCESS ENERGY CHARACTERISTICS ON THE VAPOR-GAS ENVELOPE THICKNESS

Abstract: *A method for calculating the thickness of the vapor-gas envelope formed around the cathode during electrolytic-plasma heating has been developed, taking into account the energy characteristics of the process. The proposed approach is based on an analysis of the energy balance in the near-cathode region and considers the effects of current density, voltage, thermophysical properties of the electrolyte, and heat-transfer parameters on the conditions of evaporation and vapor-gas mixture formation. Experimental studies were carried out under cathodic heating of steel 20 samples in a Na_2CO_3 solution at 100-300 V with simultaneous recording of temperature and electrical parameters. Numerical modeling of current and energy distribution in the near-cathode region was performed in COMSOL Multiphysics. Relationships between the vapor-gas envelope thickness and the discharge energy parameters were established, and it was shown that its growth is accompanied by the transition from nucleate to film boiling of the electrolyte and by an increase in the cathode heating intensity. The obtained results can be used for selecting electrolytic-plasma processing regimes and for modeling thermal processes in the near-cathode zone.*

Key words: *electrolytic-plasma treatment, steel 20, cathode heating, vapor-gas envelope, envelope thickness, current density, numerical modeling.*

Introduction: One of the key factors determining the efficiency of electrolyte-plasma and cathodic electrolyte-plasma processes is the formation of a stable vapor-gas envelope around the

©N. Kadyrbolat, R. Kurmangaliyev, Kussainov, Z. Satbayeva, D. Zhasbolatov, 2026

cathode. The thickness of this envelope directly influences the ionization intensity and, consequently, the surface temperature of the treated sample. However, the precise determination of the envelope parameters is complicated by the complex interaction between thermal, electrical, and hydrodynamic phenomena occurring in the near-cathode zone.

In this regard, the task was set to develop a methodology for calculating the vapor-gas envelope thickness based on the energy characteristics of the cathode heating process-such as current density, voltage drop, specific power, and heat transfer coefficient. The proposed approach allows for linking observable experimental parameters (surface temperature, visual signs of discharge, current load) with the physical characteristics of the envelope, thereby providing a quantitative assessment of the conditions for thermochemical treatment (TCT).

As part of the conducted research, the dependence of the vapor-gas envelope thickness on the main energy parameters of the discharge was determined. The results of the calculations and experimental observations revealed patterns in the variation of the envelope thickness at different levels of cathode heating and allowed for the proposal of criteria ensuring its stable formation. Below are the obtained data and their interpretation, reflecting the relationship between heating modes and the structural-energy characteristics of the near-cathode zone.

Materials and methods

To study the formation and calculate the thickness of the vapor-gas envelope during cathode heating, an electrolyte-plasma treatment unit with a regulated DC power source was utilized. A 20% aqueous solution of sodium carbonate (Na_2CO_3) served as the electrolyte. The cathode voltage was varied within the range of 100-300 V, enabling the realization of various heating modes-from nucleate boiling of the electrolyte to the formation of a stable vapor-gas envelope.

The research subjects were samples of Grade 20 structural steel (AISI 1020 equivalent) with dimensions of $20 \times 20 \times 10$ mm. Prior to the experiments, the sample surfaces were ground using abrasive papers of various grit sizes (from 60 to P2500), subsequently polished with diamond paste (particle size 0.25-0.5 μm), and cleaned with ethyl alcohol.

The surface temperature and heating parameters were recorded using thermocouples and a digital measurement system. To determine the current and energy distribution in the near-cathode zone, numerical modeling was performed in COMSOL Multiphysics 6.2 using the Electric Currents module. The model accounted for the electrophysical properties of both the electrolyte and the steel, as well as the boundary conditions: a negative constant voltage at the cathode and zero potential at the anode surface.

Results and discussion

If we consider the process of electrolytic-plasma treatment from the perspective of the current-voltage dependence, three regions can be distinguished on the volt-ampere characteristic curve (Figure 1). In the first region (phase I), the Faradaic electrolysis process occurs, during which the current reaches a peak value. This is followed by the current interruption region (phase II). When a certain critical voltage V_B is reached, active gas bubble formation begins at the cathode surface, causing the average current to drop. In this phase, bubble boiling of the electrolyte occurs in the near-cathode zone. With a further increase in voltage (phase III), a stable vapor-gas envelope forms around the cathode part as the bubbles merge, resulting in film boiling of the electrolyte. This is the cathodic process region, where the workpiece is heated by the plasma formed. The onset of this process is marked by the achievement of the second critical voltage V_D.

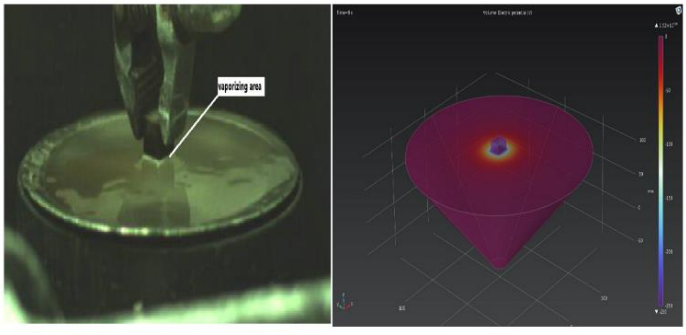


Figure 1 – The region of vapor-gas envelope formation around the cathode workpiece

The formation of bubbles occurs, firstly, due to the electrolysis of the electrolyte solution, which releases gases, and secondly, as a result of the evaporation of the water base of the electrolyte [1]. The mixing of these bubbles forms the basis of the vapor-gas envelope in the near-cathode region. For a vapor-gas envelope to form, the near-cathode layer of the electrolyte solution must be heated to its boiling temperature (Figure 2).

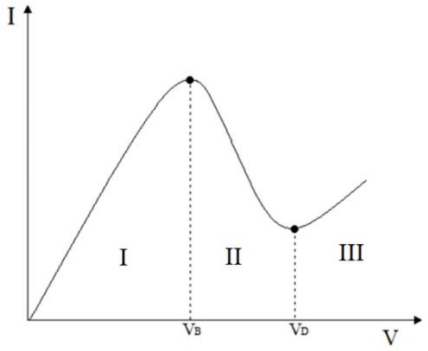


Figure 2 – Volt-ampere characteristic of cathode heating

The vapor-gas envelope (VGE) is a mixture of water vapor, activated OH^- and H^+ particles, and ions present in the electrolyte. The main voltage drop in the electrical circuit occurs precisely in this region, so its properties largely determine the nonlinear nature of the current-voltage dependence of the electrolytic-plasma treatment (EPT) process. The electric field strength in the VGE reaches 10^6-10^7 V/m [2]. At a temperature of around 100 °C, this field causes ionization of the vapors as well as emission of electrons and ions, which sustain a stationary electric discharge and form the so-called electrolyte plasma.

The most common application of electrolytic plasma treatment for steel products is the saturation with light elements – nitriding, carburizing, and boriding. Multicomponent surface modification is also possible, with simultaneous incorporation of several elements (nitrocarburizing, sulfonitrocarburizing) or carbide-forming elements such as tungsten, vanadium, molybdenum, and their combinations. This greatly expands the possibilities for controlling the structure and properties of the surface. Previously, diffusion saturation under electrolytic plasma conditions has been studied for both anodic and cathodic processes, primarily applied to steels and titanium (nitriding, nitrocarburizing). It should be noted that the physico-chemical processes occurring in electrolytic plasma are largely analogous to the processes characteristic of other types of electrochemical-thermal treatment (ECTT).

Passing an electric current through an electrolytic cell containing two metal electrodes – an active and an auxiliary electrode – with a gradual increase of the applied voltage leads to a sequential change of the process regimes [3, 4]. The active electrode, having a significantly smaller surface area, plays a key role in the formation of near-cathode phenomena.

The formation of a stable, continuous vapor-gas envelope (VGE) around the active electrode is a necessary condition for implementing the electrolytic-plasma heating mode of metals. Since in this mode electrochemical processes practically do not affect the establishment of thermal balance, all phenomena occurring at the metal-electrolyte interface are purely thermal in nature. Consequently, the heating of the active electrode can be interpreted as a thermal process analogous to boiling in classical thermophysics.

It is known that as the heat flux density from the heater to the liquid increases, the convective heat transfer regime transitions into the bubble boiling regime. In this case, intensive vaporization of the electrolyte occurs at the heater surface. At a critical heat flux, a continuous vapor layer forms, which results in film boiling.

Based on the analysis of experimental data and literature sources [5-7], the near-electrode region of the active electrode can be represented as a multilayered structure. Layer 6, depending on the composition of the electrolyte, may be either solid and continuous or liquid and porous. In the anodic mode of electrolytic-plasma treatment (EPT), this layer often contains oxide compounds.

The superheated near-electrode region 3 is separated from the bulk of the electrolyte by an isothermal surface. Within this zone, the liquid temperature exceeds the boiling point, while outside the isotherm it remains below boiling. Therefore, region 3 represents a boiling boundary layer in which intensive vaporization occurs. Gas bubbles are also released here due to electrolysis.

According to the proposed model, electric current near the active electrode passes through a multiphase system. In the case of a non-continuous liquid surface layer, possible sequences of transitions include:

metal → electrolyte → gas → electrolyte, or metal → gas → electrolyte.

If the surface layer is continuous and solid (conductive or semiconductive), the transitions may be:

metal → semiconductor → gas → electrolyte, or metal → gas → electrolyte.

In these cases, the nature of conductivity changes from electronic to electron-ion and then to ionic mechanisms.

In the vapor-gas zone, when electric current passes through the electrolytic cell, thermal energy is released in proportion to the resistance of the corresponding segment of the circuit. The resistance of the metallic electrode and the main electrolyte layer is significantly lower than the resistance at the «metal-electrolyte» interface; therefore, the greatest heat release occurs precisely in this region. This leads to intensive bubble boiling of the electrolyte at the electrode surface. The flowing current causes local heating and partial evaporation of the electrolyte.

For the system to transition to a stable heating mode, bubble boiling must shift to film boiling – this occurs when the metal electrode temperature exceeds approximately 125°C. Further increase in energy released at the interface causes dynamic instability of the two-phase boiling layer, resulting in the replacement of bubble boiling by film boiling. In this mode, the surface of the active electrode is covered by a continuous vapor-gas envelope, which stabilizes the discharge process.

It is evident that the resistance of the electrodes and the liquid electrolyte is significantly lower than the resistance of the vapor-gas envelope. Therefore, it can be assumed that the main portion of the electrical energy supplied from the power source is spent on heating and vaporizing the electrolyte.The energy balance of the process can be expressed by the equation:

$$UIt = m(c\Delta T + \psi + c_v \Delta T_v), \quad (1)$$

where I – current intensity (A), m – mass of the evaporated electrolyte (kg), c – specific heat capacity of the electrolyte (J/(kg·K)), ΔT – difference between the initial temperature of the electrolyte and its boiling point (K), ψ – specific latent heat of vaporization (J/kg), $\mathbf{c_v}$ – specific heat capacity of the vapor at constant pressure (J/(kg·K)), $\mathbf{\Delta}T_v$ – difference between the boiling point and the vapor temperature (K).

ΔT_v – the difference between the boiling temperature of the electrolyte solution and the temperature of the vapor.

The mass of the evaporated electrolyte can be expressed as

$$m = \rho S \delta_0, \quad (2)$$

where ρ – density of the liquid electrolyte (kg/m³), S – area of the active electrode surface (m²), and δ_0 – thickness of the liquid layer involved in evaporation (m).

The thickness of the formed vapor-gas envelope is related to $\delta_0$by the following relation:

$$\delta = \delta_0 \frac{\rho}{\rho_v}, \quad (3)$$

where $\rho_v = \frac{\mu P}{RT}$ is the density of water vapor (kg/m³), determined from the ideal gas equation of state; μ\muμ is the average molar mass of the electrolyte (kg/mol); PPP is the pressure (Pa); RRR is the universal gas constant (J/(mol·K)); TTT is the average temperature of the vapor-gas envelope (K), which can be taken as the half-sum of the electrolyte boiling temperature and the cathode surface temperature.

Thus, the expression for calculating the vapor–gas envelope thickness has the form

$$\delta = \delta_0 \frac{\rho RT}{\mu P}. \quad (4)$$

The vapor–gas mixture formed in the envelope region rises upward under the action of the buoyancy (Archimedes) force. Under steady-state conditions, the mass of evaporating liquid must be equal to the mass of vapor rising upward. Analysis of the scheme shows that, in the steady

regime, the vapor velocity is determined by the balance between the buoyancy force and viscous resistance. For the envelope center, this relation can be written as

$$\rho g \delta S = 2 S \eta_v \frac{v}{\delta}, \quad (5)$$

from which the vapor velocity is

$$v = \frac{\rho g \delta^2}{2\eta_v}. \quad (6)$$

The vapor viscosity can be expressed through its molecular characteristics:

$$\eta_v = \frac{\lambda \rho_v}{3}\sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}} = \frac{\lambda P \mu}{3RT}\sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}} = \frac{\lambda P}{3}\sqrt{\frac{8\mu}{\pi RT}}, \quad (7)$$

where λ – is the mean free path of vapor molecules (m).

Since the vapor velocities at both boundaries of the vapor-gas envelope (metal side and electrolyte side) differ, the average vapor flow velocity is taken to be approximately half the maximum value. Thus,

$$v = \frac{\rho g \delta^2}{4\eta_v}. \quad (8)$$

The amount of liquid evaporating from the active electrode surface per unit time must equal the mass of vapor removed upward from the envelope. This condition can be written as

$$\frac{UjS}{c\Delta T + \psi + c_v \Delta T_v} = \rho_v v \delta Z, \quad (9)$$

where jjj is the current density (A/m²), ZZZ is the mean hydraulic size of the surface (m), for a rectangular shape calculated as $Z = \frac{2 \cdot a \cdot b}{(a+b)}$ a,b are the width and length (m), S=ab is the cathode area (m²).

Hence,

$$\frac{Ujab}{c\Delta T + \psi + c_v \Delta T_v} = \delta^3 \frac{2 \cdot a \cdot b}{(a+b)} \frac{P \mu \rho g}{4 \eta_v RT} \quad (10)$$

Finally, the expression for the vapor–gas envelope thickness is obtained as

$$\delta = \sqrt[3]{\frac{2RT\eta_v Uj(a+b)}{(c\Delta T + \psi + c_v \Delta T_v) P \mu \rho g}}$$

Conclusion

In conclusion, the present study proposes a method for calculating the thickness of the vapor-gas envelope formed during cathodic heating in electrolyte-plasma processes. The method is based on an energy approach and accounts for the influence of current density, voltage, thermophysical properties of the electrolyte, and heat transfer parameters. The formation of the vapor-gas envelope is considered as a result of the transition from nucleate to film boiling of the electrolyte with increasing voltage. The main potential drop and heat release occur within the envelope region, which determines the energy distribution in the near-cathode zone. Based on the analysis, relationships between the vapor-gas envelope thickness and the energy parameters of the process were obtained. It was established that an increase in current density and voltage leads to an increase in envelope thickness and to a higher heating intensity of the cathode surface.

The obtained relationships can be used to evaluate cathodic heating regimes and to select parameters of electrolyte-plasma treatment. The presented results make it possible to describe the conditions for stable formation of the vapor-gas envelope and to apply them in further modeling of thermal and electrical processes in the near-cathode region.

References

1. Low-temperature plasma electrolysis: Theory and practice / A.V. Kravchenko et al. – Moscow, Dnepropetrovsk: Accent PP LLC. – 2013.
2. Sinkevich, Yu.A. Modern concepts of the mechanism of electrical conductivity of the vapor-gas envelope under conditions of electrolytic anodic treatment. – 2015.
3. Electrophysical and electrochemical processing methods / Z.I. Polyakov et al. Chelyabinsk: South Ural State University. – 2006.
4. Babenko V.P. Linear voltage and current regulators / V.P. Babenko, V.K. Bityukov. – 2018.
5. Levin O.V. Experimental investigation and modeling of electrode processes in films of conducting and redox polymers. Doctoral dissertation, St. Petersburg State University. – O.V. Levin. – 2017.

6. Diskaeva E.N. Investigation of near-electrode layer properties of magnetic fluid by ellipsometric and electrophysical measurements. Doctoral dissertation. – E.N. Diskaeva. – 2006.
7. Khokhryakov E.V. Physicochemical regularities of formation of multicomponent functional coatings in the microplasma mode. Doctoral dissertation, Tomsk State University. – E.V. Khokhryakov. – 2004.
8. Kaputkin D.E. Uskorennoe diffuzionnoe nasyshchenie poverkhnosti metallov pri ehlektro-khimiko-termicheskoi obrabotke / D.E. Kaputkin, V.N. Duradzhi, N.A. Kaputkina // Fizika i khimiya obrabotki materialov. – 2020. – № 2. – S. 48-57. http://elibrary.ru/item.asp?id=43102169. (In Russian).
9. Kaputkin D.E. Accelerated Diffusion Saturation of the Metal Surface during Electrochemical Heat Treatment / D.E. Kaputkin, V.N. Duradji, N.A. Kaputkina // Inorganic Materials: Applied Research. – 2025. – T. 16, № 3. – P. 737-743. http://elibrary.ru/item.asp?id=82621223.
10. Kaputkin D.E. Reasons for the acceleration of the saturation of the metal surface during electro-thermochemical treatment / D.E. Kaputkin, V.N. Duradji // V knige: Perspektivnye napravleniya issledovanii v nauke i tekhnologiyakh. – 2021. – P. 101-120. http://elibrary.ru/item.asp?id=46679287. (In Russian).

Funding information

This research has been funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant № BR24992870).

Н. Қадырболат[1]*, Р. Курмангалиев[1], З. Сатбаева[1,2], Р. Кусаинов[1], Д. Жасболатов[3]
[1]Инжиниринг орталығы «Қатайту технологиялары және жабындар», Шәкірім университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Физкультурная к-сі, 4 в
[2]ЖШС «Plasma Science»,
070018, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ., Гоголя к-сі, 7 Г,
[3]Ниигата университеті, 8050, Япония, Ниси-ку, Ниигата, 950-2181.
*e-mail: ersinnur44@gmail.com

КАТОДТЫҚ ҚЫЗДЫРУ ПРОЦЕСІНІҢ ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ СИПАТТАМАЛАРЫНЫҢ ПАРОГАЗДЫҚ ҚАБЫҚША ҚАЛЫҢДЫҒЫНА ӘСЕРІН ЗЕРТТЕУ ЖӘНЕ ПАРОГАЗДЫҚ ҚАБЫҚША ҚАЛЫҢДЫҒЫН ЕСЕПТЕУ ӘДІСТЕМЕСІН ӘЗІРЛЕУ

Аңдатпа: *Катод маңында электролитті-плазмалық қыздыру кезінде қалыптасатын парогаздық қабықша қалыңдығын есептеу әдістемесі процесстің энергетикалық сипаттамаларын ескере отырып әзірленді. Ұсынылған тәсіл катодтық аймақтағы энергетикалық баланс талдауына негізделген және булану мен парогаздық қоспаның түзілу шарттарына ток тығыздығының, кернеудің, электролиттің жылуфизикалық қасиеттері мен жылуалмасу параметрлерінің әсерін ескереді. Эксперименттік зерттеулер Na_2CO_3 ерітіндісінде 100-300 В кернеуде болат 20 үлгілерін катодтық қыздыру жағдайында жүргізіліп, температуралық және электрлік параметрлер тіркелді. Околокатодтық аймақта ток пен энергияның таралуы COMSOL Multiphysics ортасында сандық модельдеу арқылы зерттелді. Парогаздық қабықша қалыңдығының разрядтың энергетикалық параметрлеріне тәуелділіктері анықталып, оның ұлғаюы электролиттің көпіршікті қайнаудан қабықшалы қайнауға өтуімен және катод бетінің қызу қарқындылығының артуымен қатар жүретіні көрсетілді. Алынған нәтижелер электролитті-плазмалық өңдеу режимдерін таңдауда және прикатодтық аймақтағы жылулық процестерді модельдеуде қолданылуы мүмкін.*

Түйін сөздер: *электролитті-плазмалық өңдеу, болат 20, катодтық қыздыру, парогаздық қабықша, қабықша қалыңдығы, ток тығыздығы, сандық модельдеу.*

Н. Қадырболат[1]*, Р. Курмангалиев[1], Р.Кусаинов[1], З. Сатбаева[1,2], Д. Жасболатов[3]
[1]Инжиниринговый центр «Упрочняющие технологии и покрытия», Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, г.Семей , ул. Физкультурная, 4 а
[2]ТОО «Plasma Science»,
070018, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск, ул. Гоголя 7 Г
[3]Ниигатский университет, 8050, Япония, Ниси-ку, Ниигата, 950-2181
*e-mail: ersinnur44@gmail.com

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ТОЛЩИНЫ ПАРОГАЗОВОЙ ОБОЛОЧКИ И ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА КАТОДНОГО НАГРЕВА НА ТОЛЩИНЫ ПАРОГАЗОВОЙ ОБОЛОЧКИ

Аннотация: *Разработана методика расчёта толщины парогазовой оболочки, формирующейся вокруг катода при электролитно-плазменном нагреве, с учётом энергетических характеристик процесса. Предложенный подход основан на анализе энергетического баланса в прикатодной зоне и учитывает влияние плотности тока, напряжения, теплофизических свойств электролита и параметров теплообмена на условия испарения и образования парогазовой смеси. Экспериментальные исследования выполнены при катодном нагреве образцов стали 20 в растворе Na_2CO_3 при напряжении 100-300 В с регистрацией температурных и электрических параметров. Численное моделирование распределения тока и энергии в околокатодной области проведено в среде COMSOL Multiphysics. Установлены зависимости толщины парогазовой оболочки от энергетических параметров разряда и показано, что её рост сопровождается переходом от пузырькового к плёночному кипению электролита и повышением интенсивности нагрева катода. Полученные результаты могут быть использованы при выборе режимов электролитно-плазменной обработки и моделировании тепловых процессов в прикатодной зоне.*

Ключевые слова: *электролитно-плазменная обработка, сталь 20, катодный нагрев, парогазовая оболочка, толщина оболочки, плотность тока, численное моделирование.*

Information about the authors

Nurlat Erboluly Kadyrbolat* – Student in «Heat Power Engineering» at Shakarim University of Semey, Kazakhstan, Assistant at the Engenering Center «Strengthening Technologies and Coatings»; e-mail: ersinnur44@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-9014-4023.

Rinat Khamituly Kurmangaliyev – Doctoral student in «Technical Physics» at Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: rinat_real@rambler.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-2209-6740.

Rinat Kenzheyevich Kussainov – Head of the Engineering Center «Strengthening Technologies and Coatings», Semey, Kazakhstan; e-mail: rinat.k.kus@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5166-4761.

Zarina Askarbekovna Satbayeva – PhD, Science Professor of the Department of «Technical Physics and Thermal Power Engineering», Shakarim University of Semey, Republic of Kazakhstan, Senior Researcher at «PlasmaScience»; e-mail: satbaeva.z@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7161-2686.

Dastan Maratuly Zhasbolatov – Master's student, Graduate School of Science and Technology, Niigata University, Japan; e-mail: dastanzhas01@gmail.com.

Авторлар туралы мәлемет

Нұрлат Ерболұлы Қадырболат* – Шәкәрім университетінің «Жылу энергетикасы» мамандығының студенті, Қазақстан, «Бекіуші технологиялар мен жабындар» инжиниринг орталығының ассистенті; e-mail: ersinnur44@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-9014-4023.

Ринат Хамитулы Курмангалиев – «Техникалық физика» мамандығының докторанты, Бекіуші технологиялар мен жабындар» инжиниринг орталығының жетекші ғылыми қызметкері, Шәкәрім атындағы университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: rinat_real@rambler.ru. ORCID:https://orcid.org/0009-0008-2209-6740.

Ринат Кенжеевич Қусаинов – «Бекітуші технологиялар мен жабындар» инженерлік орталығының жетекшісі, Семей қаласы, Қазақстан; e-mail: rinat.k.kus@mail.ru. ORCID:https://orcid.org/0000-0001-5166-4761.

Зарина Аскарбековна Сатбаева – PhD, Шәкәрім университеті, Республика Казахстан, ЖШС «PlasmaScience» ЖШС ұжымдық қолданыстағы аға ғылыми қызметкер; e-mail: satbaeva.z@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7161-2686.

Дастан Маратұлы Жасболатов – «Ғылым және технологиялар жоғары мектебі» факультетінің магистранты Ниигата университеті, Жапония; e-mail: dastanzhas01@gmail.com.

Сведения об авторах

Нұрлат Ерболұлы Қадырболат* – студент специальности «Теплоэнергетика», Шәкәрім Университет, Казахстан, ассистент ИЦ «Упрочняющие технологии и покрытия»; e-mail: ersinnur44@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5166-4761.

Ринат Хамитулы Курмангалиев – докторант специальности «Техническая физика», Шәкәрім Университет, Республика Казахстан; ведущий научный сотрудник ИЦ «Упрочняющие технологии и покрытия»; e-mail: rinat_real@rambler.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-2209-6740.

Ринат Кенжеевич Кусаинов – руководитель Инжинирингового центра «Упрочняющие технологий и покрытия», г. Семей, Казахстан; e-mail: rinat.k.kus@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5166-4761.

Зарина Аскарбековна Сатбаева – PhD, Science professor кафедры «Техническая физика и теплоэнергетика», Шәкәрім Университет, Республика Казахстан, старший научный сотрудник ТОО «PlasmaScience»; e-mail: satbaeva.z@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7161-2686.

Дастан Маратұлы Жасболатов – магистрант факультета «Высшая школа науки и технологий», Ниигатский университет, Япония; e-mail: dastanzhas01@gmail.com.

Received 27.01.2026
Revised 29.02.2026
Accepted 02.03.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-28

IRSTI: 55.24.29

BY 4.0
Check for updates

Ye. Shayakhmetov[1], R. Sovetbayev[1], K. Ozhmegov[2], A. Bilyalov[1]*, A. Nurbekov[1]
[1]Shakarim University,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинки к-сі, 20 А
[2]Technical University Czestochowa,
J.H. Dąbrowskiego Street 69, 42-201 Częstochowa, Poland
*e-mail: Altshok@bk.ru

EFFICIENCY OF USING POLYMER CONVEYOR ROLLERS AND COMPARATIVE ANALYSIS OF THEIR MANUFACTURING TECHNOLOGIES

Abstract: *This paper presents an extended comparative analysis of the traditional injection molding technology and additive 3D printing technology in the production of polymer rollers for belt conveyors of various applications. The technological features of the processes, their production limitations, economic feasibility, and areas of rational application in mass and small-batch manufacturing are considered.*

The mass and dimensional characteristics of the rollers were calculated, and the reduction in metal consumption compared with conventional steel analogues was evaluated. The influence of reducing the mass of rotating components on the dynamic parameters of the system, including starting loads, operating modes, and overall energy consumption of the conveyor line, was analyzed.

It is shown that the use of modern polymer materials allows reducing the roller mass by more than two times without deterioration of operational characteristics. This contributes to improved energy efficiency, reduced wear of drive units, and increased service life of the equipment.

Criteria for selecting the manufacturing technology depending on production volume, strength requirements, and operating conditions are determined.

Key words: *conveyor roller, 3D printing, polymer materials, idler rollers, additive manufacturing, energy efficiency, material consumption*

Introduction. Belt conveyors are the main transport equipment used in mining, construction, and cement industries. A significant portion of the conveyor mass and energy consumption is associated with idler supports. The mass of rotating elements directly affects starting loads, dynamic operating modes, and drive power consumption.

Traditionally, rollers are manufactured from steel. However, the development of high-strength polymer materials (HDPE, UHMW-PE) enables replacement of metal components while maintaining operational performance. An additional interest lies in selecting a rational manufacturing technology – injection molding or additive manufacturing.

Additive technologies are actively being implemented in almost all industrial sectors and in everyday life. For example, in medicine, 3D-printed elements of the human skeleton – bones, joints, teeth, etc. – are successfully implanted worldwide.

In mechanical engineering, 3D technologies are also used in the development of new products where they are most effective, since they simplify the technological process and optimize costs. The application area of 3D technologies in mechanical engineering is quite wide and includes the following tasks [1-3]: manufacturing prototypes for design validation, conducting technological and other experiments, creating master patterns for casting, rapid production of tooling, and manufacturing mold-forming elements of dies.

For example, if manufacturing a part or its prototype using traditional production methods may take months (development of working drawings, process planning, cutting parameter calculations, blank preparation, machining, and final production), then using 3D technology the time from drawing to a plastic (or metal, depending on printer type) manufacturing time is reduced to several hours. This saves time for design refinement and testing, reduces part weight, and lowers project cost.

The objective of the study is:

– comparative analysis of manufacturing technologies for polymer roller components;

©Ye. Shayakhmetov, R. Sovetbayev, K. Ozhmegov, A. Bilyalov, A. Nurbekov, 2026

– evaluation of mass and metal consumption reduction;
– determination of the potential impact on conveyor energy efficiency.

Materials and Methods This study compares the efficiency of traditional technology and 3D technology for manufacturing a conveyor roller from polymer materials. The development of modern polymer materials makes it possible, without loss of strength, to replace traditional metal parts with their analogues made of polymer materials.

The proposed roller is shown in Figure 1, where the shaft (pos.2), bearing (pos.11) and seal cover (pos.7) are made of metal. The roller was designed for application at JSC “Semey Cement”; purpose – transportation of limestone; main parameters: three-roller belt conveyor; rollers diameter 127 mm, length 315 mm; idler support width 1000 mm; distance between idlers of the upper strand 1.2 m (84 rollers per 100 m).

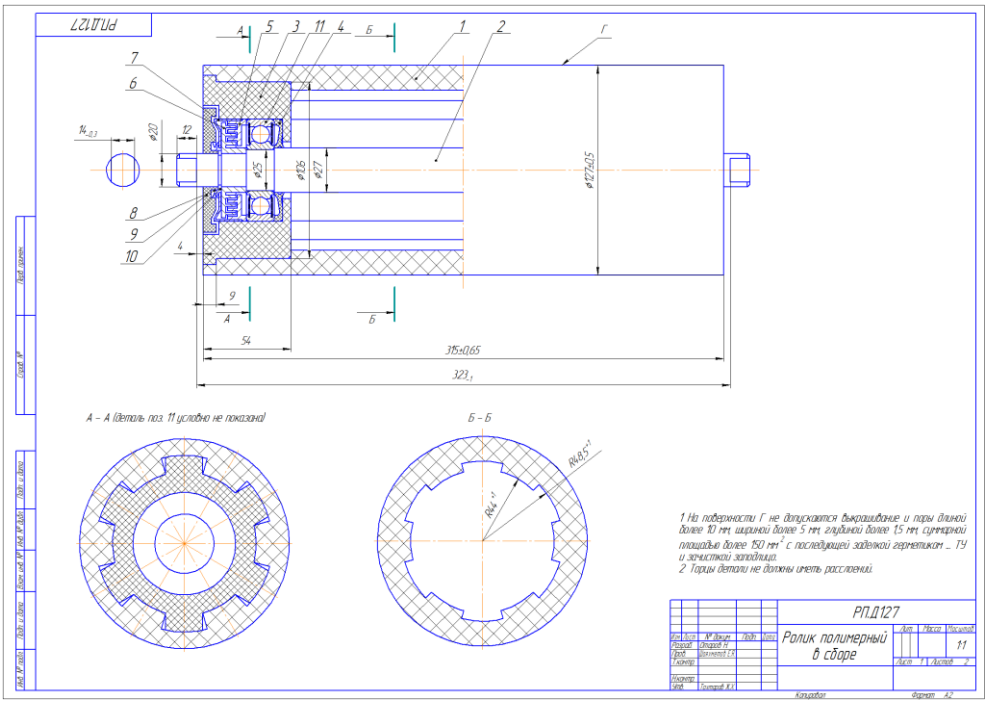


Figure 1 – Roller made of polymer materials in assembly
(1 – roller tube, 2 – shaft, 3 – bearing seat, 4 – protective washer, 5 – inner labyrinth seal, 6 – outer labyrinth seal, 7 – seal cover, 9 – cover, 10 – retaining ring, 11 – bearing 180305)

The feasibility of using polymers in the production of conveyor rollers primarily determined by the load-bearing capacity of the assembly. At the same time the technical-economic parameters of the rollers and of the conveyor itself improve: mass decreases, conveyor energy efficiency increases, durability and reliability of modern polymer materials are comparable with the service life of metal rollers, increased corrosion resistance, resistance to aggressive media, non-sparking behavior. As a result of implementation of modern plastics reduces steel consumption, and due to the production technology of polymer parts the material utilization factor significantly increases [4, 5].

One of the main materials for manufacturing roller parts from polymers in our case is HDPE – High-density polyethylene (HDPE) (Table 1) (substitute material: UHMW-PE (Table 1.1) – ultra-high molecular weight polyethylene).

Strength evaluation of HDPE applicability

Table 1 – Comparative characteristics of materials HDPE (PE-HD) and Steel 3 (St3)

Parameter	HDPE (PE-HD)	Steel 3 (St3)
Material	Thermoplastic (high-density polyethylene)	Carbon structural steel
Density	940-970 kg/m³	~7850 kg/m³
Tensile strength	20-35 MPa	370-510 MPa
Thermal conductivity	~0.4 W/m·K	~45-60 W/m·K
Corrosion resistance	Very high	Low (requires protection)
Chemical resistance	Excellent	Medium / low
Service life	25-50 years	20-50 years (with corrosion protection)

Table 1.1 – Comparative characteristics of materials UHMW-PE and Steel 3 (St3)

Parameter	UHMW-PE	Steel 3 (St3)
Material	Thermoplastic (ultra-high molecular weight polyethylene)	Carbon structural steel
Density	~930-940 kg/m³	~7850 kg/m³
Tensile strength	20-40 MPa	370-510 MPa
Thermal conductivity	~0.4 W/m·K	~45-60 W/m·K
Corrosion resistance	Very high (does not corrode)	Low (requires protection)
Chemical resistance	Excellent	Medium / low
Service life	20-50 years (depends on load and UV exposure)	20-50 years (with corrosion protection)

The choice of material depends on: load (light / medium / heavy), type of transported material (limestone, ore, cement, etc.), operating temperature, belt speed, and environmental conditions (moisture, abrasive, chemicals).

The optimal material in our case for unloaded and medium-loaded rollers (cement, medium-size crushed stone) is UHMW-PE, however, to reduce cost the use of HDPE is possible.

The reduction in strength compared with metal is partially compensated by increasing the thickness of the polymer roller tube and introducing stiffening ribs (Figure 1).

These materials belong to thermoplastic plastics, which occupy a special place among polymer materials. Thermosetting and thermoplastic plastics are materials obtained on the basis of natural and synthetic high-molecular compounds (polymers), which due to their plasticity can change shape under the action of heat and pressure [6].

The most suitable traditional method in our case for producing the parts «roller tube» and «bearing seat» (the largest parts, on the example of which the technology was developed) from thermoplastic plastics is injection molding. Special injection molding machines have been created for this process.

Principle of operation of an injection molding machine: powder or granules of the initial polymer are fed into a hopper and then into a heated working cylinder; in the cylinder melting occurs and the molten polymer is fed under pressure into the mold. Upon cooling, the thermoplastic polymer acquires the shape of the required part [7].

The technological process [7] of injection molding for the parts «roller tube» and «bearing seat». Material of the parts – thermoplastic plastic, high-density polyethylene. Production type: batch production

1. Preparatory stage. At the preparation stage the formulation of the used composition is developed, proportions of materials for the raw mixture are calculated. Properties of the future part strongly depend on the components of the plastic; for each part the composition and mass fractions differ. At this stage dyes are added, and all ingredients of the future raw material are dried and mixed.

2. Equipment setup stage. Injection molding machines are adjusted by the operator; the molding program is entered and molds are installed.

3. Loading stage. The prepared raw material is loaded into the hoppers for the further process.

4. Molding stage. First, the raw material enters the mold through the runner channels and is heated to the temperature required for the process. Then, by direct injection (or under screw action) the heated material under pressure enters the mold and fills it.

5. Completion stage. The plastic that filled the mold cools. The temperature of the material decreases near the mold walls and then throughout the volume. The crystallization process occurs according to the known mechanism. The finished product is removed from the mold and mechanically freed from the elements of the runner system.

6. Final finishing stage. Some parts at this stage require machining for final finishing. In our case machining is required for the «bearing seat» part, where the internal bearing mounting surfaces are machined.

The described stages represent the traditional technological process of injection molding for the parts «roller tube» and «bearing seat»; the process can be easily automated depending on the need and the type of production.

Note: Strict adherence to the technological regime is required, since the shrinkage of the part depends on pressure and temperature.

In the chemical industry, in the production of plastic parts, manufacturing costs are distributed as follows: raw materials on average 60-70% of production cost, fuel and electricity about 10%, depreciation deductions 3-4%, workers' wages from 3 to 20% of product cost depending on the type of production [1].

The main technological parameters of injection molding for high-density polyethylene are presented in Table 2 [8].

Table 2 – Technological parameters of injection molding for high-density polyethylene (High-density polyethylene (HDPE)) HDPE (PE-LD) [8]

<table>
<tr><td colspan="7">Injection pressure and injection speed during molding</td></tr>
<tr><td>Material name</td><td colspan="3">Injection pressure, kg/cm²</td><td colspan="3">Mold filling conditions. Injection speed.</td></tr>
<tr><td>HDPE (PE-LD)</td><td colspan="3">500-1200</td><td colspan="3">The melt has good fluidity. The mold must be filled quickly.</td></tr>
<tr><td colspan="7">Features of thermoplastic molding</td></tr>
<tr><td>HDPE (PE-LD)</td><td colspan="6">Due to relatively high shrinkage of molded products requiring dimensional accuracy, prolonged holding under pressure is applied. Heating occurs mainly due to friction heat. Back pressure: 50-190 bar. Residual material cushion: 2–8 mm depending on dosing stroke and screw diameter.</td></tr>
<tr><td colspan="7">Injection molding temperature regime (Note: The temperature regime should be adjusted according to the specific grade and batch of material.)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Name</td><td rowspan="2">t⁰C</td><td colspan="2">t⁰C</td><td rowspan="2">Residence time in the cylinder, min</td><td colspan="2">t⁰C, Cylinder temperature limit</td></tr>
<tr><td>Nozzle</td><td>Mold</td><td>tмин</td><td>tмах</td></tr>
<tr><td>HDPE (PE-LD)</td><td>200-280</td><td>240-250</td><td>30-80</td><td>-</td><td>-</td><td>400</td></tr>
<tr><td colspan="7">Density and shrinkage of thermoplastics</td></tr>
<tr><td>Name</td><td colspan="3">Density, g/cm³</td><td colspan="3">Shrinkage%</td></tr>
<tr><td>HDPE (ПЭНД)</td><td colspan="3">0,91-0,93</td><td colspan="3">1-4</td></tr>
<tr><td colspan="7">Tooling design features</td></tr>
<tr><td>Name</td><td colspan="6">Design features of the nozzle, runners, and molds</td></tr>
<tr><td>HDPE (PE-LD)</td><td colspan="6">For rapid mold filling, short runners and large cross-section distribution channels should be used. The runner cross-section shape is round trapezoidal. Pin gates with a diameter of 1-1.5 mm and a length not exceeding 2 mm. Good air venting conditions must be provided from the mold cavity. When molding large and flat products, it is advisable to have multiple distribution channels or several pin gates in the mold. The gate location is important. Open nozzle. Vent channel depth not more than 0.02 mm.</td></tr>
</table>

Compared with other plastics, polyethylene is characterized by a higher shrinkage during cooling of parts, which is associated with a higher degree of crystallinity and density. The data presented above characterize the influence on shrinkage difference in both directions of injection temperature, part thickness, pressure value, type and size of gates, uniformity of cooling and other factors. According to Table 1, the shrinkage under these conditions for HDPE (PE-LD) material is 1-4%. Considering the adopted material density of 0.93 g/cm³, for this density we accept shrinkage of 4%, and taking this shrinkage into account we can calculate the mold cavity dimensions of the «roller tube» part (Table 3) and the «bearing seat» part (Table 4).

Table 3 – Dimensions of the «roller tube» part for the mold considering shrinkage

Dimension name	Part dimensions	Dimensions with shrinkage allowance (for mold)
Outer diameter	127	132
Length	315	340
Inner diameter	106	101.8
Inner diameter	88	84.48

Selection of the main technological equipment [9]. The calculation is performed for the «roller tube» part, as having larger dimensions compared to the other roller parts (including the «bearing seat» part).

Table 4 – Dimensions of the “bearing seat” part for the mold considering shrinkage

Name	Part dimensions	Dimensions with shrinkage allowance (for mold)
Outer diameter	106	110
Outer diameter	114	118.5
Outer diameter	87	90.5
Outer diameter*	78	82
Outer length	54	56
Outer length	9	9.4
Inner diameter*	78	74.8
Inner diameter*	62	59.5
Inner diameter	36	34.5

*Note: * – possibility of adjusting the size by machining.*

The calculated value of the injection volume of the injection molding machine is determined by the formula:

$$V = \frac{Gn+G_л}{\rho} \cdot \frac{1}{k} = \frac{1640 \cdot 1+10}{0{,}93} \cdot \frac{1}{0{,}6} = 2946 см^3,$$

where V – calculated injection volume, cm³; G – mass of the product, g; n – number of mold cavities; Gл – mass of the runner system, g; ρ – density, g/cm³; k – coefficient of machine injection power utilization (according to [9] k = 0.5).

Mass of the «roller tube» part: G=Vρ=1764.1× 0.93=1640 g; Mass of the runner system (maximum) G = 10 g.

We select the type of injection molding machine based on the dimensions and design features of the «roller tube» part. From [6], Table V.3 we select machine D 3140-4000, according to Table V.4 suitable for working with high-density polyethylene.

Main technical characteristics of the injection molding machine: nominal injection volume per cycle, cm³ – 4000; nominal hydraulic pressure, MPa – 20; maximum distance between movable and fixed plates, mm – 2120; nominal injection pressure, MPa – 132.

Prototypes of the roller parts (Fig. 1) were created using 3D technologies in the Digital Engineering laboratory of NJSC “Shakarim University” on Creality K1max 3D printers.

The mass was calculated (Table 4). The mass of parts is determined by the known formula through volume and material density m = Vρ, where density of HDPE (high-density polyethylene) ρ = 0.93 g/cm³, density of steel 7.85 g/cm³.

Based on the data in Table 5, a comparative analysis of polymer rollers and traditional rollers can be carried out; all data are summarized in Table 6.

Table 5 – Mass calculation of roller parts with polymer materials

№	Part name	Material	Mass	Total mass	Note
1	Roller tube	HDPE	m=Vρ=1764.19×0.93=1640 g	1640 g	qty – 1 pc
2	Bearing seat	HDPE	m=Vρ=263.1×0.93=244.6 g	489.2 g	qty – 2 pcs
3	Protective washer	HDPE	m=Vρ=6.1×0.93=5.7 g	45.4 g	qty – 2 pcs
4	Inner labyrinth seal	HDPE	m=Vρ=8.7×0.93=8.1 g	16.2 g	qty – 2 pcs
5	Outer labyrinth seal	HDPE	m=Vρ=14.8×0.93=13.8 g	27.6 g	qty – 2 pcs
6	Cover	HDPE	m=Vρ=34.7×0.93=32.3 g	64.6 g	qty – 2 pcs
7	Shaft	Steel 5	m=Vρ=174.1×7.85=1370 g	1370 g	qty – 1 pc
8	Seal cover	Steel 3	m=Vρ=10.9×7.85=85.6 g	171.2 g	qty – 2 pcs
9	Retaining ring	Steel 3	6.2 (GOST)	12.4 g	qty – 2 pcs
10	Bearing 180305	-	144 g (GOST)	288 g	qty – 2 pcs
	Total mass			4124.6 g	

Table 6 shows that the weight of the rotating parts of the metal idler support exceeds the weight of the idler support with polymer rollers by more than 2 times (24.9/11.7 = 2.12). Also, under the accepted conditions, for 100 meters of conveyor we obtain a difference of (2091.6 − 982.8 = 1108.2 kg) 1108.2 kg. Thus, for every 100 meters of conveyor its mass decreases by almost one ton, which in the case of multi-kilometer conveyors provides significant material savings and, of course, increases the energy efficiency of the conveyor itself, results in significant energy savings.

Table 6 – Comparative table of efficiency and main parameters of a metal roller and a conveyor roller with polymer parts

№	Parameter	Traditional roller with metal roller tube	Roller with polymer parts	Note
1	Roller service life, year	0.4 [10]	1.0 [10]	
2	Roller weight, kg	8.3 [11]	4.2 (Table 4)	
3	Mass of rotating parts of idler support, kg	24.9 [11]	11.7	Size 1, GOST 22646-77
4.1	Required material amount per idler support – plastics, kg	0.1	6.18	
4.2	Required material amount per idler support – metal, kg	24.8	5.52	
5	Weight of idler supports per 100 m of conveyor (≈ 84 idlers per 100 m)	2091.6 kg	982.8 kg	

Conclusion

1. The use of polymer materials makes it possible to reduce the roller mass by 53%.

2. When the mass is reduced by 2 times, the moment of inertia also decreases proportionally, which leads to: reduction of starting currents, decrease of dynamic loads, reduction of energy consumption during acceleration.

3. For every 100 m of conveyor, a reduction in metal consumption of 1108 kg is achieved.

4. Polymer rollers are advisable to use in unloaded and medium-loaded sections.

5. Comparative analysis of traditional technologies for manufacturing polymer roller parts and 3D printing technologies showed that the efficiency of a particular method strongly depends on the type of production. Thus, for mass large-scale and serial production the most advantageous method is manufacturing polymer parts by injection molding. The application of 3D printing is significantly limited by the printing speed; therefore, its use for producing such parts is currently limited to single-piece and small-batch production.

References

1. Ma J. The Application of 3D Printing in Mechanical Manufacturing / J. Ma // Applied and Computational Engineering. – 2025. – № 117. – P. 44-50. https://doi.org/10.54254/2755-2721/2025.20112.

2. Baigarina A. Construction 3D printing: a critical review and future research directions / A. Baigarina, E. Shehab, M.H. Ali // Progress in Additive Manufacturing. – 2023. – № 8(6). – P. 1393-1421. https://doi.org/10.1007/s40964-023-00409-8.

3. Recent Advances in Additive Manufacturing: A Review of Current Developments and Future Directions / L. Ben Said et al // Machines. – 2025. – № 13. – P. 813. https://doi.org/10.3390/machines13090813.

4. Experimental Study on Mechanical Performance and Blast Resistance of Aramid, Carbon, and UHMWPE Fabrics / J. Xie et al // Polymers. – 2026. – № 18. – P. 612. https://doi.org/10.3390/polym18050612.

5. Mechanical and tribological properties of FDM-printed polyamide / Chengshuo Wang et al // Tribology International. – 2024. – Vol. 191. – P. 109198. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.109198.

6. Thermoset and Thermoplastic Polymers / A. Bırca et al // Materials for Biomedical Engineering: Thermoset and Thermoplastic Polymers. – 2019. – P. 1-28. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816874-5.00001-3.

7. Bychkova E.V. Processes for Manufacturing Polymer and Composite Products by Pressing and Injection Molding: Textbook for Bachelor Students / E.V. Bychkova, N.V. Borisova, L.G. Panova, Moscow: IPR Media, 2021.

8. Osarenmwinda J.O. Optimization of Injection Moulding Process Parameters in the Moulding of High Density Polyethylene / J.O. Osarenmwinda, D.D. Olodu // Journal of Applied Sciences and Environmental Management. – 2018. – № 22(2). – P. 203-206. https://doi.org/10.4314/jasem.v22i2.8.

9. Olenev B.A. Design of Plastic Processing Plants / B.A. Olenev, E.M. Mordkovich, V.F. Kaloshin, Moscow: Khimiya, 1982. – 256 p.
10. Demurin A.S. Influence of contact stresses on the durability of viscoelastic idler supports. In: Quality Management: Research Problems and Experience / A.S. Demurin // Saint Petersburg: St. Petersburg Engineering and Economic University Publishing House. – 2002. – Issue 2. – P. 180-187.
11. Manual for Conveyor Transport Design: Belt Conveyors (for SNiP 2.05.07-85). – Moscow: Stroyizdat, 1988.

Е.Я. Шаяхметов[1], Р.А. Советбаев[1], К. Ожмегов[2], А.К. Билялов[1]*, А.Н. Нурбеков[1]
[1]Шәкәрім Университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул Глинки, 20 А
[2]Ченстоховский политехнический университет ,
J.H. Dąbrowskiego Street 69, 42-201 Częstochowa, Польша
*e-mail: Altshok@bk.ru

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОНВЕЙЕРНЫХ РОЛИКОВ И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

В статье представлен расширенный сравнительный анализ традиционной технологии литья под давлением и аддитивной технологии 3D-печати при производстве полимерных роликов для ленточных конвейеров различного назначения. Рассмотрены технологические особенности процессов, их производственные ограничения, экономическая целесообразность и области рационального применения в массовом и мелкосерийном производстве.

Рассчитаны массогабаритные характеристики роликов и проведена оценка снижения металлоёмкости по сравнению с традиционными стальными аналогами. Проанализировано влияние уменьшения массы вращающихся элементов на динамические параметры системы, включая пусковые нагрузки, режимы работы и общее энергопотребление конвейерной линии.

Показано, что использование современных полимерных материалов позволяет снизить массу ролика более чем в два раза без ухудшения эксплуатационных характеристик. Это способствует повышению энергоэффективности, снижению износа приводных узлов и увеличению срока службы оборудования.

Определены критерии выбора технологии изготовления в зависимости от объёма производства, требований к прочности и условий эксплуатации.

Ключевые слова: *ролик конвейера, 3D печать, полимерные материалы, роликоопоры, аддитивные технологии, энергоэффективность, металлоемкость.*

Е.Я. Шаяхметов[1], Р.А. Советбаев[1], К. Ожмегов[2], А.К. Билялов[1]*, А.Н. Нурбеков[1]
Шәкәрім университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинки к-сі, 20 А
[2]Ченстохов политехникалық университеті,
J.H. Dąbrowskiego Street 69, 42-201 Częstochowa, Poland
*e-mail: Altshok@bk.ru

ПОЛИМЕРЛІК КОНВЕЙЕР РОЛИКТЕРІН ҚОЛДАНУ ТИІМДІЛІГІ ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ДАЙЫНДАУ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН САЛЫСТЫРМАЛЫ ТАЛДАУ

Мақалада әртүрлі мақсаттағы таспалы конвейерлерге арналған полимерлік роликтерді өндіруде дәстүрлі қысыммен құю технологиясы мен аддитивті 3D-басып шығару технологиясының кеңейтілген салыстырмалы талдауы ұсынылған. Процестердің технологиялық ерекшеліктері, олардың өндірістік шектеулері, экономикалық тиімділігі және жаппай және шағын сериялы өндірісте ұтымды қолдану салалары қарастырылған.

Роликтердің массалық-габариттік сипаттамалары есептеліп, дәстүрлі болат аналогтарымен салыстырғанда металсыйымдылықтың төмендеуі бағаланды. Айналмалы элементтердің массасын азайтудың жүйенің динамикалық параметрлеріне, соның ішінде іске қосу жүктемелеріне, жұмыс режимдеріне және конвейер желісінің жалпы энергия тұтынуына әсері талданды.

Заманауи полимерлік материалдарды қолдану ролик массасын пайдалану сипаттамаларын төмендетпей екі еседен астам азайтуға мүмкіндік беретіні көрсетілді. Бұл энергия тиімділігін арттыруға, жетек тораптарының тозуын азайтуға және жабдықтың қызмет ету мерзімін ұлғайтуға ықпал етеді.

Өндіріс көлеміне, беріктік талаптарына және пайдалану жағдайларына байланысты дайындау технологиясын таңдау критерийлері айқындалды.

Түйін сөздер: *конвейер ролигі, 3D-басып шығару, полимерлік материалдар, роликті тіректер, аддитивті технологиялар, энергия тиімділігі, металсыйымдылық.*

Авторлар туралы мәліметтер

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.

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.

Кирилл Ожмегов – PhD, Өндірісті басқару кафедрасы, Ченстохов политехникалық университеті, Польша; e-mail: kvozhmegov@wp.pl. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7103-2945.

Альтаир Канатович Билялов* – магистрант ББББ 7М07104 – Машина жасау, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: Altshok@bk.ru.

Аслан Нурбекович Нурбеков – бакалавр ББББ 6В07108 – Машина жасаудағы цифрлік технологиялар, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: aslannurbekov2@gmail.com.

Сведения об авторах

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.

Раил Аянович Советбаев – PhD, преподаватель кафедры «Автоматизация и информационные технологии», Шәкәрім университет, Республики Казахстан; e-mail: rsovetbayev@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-3605-515X.

Кирилл Ожмегов – PhD, кафедра производственного менеджмента, Ченстоховский политехнический университет, Польша; e-mail: kvozhmegov@wp.pl. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7103-2945.

Альтаир Канатович Билялов* – магистрант ОП 7М07104 – «Машиностроение», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: Altshok@bk.ru.

Аслан Нурбекович Нурбеков – бакалавр ОП 6В07108 – Цифровые технологии в машиностроении, Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: aslannurbekov2@gmail.com.

Information about the authors

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.

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.

Kirill Ozhmegov – PhD, Department of Production Management, Technical University Czestochowa, Poland; e-mail: kvozhmegov@wp.pl. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7103-2945.

Altair Bilyalov* – Master's Student of the Educational Program 7M07104 – «Mechanical Engineering», Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: Altshok@bk.ru.

Aslan Nurbekovich Nurbekov – Bachelor of the Educational Program 6B07108 – Digital Technologies in Mechanical Engineering, Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: aslannurbekov2@gmail.com.

Received 03.02.2026
Revised 02.03.2026
Accepted 10.03.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-29

МРНТИ: 55.09.35

BY 4.0
Check for updates

Д.А. Әскержанов[1,2*], Р.К. Кусаинов[1,2], В.Н. Коц[1], К.Д. Орманбеков[1], А.Б. Шынарбек[1]
[1]Шәкәрім университет, Инжиниринговый центр,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А
[2]Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А
*e-mail: dumanaskerzhanov541@gmail.com

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО КИСЛОРОДНО-ТОПЛИВНОГО НАПЫЛЕНИЯ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ

Аннотация: *В работе представлено комплексное исследование процесса формирования износостойких металлокерамических покрытий системы WC-Co, полученных методом высокоскоростного кислородно-топливного напыления (HVOF). Актуальность данного исследования обусловлена необходимостью разработки эффективных методов восстановления и упрочнения деталей специальной техники, эксплуатируемых в экстремальных условиях. В качестве материала подложки использовалась сталь 12Х18Н10Т. Основное внимание уделено влиянию дистанции напыления (300 мм-400 мм) на физико-механические свойства слоев. С использованием методов XRD, SEM детально изучены микроструктура и фазовые превращения исследуемого покрытия. Установлено, что оптимизация параметров HVOF-процесса позволяет уменьшить уровень декарбидизацию WC до W_2C, сохраняя высокую концентрацию первичных твердых фаз в кобальтовой матрице. Экспериментально доказано, что сформированные покрытия обладают сверхплотной структурой с пористостью менее 1%. Результаты трибологических испытаний и электрохимической коррозии подтвердили высокое качество разработанных покрытий: микротвёрдость возросла в 7 раз, а скорость коррозии снизилась на порядок. Полученные данные расширяют научные представления о механизмах адгезионного и когезионного взаимодействия в композитах WC-Co и предлагают готовое технологическое решение для повышения ресурса узлов военной техники.*

Ключевые слова: *HVOF, WC-Co покрытия, микроструктура, износостойкость, коррозионная стойкость, упрочнение деталей, военная техника.*

Введение

Детали военной техники – такие как шестерни, валы, поршни, направляющие втулки, элементы ствольных систем и гидроузлов – работают при высоких механических, термических и вибрационных нагрузках. Их износ, эрозия и коррозионное разрушение снижают надежность и ресурс техники. Традиционные методы восстановления, включая наплавку и гальваническое хромирование, часто сопровождаются дефектами, трещинами и внутренними напряжениями, а также экологическими ограничениями [1]. В этих условиях технология HVOF является современным решением, обеспечивающим формирование плотных, адгезионно прочных и износостойких покрытий без значительного перегрева подложки [2, 3].

Метод HVOF основан на сгорании топлива (керосин, пропан, водород) с кислородом в камере высокого давления, в результате чего образуется, струя газов со скоростью более 800-1200 м/с. Порошок, подаваемый в струю, нагревается и ускоряется, после чего осаждается на подложку, формируя слой с ламеллярной структурой (splat-based structure). Высокая кинетическая энергия частиц при относительно низкой температуре плавления обеспечивает минимальную пористость (<1-2%), высокую плотность и прочную адгезию покрытия [4, 5].

Наиболее широко для задач упрочнения применяются металлокерамические системы WC-Co, объединяющие твердость карбида вольфрама (до 2000-2200 HV) и вязкость металлической матрицы кобальта. Карбидная фаза обеспечивает высокую износостойкость и сопротивление микрорезанию, тогда как кобальтовая связка повышает ударную вязкость и

©Д.А. Әскержанов, Р.К. Кусаинов, В.Н. Коц, К.Д. Орманбеков, А.Б. Шынарбек, 2026

стойкость к растрескиванию [6, 7]. В результате покрытия WC-Co характеризуются отличным сочетанием твердости, сцепления и устойчивости к усталостным нагрузкам.

Исследования последних лет подтверждают эффективность HVOF-покрытий WC-Co для защиты и восстановления деталей военной и авиационной техники. Так, по данным Zhao et al. (2023), применение HVOF WC-Co позволило успешно заменить традиционное хромирование штоков гидроцилиндров, обеспечив повышение износостойкости в 2-3 раза и снижение трения на 30 % [8]. Аналогичные результаты показали испытания на поршнях и валах – покрытие сохраняло целостность после 10^6 циклов при контактных давлениях до 400 МПа [9].

В обзоре Bolelli и Lusvarghi (2021) подчеркивается, что HVOF-покрытия WC-Co имеют минимальную пористость, высокую адгезию (60-90 МПа) и микротвердость порядка 1200-1500 HV, что делает их эффективными для восстановления деталей, работающих при абразивно-эрозионном износе [10]. Sun et al. (2022) показали, что уменьшение расстояния между факелом и подложкой с 400 мм до 300 мм способствует уплотнению микроструктуры, уменьшению пористости до 0,8% и увеличению адгезии на 15% [11].

Однако чрезмерное повышение температуры газа может привести к частичной декарбидизации WC, образованию фаз W_2C и WO_3, что ухудшает микротвердость и коррозионную стойкость [12]. Поэтому одной из ключевых задач разработки технологии является оптимизация параметров напыления – скорости подачи порошка, соотношения кислород/топливо, расстояния до подложки и температуры потока, чтобы достичь стабильной структуры и минимального окисления.

Покрытия WC-Co демонстрируют не только высокую износостойкость, но и коррозионную стойкость в агрессивных средах (NaCl, морская вода, сульфатные растворы), что делает их особенно перспективными для применения в деталях, контактирующих с влагой и морским воздухом [13]. Xu et al. (2024) показали, что в условиях морской атмосферы HVOF WC-Co покрытия сохраняют плотность структуры и коррозионную стойкость в течение 1000 ч испытаний, тогда как незащищенные образцы проявляли питтинговую коррозию уже через 72 ч [14].

С технологической точки зрения, HVOF-процесс удобен и для восстановления изношенных деталей, и для первичного упрочнения новых элементов. При восстановлении слой наносится для восполнения износа и восстановления геометрии, после чего покрытие служит защитным функциональным слоем. При упрочнении новых деталей метод позволяет создать прочный барьер против износа, эрозии и коррозии [15]. Таким образом, технология сочетает ремонтный и предупредительный подходы, что особенно ценно для военной техники, где требуется сочетание надежности и ремонтопригодности.

Методы исследования

Для выполнения данной задачи использовался порошок WC-Co с размером частиц 0-20 мкм. Покрытия наносились на квадратные образцы из нержавеющей стали 12Х18Н10Т размером 5×5 мм и толщиной 4 мм. Поверхность образцов перед напылением шлифовали наждачной бумагой с зернистостью Р600 и подвергали пескоструйной обработке сжатым воздухом с абразивными частицами для формирования требуемой шероховатости. Далее проводили серию напылений при разных расстояниях от сопла – 300, 350 и 400 мм, продолжительность каждого напыления составляла 15 с. Остальные параметры оставались неизменными: напряжение 25 В, подача порошка 6 л/мин. Покрытия получали на установке SX-5000 (рис. 1), работающей по технологии HVOF. Высокоскоростной поток горячих газов, образующийся при сгорании пропана с кислородом, обеспечивал нагрев, ускорение и осаждение порошковых частиц, что приводило к формированию плотного адгезионно прочного покрытия.



Рисунок 1 – SX-5000 для получения покрытия методом HVOF

Фазовый состав покрытий определяли методом рентгеноструктурного анализа (РСА) на дифрактометре X'Pert PRO (PANalytical, Нидерланды) с использованием излучения Cu Kα (λ = 1,5406 Å). Съемку осуществляли в диапазоне углов 2θ = 20-90°, с шагом 0,02° и временем накопления 0,5 с на шаг. Обработка полученных дифрактограмм и идентификация фаз выполнялись с помощью программного обеспечения HighScore Plus.

Параметры микрогеометрии поверхности (шероховатость) определяли на профилометре Anytester HY2300. Микротвердость покрытий по Виккерсу измеряли на поперечных шлифах с использованием микротвердомера HLV-1DT (Vickers) при нагрузке 2 Н и времени выдержки под нагрузкой 10 с.

Трибологические характеристики исследовали на трибометре Anton Paar TRB3 в режиме «шар-по-плоскости». В качестве контртела использовался стальной шар диаметром 3 мм, изготовленный из стали 100Х6 (аналог WX15). Образец располагали так, чтобы поверхность покрытия была перпендикулярна траектории движения шара. Радиус кривизны и глубина износа контролировались датчиком смещения, а коэффициент трения регистрировался во времени с помощью датчика компенсации трения. Испытания проводились на воздухе при нагрузке 10 Н, скорости скольжения 5 см/с, длине пути трения 100 мм и радиусе кривизны 1,5 мм.

Коррозионные испытания выполняли методом потенциодинамической поляризации с использованием потенциостата-гальваностата CS300M (Corrtest Instruments, Ухань, Китай) в стандартной трехэлектродной ячейке CS936 с плоским коррозионным элементом. Рабочим электродом служил образец покрытия с открытой площадью 1 см²; в качестве сравнения использовался насыщенный электрод Ag/AgCl, а в качестве противоэлектрода – платиновая сетка. Испытания проводили в 3,5% водном растворе NaCl при температуре (25 ± 1)°C после стабилизации потенциала открытой цепи в течение 30 минут.

Результаты и обсуждение

Рентгеновские дифрактограммы покрытий WC-Co, полученных методом высокоскоростного кислородно-топливного напыления (HVOF) при различных расстояниях от сопла до подложки – 300, 350 и 400 мм, представлены на рисунке 2. Во всех трех случаях на дифрактограммах отчетливо фиксируются пики, соответствующие основной фазе WC (гексагональная, пространственная группа P6m2). Наиболее интенсивные рефлексы наблюдаются при углах 2θ ≈ 31,6°, 35,7°, 48,4°, 64,0°, 73,2° и 75,8°.

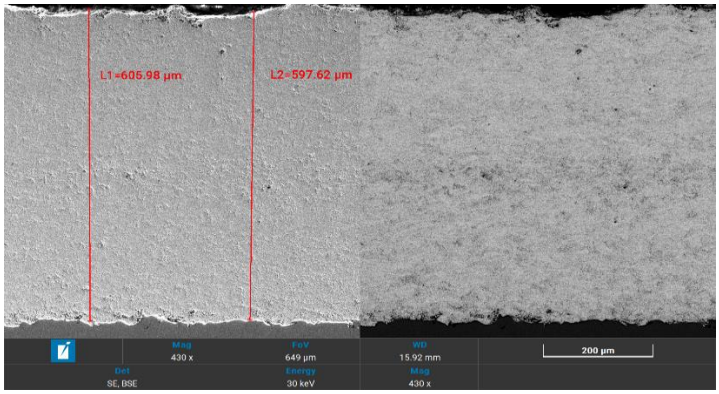


Рисунок 2 – СЭМ изображение структуре покрытия образца 400 мм

Помимо основной WC-фазы, на дифрактограммах всех образцов также присутствуют пики фазы W_2C, регистрируемые при 2θ ≈ 39,7° и 74°, что свидетельствует о частичной декарбидизации WC в процессе напыления. Данный процесс связан с высокотемпературным воздействием газового потока и частичным взаимодействием WC с кислородом, при котором происходит потеря углерода и образование подстехиометрического карбида W_2C по реакции:

$$2WC \rightarrow W2C + C$$

Появление W_2C фазы наблюдается во всех покрытиях, однако ее интенсивность возрастает при увеличении расстояния напыления от 300 до 400 мм. Это можно объяснить тем, что при больших расстояниях частицы дольше находятся в окислительной среде плазменного факела и подвергаются частичному перегреву и декарбидизации, несмотря на снижение их кинетической энергии [1, 10, 17].

Кроме того, на дифрактограммах покрытия, полученного при расстоянии 400 мм, фиксируются слабые пики, соответствующие металлическим фазам W (кубическая структура) и Co (гексагональная структура). Их присутствие указывает на частичное разложение карбидной фазы и кристаллизацию связующего кобальта. Это подтверждает, что при увеличении расстояния между соплом и подложкой возрастает степень декарбидизации, что приводит к формированию W и Co-богатых областей в матрице покрытия.

Отмечается также изменение относительной интенсивности пиков WC при увеличении расстояния напыления: с 300 до 400 мм наблюдается уменьшение интенсивности пиков WC и увеличение интенсивности пиков W_2C и W, что подтверждает рост степени термической деградации карбидной фазы [6]. Это связано с тем, что увеличение расстояния приводит к изменению температурно-кинетического баланса потока: частицы WC подвергаются длительному воздействию окислительной атмосферы, при этом происходит частичное испарение углерода и образование оксидов в поверхностных слоях частиц.

Согласно результатам, Sun et al. (2022), подобное перераспределение фаз может существенно влиять на механические характеристики: при увеличении доли W_2C и W твердость покрытия снижается, поскольку эти фазы имеют меньшую твердость (~2200 HV и ~350 HV соответственно) по сравнению с WC (~2800 HV) [18]. Таким образом, наблюдаемые фазовые изменения объясняют последующее снижение микротвердости и износостойкости, особенно для покрытия, полученного при 400 мм.

Покрытия WC-Co, полученные методом высокоскоростного кислородно-топливного напыления (HVOF) при различных расстояниях от сопла до подложки – 300, 350 и 400 мм, были исследованы с точки зрения параметров шероховатости поверхности. Измерения шероховатости проводились с использованием профилометра Anytester HY2300.

Установлено, что при расстоянии напыления 300 мм среднее значение параметра Ra составляет 3,54 мкм, а параметра Rz – 18,59 мкм. При увеличении расстояния напыления до 350 мм наблюдается снижение шероховатости поверхности: значения Ra и Rz уменьшаются до 3,29 мкм и 18,20 мкм соответственно, что указывает на наиболее благоприятные условия формирования покрытия.

Дальнейшее увеличение расстояния напыления до 400 мм приводит к заметному росту шероховатости поверхности. В этом случае значение параметра Ra возрастает до 3,94 мкм, а параметр Rz – до 20,53 мкм. Увеличение шероховатости при большем расстоянии напыления связано с частичным охлаждением частиц порошка WC-Co в газовом потоке и снижением их кинетической и тепловой энергии. В результате уменьшается степень пластической деформации частиц при ударе о подложку, что приводит к формированию менее плотной и более грубой микроструктуры покрытия с увеличенным числом неровностей и микропор [19, 20].

Результаты измерения микротвердости покрытий WC-Co, полученных методом HVOF при различных расстояниях распыления (300, 350 и 400 мм), представлены на рисунке 3а. Для сравнения исходная подложка из стали 12Х18Н10Т имела микротвердость около 170 HV, что соответствует значению аустенитных нержавеющих сталей. После нанесения покрытия наблюдается значительное повышение твердости – до 1197 HV при 300 мм, 1003 HV при 350 мм и 862 HV при 400 мм. Таким образом, прочность покрытий превышает показатель подложки более чем в 6-7 раз, что подтверждает формирование плотной карбидной структуры с высокой степенью адгезии и сплошностью.

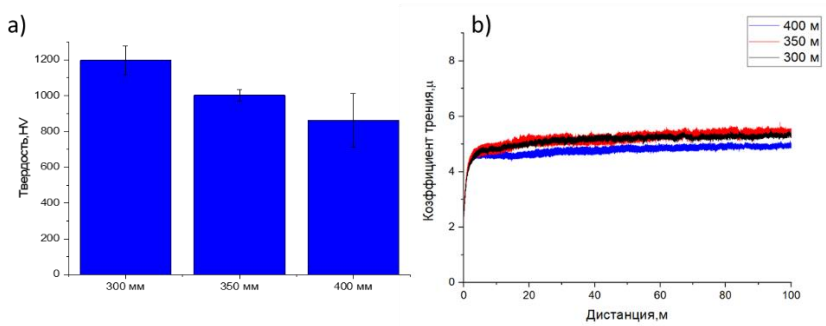


Рисунок 3 – Результаты механических и трибологических испытаний стали марки 45 и полученных покрытий: а) твердость б) коэффициент трения

Максимальное значение твердости при 300 мм объясняется тем, что при меньшем расстоянии частицы порошка WC-Co достигают поверхности подложки с высокой кинетической энергией и в полу- или полностью расплавленном состоянии. Это способствует интенсивному сплющиванию частиц и формированию плотной ламеллярной структуры с минимальной пористостью и высоким содержанием WC-фазы. При увеличении расстояния до 350 и 400 мм наблюдается постепенное снижение твердости, обусловленное частичной декарбидизацией $WC \rightarrow W_2C$ и образованием металлической связки Co/W, что согласуется с данными рентгенофазового анализа. Увеличение расстояния сопровождается также уменьшением тепловой и кинетической энергии частиц, что ухудшает степень спекания и снижает общую плотность покрытия.

На рисунке 3б представлены результаты трибологических испытаний покрытий WC-Co при различных расстояниях напыления. Из графика зависимости коэффициента трения от дистанции скольжения (до 100 м) видно, что значения коэффициента трения составляют μ = 0,513 (300 мм), μ = 0,520 (350 мм) и μ = 0,477 (400 мм). После короткой стадии приработки (до 10 м) коэффициент трения стабилизируется, формируя устойчивое плато для всех образцов.

Несмотря на то что при 400 мм наблюдается несколько меньшее значение μ, это не свидетельствует о лучшем качестве покрытия. Более низкий коэффициент трения в данном случае обусловлен не повышением плотности, а наличием поверхностных пор и слабосвязанных частиц, что способствует образованию вторичных трибопленок и снижает реальную площадь контакта [21]. Покрытие, полученное при 300-350 мм, демонстрирует более стабильное и предсказуемое трение, что связано с оптимальным сочетанием твердости и когезионной прочности.

Полученные результаты хорошо коррелируют с литературными данными, согласно которым для WC-Co покрытий, полученных методом HVOF, диапазон коэффициента трения составляет 0,45-0,55 в условиях сухого скольжения против стали, и сильно зависит от микроструктуры и содержания WC-фазы [22]. Более высокая твердость покрытия при 300 мм обусловливает устойчивое сопротивление пластической деформации и, как следствие, более равномерное распределение износа.

Коррозионная стойкость покрытий WC-Co, полученных методом высокоскоростного кислородно-топливного напыления (HVOF), была исследована методом потенциодинамической поляризации в 3,5 % растворе NaCl. Основные параметры, включая плотность коррозионного тока (I_k), коррозионный потенциал (E_k) и скорость коррозии, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчета коррозионных параметров образцов

Образец	I_k, мкА/см²	E_k, В	Скорость коррозии, мм/год
300 мм	2.58×10^{-5}	– 0.077	0.303
350 мм	3.45×10^{-5}	– 0.208	0.405
400 мм	6.90×10^{-5}	– 0.191	0.809

Как видно из результатов, покрытия, полученные при расстоянии 300 мм, обладают наилучшей коррозионной стойкостью – минимальной плотностью коррозионного тока (2.6×10^{-5} мкА/см²) и наиболее положительным потенциалом (– 0.077 В). Это свидетельствует о плотной и однородной микроструктуре покрытия, характеризующейся минимальным числом пор и микротрещин, что затрудняет диффузию электролита к поверхности подложки. При увеличении расстояния до 350 и 400 мм плотность коррозионного тока возрастает более чем в 2,5 раза, а скорость коррозии увеличивается с 0.30 до 0.81 мм/год, что связано с ростом пористости и ухудшением связности слоев покрытия.

Такая зависимость объясняется тем, что при увеличении расстояния от сопла до подложки снижается температура и скорость частиц, что приводит к неполной пластической деформации и частичному окислению WC-частиц в процессе напыления. В результате в покрытии формируются микропоры и границы слабого сцепления, через которые агрессивные ионы Cl^- и H^+ могут проникать вглубь структуры, ускоряя процессы электрохимической деградации [23].

Согласно исследованиям, Guo et al. (2024) и Zhao et al. (2023), коррозионное поведение WC-Co покрытий определяется сочетанием трех факторов:

(1) плотностью и пористостью структуры;

(2) содержанием оксидных фаз (WO_3, CoO);

(3) распределением связующего кобальта, склонного к локальной анодной коррозии [16,24].

При увеличении расстояния напыления концентрация этих оксидов возрастает вследствие более длительного пребывания частиц в окислительной среде, что способствует формированию гальванических микропар WC/Co-оксиды и ускоряет растворение связующего.

На рисунке 2 представлено СЭМ-изображение поперечного сечения покрытия WC-Co, сформированного методом высокоскоростного кислородно-топливного напыления (HVOF) при расстоянии от сопла до подложки 400 мм. Покрытие характеризуется слоистой ламеллярной структурой, однако в его объеме наблюдается повышенное количество микропор и межламеллярных зазоров, что указывает на снижение плотности по сравнению с покрытиями, полученными при меньших расстояниях напыления. Средняя толщина покрытия составляет порядка 590-600 мкм, что свидетельствует о стабильности процесса напыления. Вместе с тем увеличение расстояния напыления приводит к снижению степени пластической деформации частиц WC-Co при их ударе о подложку. Это связано с частичным охлаждением частиц в газовом потоке и уменьшением их кинетической и тепловой энергии, в результате чего формируется менее плотная микроструктура с повышенной шероховатостью поверхности.

Наличие микропор и зон ослабленного сцепления, выявленных на СЭМ-изображении, хорошо согласуется с результатами коррозионных и механических испытаний. Для покрытия, полученного при 400 мм, зафиксированы повышенная плотность коррозионного тока и максимальная скорость коррозии, а также снижение микротвердости до 862 HV, что обусловлено ростом пористости и частичной термической деградацией WC-фазы. Данные особенности структуры также объясняют менее стабильное трибологическое поведение покрытия и формирование вторичных трибопленок в процессе сухого скольжения. Более положительные значения E_k и меньшие значения I_k для образцов, полученных при 300 мм, указывают на наличие пассивного состояния поверхности – образование тонкой защитной оксидной пленки, которая тормозит анодные процессы растворения. При больших расстояниях структура покрытия становится менее плотной, пленка разрушается неравномерно.

Заключение

В ходе исследования разработана оптимальная технология получения металлокерамических покрытий WC-Co методом высокоскоростного кислородно-топливного напыления (HVOF) для восстановления и упрочнения деталей военной техники. Анализ микроструктуры, выполненный методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), показал, что при расстоянии напыления 350 мм формируется наиболее плотная и равномерная ламеллярная структура покрытия с минимальным количеством межламеллярных зазоров и микропор. Значение пористости в этом случае составило 0,18 ± 0,03%, тогда как при увеличении расстояния до 400 мм наблюдался рост пористости до 0,41 ± 0,05 %, что связано с неполной пластической деформацией частиц и ухудшением связности слоёв покрытия. Рентгенофазовый анализ выявил сохранение основной карбидной фазы WC с частичным присутствием фазы W_2C, что обусловлено процессами декарбюризации при повышенной температуре и длительном пребывании частиц в высокотемпературном потоке. СЭМ-изображения поперечного сечения покрытий дополнительно подтвердили увеличение числа микропор и зон ослабленного сцепления при расстоянии напыления 400 мм, что согласуется с результатами фазового анализа.

Средняя микротвёрдость покрытий, полученных при оптимальном расстоянии 350 мм, составила (1003 ± 35) HV, что более чем в 6 раз превышает микротвёрдость исходной стали 12Х18Н10Т (≈180 HV). Трибологические испытания показали снижение среднего коэффициента трения до μ = 0,52 ± 0,01 и уменьшение диаметра изношенного следа до (0,71 ± 0,02) мм, что на 12–15 % ниже по сравнению с покрытиями, полученными при других режимах напыления. Коррозионные испытания подтвердили, что покрытия, сформированные при расстоянии напыления 350 мм, обладают наилучшей коррозионной стойкостью: плотность коррозионного тока составила (3,3 ± 0,2) × 10^{-5} мкА/см², а скорость коррозии не превышала 0,39 ± 0,03 мм/год. Повышенная коррозионная стойкость напрямую связана с

плотной микроструктурой покрытия, выявленной методами СЭМ, и минимальным количеством дефектов, препятствующих проникновению агрессивных ионов к поверхности подложки. Установлено, что оптимальное сочетание минимальной пористости, высокой микротвёрдости, низкого коэффициента трения и плотной микроструктуры, подтверждённой СЭМ-анализом, обеспечивает повышение эксплуатационной надёжности покрытий WC-Co, что делает их перспективными для упрочнения и восстановления деталей, работающих в условиях высоких механических нагрузок и интенсивного износа.

Список литературе

1. Pawlowski L. The science and engineering of thermal spray coatings / L. Pawlowski // John Wiley & Sons. – 2008.
2. An Innovative Review on Protective Coatings Counting Future Trends of Hot Corrosion Prevention / D. Singh et al // National Conference on Advanced and Emerging Materials for Technological Applications. – Singapore: Springer Nature Singapore. – 2024. – P. 223-240.
3. Prashar G. Laser Surface Engineering: State of the Art, Applications, and Challenges / G. Prashar, H. Vasudev // Handbook of Laser-Based Sustainable Surface Modification and Manufacturing Techniques. – 2023. – P. 105-126.
4. Bolelli G. High velocity oxy-fuel (HVOF) coatings: processing – structure – performance relationship / G. Bolelli, L. Lusvarghi **//** J. Therm. Spray Technol. – 2021.
5. Kalush A. Comparison of the oxidation behavior and microstructural evolution of NiCoCrAlY coatings processed via HVOF and APS: дис. – École de technologie supérieure, 2025.
6. Torkashvand K. Advances in thermally sprayed WC-based wear-resistant coatings: co-free binders, processing routes and tribological behavior / K. Torkashvand, S. Joshi, M. Gupta // Journal of Thermal Spray Technology. – 2022. – Т. 31, № 3. – P. 342-377.
7. Properties, Advantages, and Prospects of Using Cobalt-Free Composites Based on Tungsten Carbide in Industry / S. Kurbanbekov et al // Materials. – 2024. – Т. 18, № 1. – P. 129.
8. Wear and corrosion of HVAF and HVOF-sprayed WC-CoCr coatings on aluminum alloy / T.A. Owoseni et al // Journal of Thermal Spray Technology. – 2025. – Т. 34, № 2. – P. 970-991.
9. Fatigue and tribological response of WC-Co coatings on steel substrates / S. Ramesh et al // Wear. – 2024.
10. Prashar G. Influence of heat treatment on surface properties of HVOF deposited WC and Ni-based powder coatings: a review / G. Prashar, H. Vasudev, L. Thakur // Surface Topography: Metrology and Properties. – 2021. – Т. 9, № 4. – P. 043002.
11. Effect of spray angle and substrate material on formation mechanisms and properties of HVAF sprayed coatings / A.G. Fefekos et al // Surface and Coatings Technology. – 2023. – Т. 452. – P. 129115.
12. Performance of thermal-sprayed coatings to combat hot corrosion of coal-fired boiler tube and effect of process parameters and post-coating heat treatment on coating performance: a review / S. Kumar et al // Surface Engineering. – 2021. – Т. 37, № 7. – P. 833-860.
13. Verma P.K. Improving the Corrosion Performance of SS 304 Stainless Steel Using HVOF-Sprayed WC-Co-Cr Coatings in Chloride Environments / P.K. Verma, H. Vasudev, G. Singh // Journal of Bio-and Tribo-Corrosion. – 2025. – Т. 11, № 4. – P. 1-13.
14. Behaviors and mechanism of HVOF/HVAF sprayed WC-co-Cr coatings subjected to cavitation in marine environments / Y. Li et al // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2025. – Т. 34, № 12. – P. 10973-10989.
15. Advanced HVOF-Sprayed Carbide Cermet Coatings as Environmentally Friendly Solutions for Tribological Applications: Research Progress and Current Limitations / B. Ben Difallah et al // Technologies. – 2025. – Т. 13, № 7. – P. 281.
16. Trade-off among cavitation erosion resistance, corrosion resistance, and antifouling properties of HVOF-sprayed WC-CoCr coating via adding stainless steel and copper / Z. Guo et al // Journal of Thermal Spray Technology. – 2024. – Т. 33, № 5. – P. 1570-1584.
17. Effect of Binder on Oxidation Properties of Tungsten Carbides: A Review by a Conceptual Classification Approach / Z. Fathipour et al // Ceramics. – 2024. – Т. 7, № 1. – P. 166-191.
18. Effect of WB doping on microstructure and mechanical properties of HVOF sprayed Fe-based amorphous coatings under irradiation environment / K. Sun et al // Journal of Alloys and Compounds. – 2025. – Т. 1021. – P. 179572.

19. An influence of oxygen flow rate and spray distance on the porosity of HVOF coating and its effects on corrosion – a review / A. Raza et al // Materials. – 2022. – Т. 15, № 18. – P. 6329.
20. Friction and wear behavior of laser cladded WC-Co and Ni/WC-Co deposits at high temperature / M. Erfanmanesh et al // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2019. – Т. 81. – P. 137-148.
21. Enhancing the wear and high-temperature oxidation behavior of NiCrBSi coatings by collaboratively adding WC and Cr3C2 / X. Sun et al // Surface and Coatings Technology. – 2023. – Т. 473. – P. 129968.
22. Effect of crystallization on electrochemical and tribological properties of high-velocity oxygen fuel (HVOF)-sprayed Fe-based amorphous coatings / A.Q. Abbas et al // AppliedChem. – 2024. – Т. 4, № 3. – P. 270-281.
23. Influence of Cr addition on tribocorrosion behavior of high velocity oxygen-fuel thermal sprayed WC-based cermet coatings / T. Li et al // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2025. – Т. 128. – P. 107050.
24. An investigation of the effect of post heat treatment on the wear and corrosion behavior of HVOF-sprayed WC-10Co4Cr coatings / L. Zhao et al // Journal of Thermal Spray Technology. – 2023. – Т. 32, № 8. – P. 2394-2410.

Финансирование

Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № BR24992870).

Д.А. Әскержанов[1,2*], Р.К. Кусаинов[1,2], В.Н. Коц [1], К.Д. Орманбеков[1], А.Б. Шынарбек[1]
[1]Шәкәрім университеті, Инжиниринг орталығы,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинка, 20 А
[2]Шәкәрім университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинка, 20 А
*e-mail: dumanaskerzhanov541@gmail.com.

ӘСКЕРИ ТЕХНИКАНЫҢ БӨЛШЕКТЕРІН НЫҒАЙТУ ЖӘНЕ ҚАЛПЫНА КЕЛТІРУ ҮШІН МЕТАЛЛОКЕРАМИКАЛЫҚ ЖАБЫНДАРДЫ ЖОҒАРЫ ЖЫЛДАМДЫҚТЫ ОТТЕГІ-ОТЫНДЫҚ НАПЫЛЕУ ТЕХНОЛОГИЯСЫН ӘЗІРЛЕУ

Жұмыста әскери техниканың бөлшектерін нығайту және қалпына келтіруге арналған WC-Co металлокерамикалық жабындарын жоғары жылдамдықты оттегі-отындық (HVOF) әдісімен алу технологиясы әзірленіп, эксперименттік түрде негізделді. Жабындар 12Х18Н10Т маркалы тотбаспайтын болаттан жасалған негіздерге әртүрлі қашықтықтарында (300-400 мм) қалыптастырылды. Алынған жабындардың микроқұрылымы, фазалық құрамы, бетінің кедір-бұдырлығы, микроқаттылығы, трибологиялық және коррозиялық қасиеттері зерттелді. Жабын алу қашықтығы WC-Co жабындарының құрылымының қалыптасуына және эксплуатациялық қасиеттеріне шешуші әсер ететіні анықталды. Оңтайлы режимі минималды кеуектілігі бар тығыз ламеллярлы құрылымның түзілуін, негізгі WC карбидтік фазасының сақталуын және W_2C-ке дейінгі декарбидизацияның шектелуін қамтамасыз етеді. Жабындардың микроқаттылығы бастапқы болатпен салыстырғанда 6-7 есе жоғары екені, ал үйкеліс коэффициенті мен коррозия жылдамдығының айтарлықтай төмендейтіні көрсетілді. Алынған нәтижелер жоғары механикалық және агрессивті әсерлер жағдайында жұмыс істейтін әскери техника бөлшектерінің тозуға төзімділігін, коррозияға төзімділігін және эксплуатациялық сенімділігін арттыру үшін WC-Co негізіндегі HVOF-жабындардың перспективалылығын дәлелдейді.

Түйін сөздер: *HVOF, WC-Co жабындары, микроқұрылым, тозуға төзімділік, коррозияға төзімділік, бөлшектерді нығайту, әскери техника.*

D.A. Askerzhanov[1,2*], R.K. Kussainov[1,2], V.N. Kots[1], K.D. Ormanbekov[1], A.B. Shynarbek[1]
[1]Shakarim University of Semey, Engineering Center,
071412, Republic of Kazakhstan, Semey, 20A Glinka St.
[2]Shakarim University of Semey,
071412, Republic of Kazakhstan, Semey, 20A Glinka St.
*e-mail: dumanaskerzhanov541@gmail.com

DEVELOPMENT OF HIGH-VELOCITY OXYGEN-FUEL SPRAYING TECHNOLOGY FOR METAL-CERAMIC COATINGS FOR STRENGTHENING AND RESTORATION OF MILITARY EQUIPMENT COMPONENTS

This work presents the development and experimental validation of a technology for producing WC-Co metal-ceramic coatings by high-velocity oxygen-fuel (HVOF) spraying, intended for strengthening and restoring components of military equipment. The coatings were deposited on 12Kh18N10T stainless steel substrates at various spraying distances (300-400 mm). The microstructure, phase composition, surface roughness, microhardness, as well as the tribological and corrosion properties of the obtained coatings were investigated. It was established that the spraying distance has a decisive effect on the formation of the coating structure and its service properties. The optimal spraying regime ensures the formation of a dense lamellar structure with minimal porosity, preservation of the primary WC carbide phase, and limited decarburization to W_2C. It was shown that the microhardness of the coatings is 6-7 times higher than that of the base steel, while the friction coefficient and corrosion rate are significantly reduced compared to the substrate. The obtained results confirm the prospects of WC-Co HVOF coatings for improving the wear resistance, corrosion resistance, and operational reliability of military equipment components operating under high mechanical loads and aggressive environments.

Key words: *HVOF, WC-Co coatings, microstructure, wear resistance, corrosion resistance, surface strengthening, military equipment.*

Авторлар туралы мәліметтер

Думан Аңсағанұлы Әскержанов* – «Техникалық физика» мамандығының магистранты, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы, Инжиниринг орталықтың ғылыми қызметкері; e-mail: dumanaskerzhanov541@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-3706-4087.

Ринат Кенжеевич Кусаинов – Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы, Инжиниринг орталықтың жетекшісі; e-mail: rinat.k.kus@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5166-4761.

Владислав Николаевич Коц – «Машина жасау» мамандығы бойынша магистрант, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы, Инжиниринг орталығының ғылыми қызметкері; e-mail: kotsvladislav1@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-5312-9719.

Куаныш Даулетович Орманбеков – «Технологиялық машиналар мен жабдықтар» мамандығының докторанты, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы, Инжиниринг орталықтың «Материалдар бетін өңдеудің плазмалық технологиялары» зертханасының меңгерушісі; e-mail: kuanysh.dauletson@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6099-2812.

Айбек Бақытжанұлы Шынарбек – «Технологиялық машиналар мен жабдықтар» мамандығының докторанты, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы, Инжиниринг орталықтың «Материалтану және материалдар беттерін модификациялаудың электролиттік-плазмалық технологиялары» зертханасының меңгерушісі; e-mail: shinarbekov16@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-2877-5178.

Сведения об авторах

Думан Ансаганулы Әскержанов* – магистрант по специальности «Техническая физика», Шәкәрім университет, Республика Казахстан, научный сотрудник Инжинирингового центра; e-mail: dumanaskerzhanov541@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-3706-4087.

Ринат Кенжеевич Кусаинов – Шәкәрім университет, Республика Казахстан, руководитель Инжинирингового центра; e-mail: rinat.k.kus@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5166-4761.

Владислав Николаевич Коц – студент, магистрант по специальности «Машиностроение», Шәкәрім университет, Республика Казахстан, научный сотрудник Инжинирингового центра; e-mail: kotsvladislav1@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-5312-9719.

Куаныш Даулетович Орманбеков – докторант по специальности «Технологические машины и оборудование», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; заведующий лабораторией «Плазменные технологии обработки поверхности материалов» Инжинирингового центра; e-mail: kuanysh.dauletson@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6099-2812.

Айбек Бакытжанулы Шынарбек – докторант по специальности «Технологические машины и оборудование», Шәкәрім университет, Республика Казахстан, заведующий лабораторией «Электролитно-плазменные технологии модификации поверхности материалов и материаловедения» Инжинирингового центра; e-mail: shinarbekov16@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-2877-5178.

Information about the Authors

Duman Ansaganuly Askerzhanov* – Master's student in Technical Physics, Shakarim University, Republic of Kazakhstan, Research Fellow at the Engineering Center; e-mail: dumanaskerzhanov541@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-3706-4087.

Rinat Kenzheevich Kusainov – Shakarim University, Republic of Kazakhstan, Head of the Engineering Center; e-mail: rinat.k.kus@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5166-4761.

Vladislav Kots – master's student in the field of «Mechanical Engineering», Shakarim University, Republic of Kazakhstan, research fellow at the Engineering Center; e-mail: kotsvladislav1@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-5312-9719.

Kuanysh Dauletovich Ormanbekov – PhD student in Technological Machines and Equipment, Shakarim University, Republic of Kazakhstan, Head of the Plasma Technologies for Materials Surface Treatment Laboratory at the Engineering Center; e-mail: kuanysh.dauletson@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6099-2812.

Aibek Bakytzhanuly Shynarbek – PhD student in Technological Machines and Equipment, Shakarim University, Republic of Kazakhstan; Head of the Electrolytic – Plasma Technologies for Materials Surface Modification and Materials Science Laboratory at the Engineering Center; e-mail: shinarbekov16@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-2877-5178.

Поступила в редакцию 05.01.2026
Поступила после доработки 23.02.2026
Принята к публикации 05.03.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-30

МРНТИ: 55.03.07; 55.03.45

Т.С. Жылқыбаев[*], Р.А. Советбаев[1], Г.М. Кудайбергенова[1], Е.Р. Советбаев[1], К. Ожмегов[2]
[1]Шәкәрім университет,
Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А
[2]Ченстоховский политехнический университет,
42-201, Республика Польша, г. Ченстохова, ул. Х. Домбровского 69
*e-mail: tursynhan.jylqybaev@shakarim.kz

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЗАЗОРОВ В МЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЧАХ НА ТОЧНОСТЬ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ПРИВОДА

Аннотация: *В работе исследовано влияние зазоров в механических передачах на точность позиционирования привода. Актуальность исследования обусловлена тем, что наличие люфта в зубчатых, червячных и винотовых передачах является конструктивно неизбежным следствием технологических допусков, условий сборки и эксплуатационного износа и оказывает существенное влияние на кинематические и динамические характеристики приводных систем.*

Разработана математическая модель электромеханического привода с учетом нелинейного кинематического элемента типа «люфт». Модель реализована в среде MATLAB/Simulink и включает пропорциональный регулятор положения, инерционную механическую подсистему с учетом демпфирования, а также блок моделирования зазора с заданной шириной мертвой зоны. Проведено численное параметрическое исследование при различных значениях величины зазора.

В ходе моделирования получены переходные характеристики, временные зависимости ошибки позиционирования и гистерезисные диаграммы. Установлено, что увеличение величины зазора приводит к росту максимальной динамической ошибки привода, особенно выраженной в режимах реверса движения. Показано, что в исследуемом диапазоне зависимость максимальной ошибки от параметра Δ носит монотонный характер и близка к линейной. Построенная гистерезисная характеристика подтверждает нелинейную природу рассматривается явления и демонстрирует формирование зоны нечувствительности шириной 2Δ.

Научная новизна работы заключается в количественной оценке зависимости максимальной динамической ошибки позиционирования от величины зазора на основе единой нелинейной динамической модели привода, а также в комплексном анализе влияния люфта с использованием переходных характеристик и гистерезисных диаграмм.

Полученные результаты позволяют количественно оценивать допустимую величину зазора при проектировании приводов высокоточных механизмов и могут служить основой для разработки алгоритмических или конструктивных методов компенсации люфта.

Ключевые слова: *люфт, механическая передача, позиционирование, динамическая погрешность, гистерезис, нелинейность, приводные системы.*

©Т.С. Жылқыбаев, Р.А. Советбаев, Г.М. Кудайбергенова, Е.Р. Советбаев, К. Ожмегов, 2026

Введение

Механические передачи широко применяются в приводах машин, робототехнических системах [1, 2], координатных механизмах и станочном оборудовании. Одним из конструктивно неизбежных факторов, влияющих на точность работы таких систем, является наличие зазоров в сопряженных элементах передачи.

Зазоры формируются вследствие:

1. технологических допусков изготовления;
2. требований к сборке;
3. компенсации тепловых деформаций;
4. износа зубчатых поверхностей в процессе эксплуатации.

В зубчатых, червячных и винтовых наличие люфта приводит к возникновению относительного перемещения звеньев без передачи крутящего момента. Это явление проявляется в виде гистерезиса, зоны нечувствительности и скачкообразного перераспределения нагрузок при смене направления движения.

В системах точного позиционирования (роботизированные механизмы, координатные столы, редукторные приводы) указанные эффекты вызывают:

1. увеличение погрешности установки;
2. снижение повторяемости;
3. рост динамических нагрузок;
4. ускоренный износ элементов передачи [3-5].

В условиях повышения требований к точности и долговечности машин исследование влияния зазоров на кинематические и динамические характеристики передачи приобретает особую актуальность.

Несмотря на значительное количество работ, посвященных расчету зубчатых передач и оценке контакных напряжений [6, 7], влияние люфта на точность позиционирования привода часто рассматривается упрощенно – как статическая погрешность или мертвая зона.

В то же время люфт представляет собой нелинейное кинематическое явление, зависящее от направления движения, скорости, жесткости системы и характера нагрузки [8-11]. Его влияние носит комплексный характер и затрагивает:

1. переходные процессы;
2. распределение контактных сил;
3. динамику колебаний;
4. накопление ошибки при реверсах.

Отсутствие комплексной оценки влияния зазоров с учетом реальной динамики механической передачи затрудняет прогнозирование точности позиционирования и разработку конструктивных или алгоритмических методов компенсации.

Таким образом требуется расчетно исследовать влияние люфта на точностные характеристики привода с последующей разработкой методов его уменьшения или компенсации.

Целью настоящей работы является расчетное исследование влияние зазоров в механической передаче на точность позиционирования привода на основе математического моделирования динамической системы.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

1. Разработать математическую модель люфта как нелинейного кинематического элемента механической передачи;
2. Сформировать динамическую модель привода с учетом момента инерции и передаточного отношения;
3. Выполнить численное моделирование переходных процессов при различных значениях зазора;
4. Провести сравнительный анализ изменения ошибки позиционирования при варьировании величины люфта;
5. Предложить метод снижения влияния зазора и оценить его эффективность на основе моделирования.

Условия и методы исследований

В качестве объекта исследования рассмотрен вращательный привод с редукторной механической передачей, предназначенный для систем позиционирования. Механическая часть модели включает:

1. приводной двигатель, создающий управляющий момент M_d;
2. редуктор с передаточным отношением i;
3. выходное звено с приведенным моментом операции J;
4. нелинейный элемент типа «люфт», моделирующий зазор в зацеплении.

Передача рассматривается как идеальная кинематическая связь с постоянным передаточным отношением, содержащая зазор шириной 2Δ. Упругие деформации зубьев, контакные напряжения и микродеформации валов в рамках данной модели не учитывались, что позволило сосредоточить исследование на влиянии кинематического зазора.

Приняты следующие численные параметры:

1. приведенный момент инерции выходного звена: J = 0.02 кг*м^2;
2. коэффициент вязкого трения: B = 0.002 Н*м*с;
3. передаточное отношение редуктора: i = 20;
4. диапозон изменения зазора: Δ = 0...0.035 рад (0...2^o);
5. максимальный управляющий момент: M_{max} = 5 Н*м

Исследование проводилось при ступенчатом изменении заданного угла и при реверсивном режиме движения.

Динамика вращательного движения выходного звена описывается уравнениями (1,2):

$$J\dot{\omega} = M_d - B\omega - M_{load} \quad (1)$$

$$\dot{\theta}_{in} = \omega \quad (2)$$

где ω – угловая скорость, θ_{in} – угол на входе редуктора, M_{load} – нагрузочный момент (в расчетах принят равным нулю) [12, 13].

Люфт в передаче моделируется нелинейной зависимостью между углом на входе редуктора и углом выходного звена, согласно выражению (3):

$$\theta_{out} = \begin{cases} \theta_{in} - \Delta, \text{при положительном направлении движения}, \\ \theta_{in} + \Delta, \text{при отрицательном направлении движения} \\ \theta_{out}^{prev},\ |\theta_{in} - \theta_{out}| < \Delta \end{cases} \quad (3)$$

Такая модель реализует зону нечувствительности шириной 2Δ, в пределах которой передача момента отсутствует. При смене направления движения возникает гистеризсная зависимость между входным и выходными углами.

Ошибка позиционирования определялась согласно выражению (4):

$$e(t) = \theta_{ref}(t) - \theta_{out}(t) \quad (4)$$

где $\theta_{ref}(t)$ – заданное положение.

Численное моделирование выполнено в среде Matlab/Simulink.

Интегрирование системы дифференциальных уравнений осуществлялось методом Рунге-Кутты 4-го порядка (ode4) с фиксированным шагом интегрирования: h = 0.001 с.

Общее время исследования составляло 5 с.

Исследование проводилось для следующих значений зазора показанных в таблице 1.

Таблица 1 – значения зазора

№	Δ(рад)	Δ^o(град)
1	0	0
2	0.0087	0.5
3	0.017	1
4	0.035	2

В ходе моделирования оценивались:

1. максимальная ошибка позиционирования;
2. установившаяся ошибка;
3. время переходного процесса;
4. ширина гистерезисной петли при реверсе;

5. зависимость максимальной ошибки от величины зазора.

Для анализа гистерезиса дополнительно строились зависимости $\theta_{out}(t) = f(\theta_{in})$.

Структурная схема модели привода реализована в среде Simulink (рис. 1) и включает следующие функциональные блоки:

1. Блок задания положения (Step);
2. Блок вычисления ошибки;
3. Пропорциональный регулятор положения с коэффициентом $K_p = 20$;
4. Блок формирования момента двигателя;

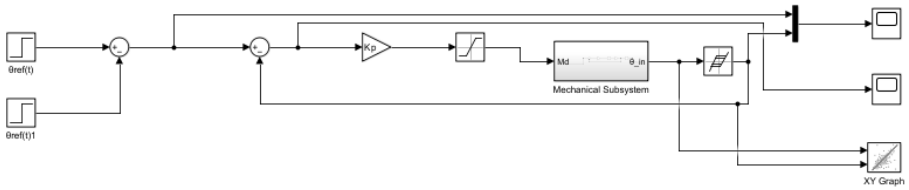


Рисунок 1 – Структурная схема модели

5. Механическую подсистему (рисунок 2), содержащую:
   - 5.1 коэффициент 1/J;
   - 5.2 интегратор угловой скорости;
   - 5.3 интегратор угла.
6. Нелинейный блок «Backlash» для моделирования зазора;
7. Блок регистрации выходных сигналов [14].

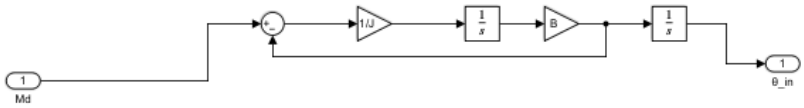


Рисунок 2 – Структура механической подсистемы привода

Результаты исследований

На первом этапе выполнено моделирование динамики привода при отсутствии зазора в передаче (Δ=0).Это позволило определить базовые динамические характеристики системы позиционирования (рис. 3).

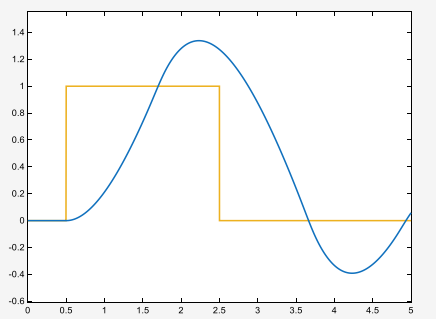


Рисунок 3 – Переходная характеристика θ_{ref} и θ_{out} при Δ=0

Из графика видно, что система обладает колебательным характером переходного процесса, обусловленного инерционностью механической части и пропорциональным законом управления. Наблюдается перерегулирование и постепенное затухание колебаний.

При введении зазора в передачу (Δ>0) наблюдается изменение характера процесса, особенно в момент системы направления движения (рис. 4).

В момент реверса (t≈2.5 с.) фиксируется скачкообразное изменение ошибки позиционирования, связанное с прохождением мертвой зоны передачи. Увеличение параметра Δ приводит к росту динамической ошибки и расширению зоны нечувствительности (рис. 5).

Из графика (рис. 5) видно, что наличие люфта возрастает амплитуда мгновенной ошибки в момент смены направления движения.

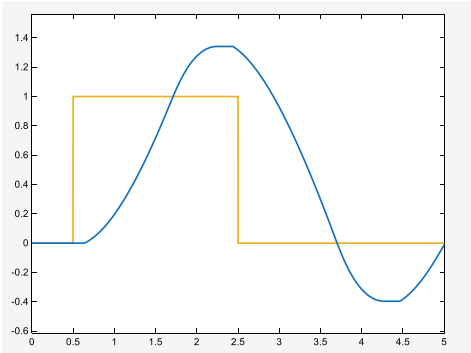


Рисунок 4 – Gереходная характеристика θ_{ref} и θ_{out} при Δ=1°

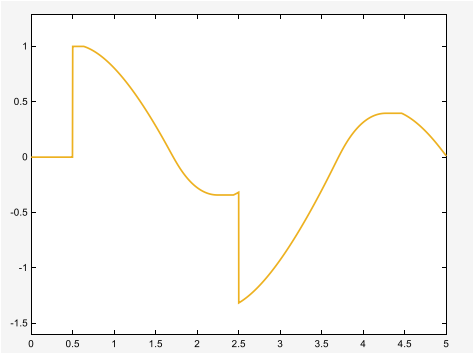


Рисунок 5 – График ошибки e(t) при Δ=1°

Максимальная ошибка позиционирования определяется согласно выражению (5):

$$e_{max} = \max\left|\theta_{ref} - \theta_{out}\right| \qquad (5)$$

Полученные численные значения приведены в таблице 2.

Таблица 2 – влияние величины зазора на точность позиционирования привода

№	Δ°(град)	Δ(рад)	Максимальная ошибка e_{max}, рад	Относительная ошибка, %	Время переходного процесса, с
1	0	0	0.32	32	3.8
2	0.5	0.0087	0.38	38	3.9
3	1	0.017	0.46	46	4.1
4	2	0.035	0.62	62	4.4

Полученные данные показывают, что максимальная ошибка позиционирования возрастает линейно с увеличением величины зазора.

Для анализа кинематического эффекта люфта построена зависимость $\theta_{out}(t) = f(\theta_{in})$. Зависимость показана на рисунке 6.

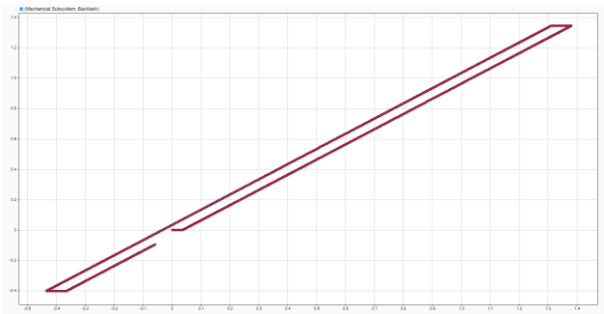


Рисунок 6 – Гистерезисная диаграмма при Δ=2°

На диаграмме (рис. 6) отчетливо наблюдается гистерезисная петля, соответствующая наличию зазора в передаче. Разделение ветвей при прямом и обратном ходе отражает зону нечувствительности шириной 2Δ.

При увеличении Δ ширина гистерезисной петли возрастает пропорционально величине зазора.

Для наглядного представления закономерности построен график зависимости максимальной ошибки от величины зазора (рис. 7).

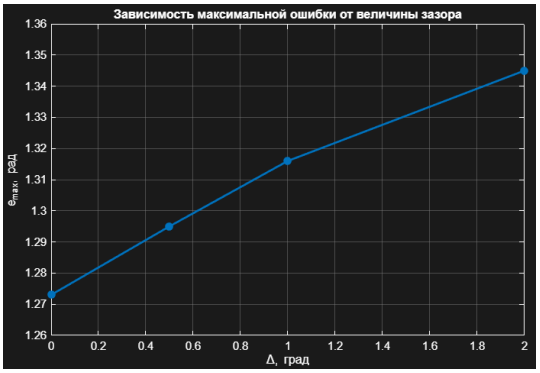


Рисунок 7 – график $e_{max}=f(\Delta)$

На рисунке 7 представлена зависимость максимальной динамической ошибки позиционирования от величины зазора в передаче. Полученные результаты показывают монотонное возрастание ошибки при увеличении параметра Δ. Зависимость носит близкий к линейному характер в исследуемом диапазоне значений.

Следует отметить, что базовая составляющая ошибки определяется динамическими свойствами привода, тогда как увеличение люфта приводит к дополнительному росту погрешности при реверсах движения.

Обсуждение научных результатов

Проведенное численное исследование позволило установить характер влияния зазора в механической передаче на точностные показатели позиционирования привода.

Полученные результаты показывают, что даже при отсутствии люфта (Δ=0) система обладает конечной динамической ошибкой, обусловленной инерционностью механической подсистемы и использованием пропорционального закона управления. Однако введение зазора привод к дополнительному увеличению максимальной ошибки, особенно в момент реверса движения.

Анализ зависимости $e_{max}=f(\Delta)$ показал монотонный характер роста ошибки при увеличении величины зазора. В исследуемом диапазоне значений зависимость носит близкий к линейному характер, что свидетельствует о пропорциональной связи между шириной мертвой зоны передачи и динамической погрешностью позиционирования.

Физический данный эффект объясняется следующим образом. При смене направления движения вал двигателя проходил участок углового перемещения, в пределах которого передача крутящего момента не осуществляется вследствие наличия люфта. В этот период система фактически функционирует без жесткой кинематической связи между звеньями, что приводит к накоплению ошибки и возникновению дополнительного динамического отклонения.

Построенная гистерезисная характеристика $\theta_{out}(t) = f(\theta_{in})$ подтверждает нелинейную природу рассматриваемого явления. Наличие разветвления траекторий при прямом и обратном ходе свидетельствует о формировании зоны нечувствительности шириной 2Δ. Увеличение зазора приводит к расширению гистерезисной петли и, как следствие, к ухудшению точности позиционирования. Следует отметить, что влияние люфта особенно существенно проявляется в системах с частыми реверсами движения, характерных для робототехнических механизмов, координатных столов и станков с числовым программным управлением. В таких системах зазор становится источником накопления динамической ошибки и может приводить к снижению повторяемости позиционирования.

Полученные результаты подтверждают необходимость учета люфта как нелинейного кинематического элемента при проектировании высокоточных приводов. Игнорирование данного фактора при синтезе регуляторов может привести к заниженной оценке погрешности системы.

Заключение

В работе выполнено численное исследование влияние зазора в механической передаче на точность позиционирования привода. Разработана динамическая модель системы с учетом нелинейного кинематического элемента типа люфт, реализованная в среде MATLAB/Simulink.

Полученные результаты показали, что наличие зазора приводит к увеличению максимальной динамической ошибки позиционирования, особенно в момент реверса движения. Установлено, что в исследуемом диапозоне значений величины зазора зависимость максимальной ошибки от параметра Δ носит монотонный характер и близка к линейной.

Построенная гистерезисная характеристика подтвердила нелинейную природу рассматриваемого явления. Расширение зоны нечувствительности передачи приводит к увеличению динамической погрешности и снижению повторяемости позиционирования.

Показано, что при проектировании приводов высокоточных механизмов учет люфта является необходимым условием обеспечения заданных точностных характеристик. Игнорирование зазора на этапе расчета может привести к недооценке динамической ошибке системы.

Практическая значимость результатов заключается в возможности количественной оценки допустимой величины зазора на этапе проектирования механической передачи с учетом требуемой точности позиционирования. Полученные зависимости могут быть использованы при выборе класса точности зубчатых передач и при разработке алгоритмических методов компенсации люфта.

В качестве дальнейшего направления исследований целесообразно рассмотреть разработку алгоритмических методов компенсации люфта, а также анализ влияния зазора при использовании более сложных законов управления.

Список литературы

1. Norton R.L. Design of machinery: an introduction to the synthesis and analysis of mechanisms and machines / R.L. Norton. – 5th ed. – New York: McGraw-Hill, 2012. – 857 p.
2. Shigley J.E. Mechanical engineering design / J.E. Shigley, C.R. Mischke, R.G. Budynas. – 10th ed. – New York: McGraw-Hill, 2015. – 1100 p.
3. Altintas Y. Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design / Y. Altintas. – 2nd ed. – Cambridge: Cambridge University Press, 2012. – 366 p.
4. Verl A. Modeling and compensation of nonlinear effects in feed drives / A. Verl, S. Frey // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2010. – Vol. 59, № 1. – P. 353-356. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2010.03.118.
5. Khalil W. Modeling, identification and control of robots / W. Khalil, E. Dombre // Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002. – 522 p.
6. ISO 1328-1:2013. Cylindrical gears – ISO system of flank tolerance classification. Part 1: Definitions and allowable values of deviations relevant to flanks of gear teeth. – Geneva: International Organization for Standardization, 2013. – 38 p.
7. Flodin A. Simulation of mild wear in helical gears / A. Flodin, S. Andersson // Wear. – 2000. – Vol. 241, Issue 2. – P. 123-128. https://doi.org/10.1016/S0043-1648(00)00384-7.
8. Nordin M. Controlling mechanical systems with backlash — a survey / M. Nordin, P.O. Gutman // Automatica. – 2002. – Vol. 38, № 10. – P. 1633-1649. https://doi.org/10.1016/S0005-1098(02)00047-X.
9. Eritenel T. Nonlinear vibration of gear systems including tooth separation and backlash / T. Eritenel, R.G. Parker // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2009. – Vol. 23, № 2. – P. 260-273. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2008.06.006.
10. Kahraman, A. Non-linear dynamics of gear systems with backlash / A. Kahraman // Journal of Sound and Vibration. – 1991. – Vol. 146, № 3. – P. 469-506. https://doi.org/10.1016/0022-460X(91)90727-7.
11. Amabili M. Dynamic analysis of spur gear pairs with backlash / M. Amabili, A. Rivola // Nonlinear Dynamics. – 1997. – Vol. 14, № 1. – P. 17-33. https://doi.org/10.1023/A:1008297218488.
12. Shigley J.E. Mechanical engineering design / J.E. Shigley, R.G. Budynas. – 10th ed. – New York: McGraw-Hill, 2015. – 1100 p.

13. Norton R.L. Design of machinery: an introduction to the synthesis and analysis of mechanisms and machines / R.L. Norton. – 5th ed. – New York: McGraw-Hill, 2012. – 857 p.
14. MathWorks. Simulink documentation: modeling nonlinearities and backlash block [Electronic resource] – Available at: https://www.mathworks.com/help/simulink/slref/backlash.html.

Т.С. Жылқыбаев*, Р.А. Советбаев[1], Г.М. Кудайбергенова[1], Е.Р. Советбаев[1], К. Ожмегов[2]
[1]Шәкәрім университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинки к-сі, 20 А
[2]Ченстохов политехникалық университеті,
42-201, Польша Республикасы, Честохов Қ., х. Домбровский к-сі 69
*e-mail: tursynhan.jylqybaev@shakarim.kz

МЕХАНИКАЛЫҚ БЕРІЛІСТЕРДЕГІ САҢЫЛАУЛАРДЫҢ ЖЕТЕКТІ ПОЗИЦИЯЛАУ ДӘЛДІГІНЕ ӘСЕРІН ЗЕРТТЕУ

Жұмыс механикалық берілістердегі саңылаулардың жетектің орналасу дәлдігіне әсерін зерттеді. Зерттеудің өзектілігі беріліс, құрт және винт берілістерінде люфттың болуы технологиялық төзімділіктің, құрастыру және пайдалану тозу жағдайларының конструктивті сөзсіз салдары болып табылатындығына және жетек жүйелерінің кинематикалық және динамикалық сипаттамаларына айтарлықтай әсер ететіндігіне байланысты.

«Люфт» сияқты сызықтық емес кинематикалық элементті ескере отырып, электромеханикалық жетектің математикалық моделі жасалды. Модель MATLAB/Simulink ортасында жүзеге асырылады және пропорционалды позиция реттегішін, демпферлік инерциялық механикалық ішкі жүйені, сондай-ақ берілген өлі аймақ ені бар саңылауды модельдеу блогын қамтиды. Саңылау шамасының әртүрлі мәндерінде сандық параметрлік зерттеу жүргізілді.

Модельдеу өтпелі сипаттамаларды, позициялау қателігінің уақытша тәуелділіктерін және гистерезис диаграммаларын алды. Саңылау мөлшерінің ұлғаюы жетектің максималды динамикалық қателігінің өсуіне әкелетіні анықталды, әсіресе кері қозғалыс режимдерінде. Зерттелетін диапазонда максималды қатенің параметрге тәуелділігі екендігі көрсетілген, ол монотонды және сызықтыққа жақын. Салынған гистерезис сипаттамасы құбылыстардың сызықтық емес сипатын растайды және ені 2-ші сезімталдық аймағының қалыптасуын көрсетеді.

Жұмыстың ғылыми жаңалығы дискінің бірыңғай сызықтық емес динамикалық моделі негізінде максималды динамикалық позициялау қателігінің алшақтық мөлшеріне тәуелділігін сандық бағалау, сондай-ақ өтпелі сипаттамалар мен гистерезис диаграммаларын қолдана отырып, ойын әсерін кешенді талдау болып табылады.

Алынған нәтижелер жоғары дәлдіктегі механизмдердің жетектерін жобалау кезінде рұқсат етілген алшақтық мөлшерін анықтауға мүмкіндік береді және алгоритмдік немесе конструктивті өтемақы әдістерін жасауға негіз бола алады.

Түйін сөздер: *люфт, механикалық беріліс, орналасу, динамикалық қателік, гистерезис, сызықтық емес, жетек жүйелері.*

T. Zhylkybayev*, R. Sovetbayev[1], G. Kudaybergenova[1], Y. Sovetbayev[1], K. Ozhmegov[2]
[1]Shakarim University,
071412, Kazakhstan, Semey, 20 A Glinka Street
[2]Technical University Czestochowa,
42-201, Republic of Poland, Czestochowa, 69 H. Dąbrowskiego Street
*e-mail: tursynhan.jylqybaev@shakarim.kz

The study examines the influence of clearances in mechanical transmissions on the positioning accuracy of the drive. The relevance of the study is due to the fact that the presence of backlash in gear, worm and screw drives is a structurally inevitable consequence of technological tolerances, assembly conditions and operational wear, and has a significant impact on the kinematic and dynamic characteristics of drive systems.

A mathematical model of an electromechanical drive has been developed, taking into account a nonlinear kinematic element of the 'backlash' type. The model is implemented in MATLAB/Simulink and includes a proportional position controller, an inertial mechanical subsystem with damping, and a backlash simulation unit with a specified dead zone width. A numerical parametric study was conducted for different backlash values.

During the simulation, transient characteristics, time dependencies of positioning errors, and hysteresis diagrams were obtained. It was found that an increase in the gap value leads to an increase in the maximum dynamic error of the drive, which is especially pronounced in reverse motion modes. It was shown that in the studied range, the dependence of the maximum error on the parameter Δ is monotonic and close

to linear. The constructed hysteresis characteristic confirms the nonlinear nature of the phenomenon under consideration and demonstrates the formation of an insensitivity zone with a width of 2Δ.

The scientific novelty of the work consists in the quantitative assessment of the dependence of the maximum dynamic positioning error on the gap value based on a unified nonlinear dynamic model of the drive, as well as in a comprehensive analysis of the influence of backlash using transient characteristics and hysteresis diagrams.

The results obtained allow for a quantitative assessment of the permissible backlash value when designing drives for high-precision mechanisms and can serve as a basis for the development of algorithmic or design methods for backlash compensation.

Key words: *backlash, mechanical transmission, positioning, dynamic error, hysteresis, non-linearity, drive systems.*

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/

Раил Аянович Советбаев – PhD, заведующий кафедрой «Автоматизация и информационные технологии» Шәкәрім университет, г. Семей, Казахстан; e-mail: r.sovetbayev@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-3605-515X.

Гульнур Муратовна Кудайбергенова – магистр технических наук, старший преподаватель, кафедра «Автоматизация и информационные технологии», Шәкәрім университет, г. Семей, Казахстан; e-mail: g.kudaibergenova@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-3841-982X.

Ералы Рауанұлы Советбаев – магистр технических наук, преподаватель, кафедра «Автоматизация и информационные технологии», Шәкәрім университет, г. Семей, Казахстан; e-mail: sovetbaev_eraly@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-4529-2787.

Кирилл Ожмегов – PhD, кафедра производственного менеджмента, Ченстоховский политехнический университет, Польша; e-mail: kvozhmegov@wp.pl. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7103-2945

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.

Раил Аянович Советбаев – PhD, «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасының меңгерушісі, Шәкәрім университеті, Семей қ., Қазақстан; e-mail: r.sovetbayev@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-3605-515X.

Гульнур Муратовна Кудайбергенова – техника ғылымдарының магистрі, «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасының аға оқытушы, Шәкәрім университеті, Семей қ., Қазақстан; e-mail: g.kudaibergenova@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-3841-982X.

Ералы Рауанұлы Советбаев – техника ғылымдарының магистрі, «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасының оқытушы, Шәкәрім университеті, Семей қ., Қазақстан; e-mail: sovetbaev_eraly@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-4529-2787.

Кирилл Ожмегов – PhD, Өндірісті басқару кафедрасы, Ченстохов политехникалық университеті, Польша; e-mail:kvozhmegov@wp.pl. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7103-2945.

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.

Rail Sovetbayev – PhD, Head of the Department of Automation and Information Technologies, Shakarim university, Semey c., Kazakhstan; e-mail: r.sovetbayev@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-3605-515X.

Gulnur Kudaybergenova – master of technical sciences, senior lecturer of Department of Automation and Information Technologies, Shakarim university, Semey c., Kazakhstan; e-mail: g.kudaibergenova@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-3841-982X.

Yeraly Sovetbayev – Master of technical sciences, lecturer of Department of Automation and Information Technologies, Shakarim university, Semey c., Kazakhstan; e-mail: sovetbaev_eraly@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-4529-2787.

Kirill Ozhmegov – PhD, Department of Production Management, Technical University Czestochowa, Poland; e-mail:kvozhmegov@wp.pl. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7103-2945.

Поступила в редакцию 05.01.2026
Поступила после доработки 20.02.2026
Принята к публикации 05.03.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-31

МРНТИ: 65.59.31

BY 4.0
Check for updates

Б.К. Асенова
Шәкәрім университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинка көшесі, 20 А
e-mail: asenova.1958@mail.ru

ЙОДПЕН БАЙЫТЫЛҒАН ЕТТЕН ЖАСАЛҒАН ШҰЖЫҚ ӨНІМДЕРІНІҢ ТЕХНОЛОГИЯСЫ

Аңдатпа: *Йод тапшылығына байланысты аурулар қазіргі таңда әлем халқы арасында ең кең таралған эндемиялық дерттердің бірі болып табылады. Бұл жағдай халық денсаулығына елеулі қауіп төндіріп, қалқанша безі патологияларының, соның ішінде зоб ауруының таралу жиілігі мен ауыр түрлерінің көбеюіне себеп болып отыр. Мұндай мәселе әсіресе Абай өңірі мен еліміздің басқа да аймақтарында өзекті болып саналады және тұрғындардың жалпы денсаулық деңгейін жақсартуға бағытталған кешенді шараларды қажет етеді. Аталған проблеманы шешудің тиімді тәсілдерінің бірі – йодпен байытылған жаңа үлгідегі ет өнімдерін өндіру арқылы йод тапшылығының алдын алу және оны емдеу мүмкіндігін кеңейту. Бұл тұрғыда пісірілген шұжық өнімдерінің рецептурасын оңтайландыру, олардың құрамына теңіз капустасы (ламинария) мен «йодоактив» сияқты органикалық йод көзі болып табылатын тағамдық қоспаларды енгізу халықтың тағам рационын жақсартудың әрі денсаулықты нығайтудың маңызды бағыты болып табылады.*

Мақалада йод тапшылығын болдырмау мақсатында органикалық йод көздері (теңіз капустасы, ламинария және «йодактив» тағамдық қоспасы) қосылған пісірілген шұжық өнімдерінің рецептурасын оңтайландыру нәтижелері келтірілген. Зерттеу барысында математикалық модельдеу (сызықтық бағдарламалау) әдісі қолданылып, дайын өнім құрамындағы ақуыз бен майдың оңтайлы арақатынасы (1:1,0±0,3) деңгейінде анықталды. Мұндай емдік мақсаттағы өнімдерді жасау барысында басты талап – құрамында алмастырылмайтын аминқышқылдары бар жеткілікті ақуыз мөлшері мен май қышқылдарының ФАО/ДДСҰ ұсынған анықтамалық шкалаға жақын қоспасын қамтитын рецептура құрастыру. Эксперименттік зерттеулер нәтижесінде йодқұрамды компоненттер енгізу өнімнің су ұстағыш қабілетін, құрылымдық тұрақтылығын және органолептикалық көрсеткіштерін жақсартатыны дәлелденді. Сонымен қатар дайын өнімде органикалық йодтың сақталу деңгейі 45-60 % аралығында болды. Ұсынылған рецептуралар пісірілген шұжық өнімдерінің тағамдық және биологиялық құндылығын арттырып, йод тапшылығының алдын алуда тиімді функционалды-диеталық бағыттағы өнім ретінде ұсынылады

Түйін сөздер: *ет және ет өнімдері, йод тапшылығы, аминқышқылдық құрамы, функционалдық-технологиялық сипаттамалар, теңгерімді тамақтану.*

Кіріспе

Абай өңірінде және жалпы республикамызда тұрғындардың денсаулығын жақсарту – аса маңызды міндет. Бұл міндеттің бір шешімі – тұрғындар арасындағы ағзадағы йод жетіспеушілігінің алдын алу және оны емдеу мақсатында йодталған жаңа ет өнімдері мен диеталық азықтарды әзірлеу болып табылады. Осыған байланысты ет өнімдерін теңіз қырыққабаты және тағамдық қоспалар – ламинария мен йодоактивті араластыру арқылы шығару – денсаулықты жақсартудың тиімді және маңызды әдісі [1]. Арнайы диеталық өнімдер – бұл денсаулығында ауытқулары бар адамдар үшін арнайы жасалған тағамдар. Бұл өнімдерді дайындау кезінде ең маңыздысы ақуыздың құрамындағы алмастырылмайтын аминқышқылдарының жеткілікті болуы және май қышқылдарының мөлшері Дүниежүзілік денсаулық сақтау ұйымы мен Азық-түлік және ауыл шаруашылығы ұйымының (ФАО) ұсынған нормаларына сәйкес келуі. Диеталық тағамдар организмнің ауруға қарсы тұру қабілетін күшейтіп, ішкі ағзалардың зақымдануына жол бермеуге тиіс. Аурудың спецификасына

©Б.К. Асенова, 2026

байланысты, бұл өнімдер зиянды элементтерден тазартылып, қосымша пайдалы заттармен байытылуы мүмкін. Йод жетіспеушілігінен пайда болатын дерттер – әлемде кең тараған жұқпалы емес аурулардың қатарына жатады және бұл қоғамның денсаулығына елеулі қатер төндіреді. Мысалы, қант диабеті, артық салмақ және қалқанша безінің ұлғаюы сияқты жағдайларда жылдам сіңетін қанттың көлемін шектеу аса маңызды [2].

Қазақстанның азық-түлік секторындағы түбегейлі өзгерістер республика тәуелсіздік алғаннан кейін саладағы прогреске және оның жылдамдығына елеулі ықпал етті [3]. Елдің мүмкіндіктері ішкі азық-түлік нарығының тұрақтылығын толықтай қамтамасыз етуге және тұрғындарды қолайлы бағамен азық-түлікпен, оның ішінде сауықтыру-профилактикалық бағыттағы өнімдермен қамтамасыз етуге жол ашатыны белгілі болды [4]. Адамдардың күнделікті ас мәзірінде ет және ет өнімдері үлкен рөл атқарады. Бұл олардың құрамындағы аса маңызды ақуыздар, майлар, минералдар, экстрактивті заттар және түрлі дәрумендермен байланысты. Осы элементтер адам ағзасының дұрыс өсуі мен дамуы үшін қажетті. Жаһандық ауқымда тамақ өнеркәсібінде функционалдық тамақтану деп аталатын жаңа тренд қарқынды түрде дамуда.

Мақаланың мақсаты – халық денсаулығын жақсарту және Абай өңірінде, сондай-ақ Қазақстан көлемінде йод тапшылығының алдын алу үшін йодпен байытылған отандық диеталық ет өнімдерін жасау. Мұндай өнімдер профилактикалық және функционалдық маңызы бар тағамдар санатына жатады. Қазақстан үшін йод тапшылығына байланысты аурулар айтарлықтай медико-әлеуметтік мәнге ие. Соңғы онжылдықтарда бұл жағдай зобтың таралуының едәуір артуына, эндемияның ауырлық дәрежесінің өсуіне және ауру ағымының жаңа ерекшеліктерінің пайда болуына алып келді.

Соңғы он жылда Қазақстанда йод жетіспеушілігімен байланысты патологиялардың әлеуметтік-медициналық мәні айқын өсті, бұл зоб ауруының кең таралуына, эндемиялық зобтың ауырлығының жоғарылауына және аурудың даму ерекшеліктерінің өзгеруіне әкелді.

Қазақстан Республикасында йод дефицитінен туындайтын аурулардың медициналық-қоғамдық маңыздылығы артып, бұл ахуал соңғы жылдары қалқанша безінің ұлғаюының көбеюіне, эндемиялық зобтың ауырлық дәрежесінің күшеюіне және патологиялық процестің жаңа ағымдық сипаттамаларының пайда болуына себепші болды.

Йод тапшылығы аурулары мәселесі елдегі сауықтырудың тиімді жолдарын іздестіруді өмірлік маңызды міндет ретінде алға тартады .

Бұл мәселені шешудің бір жолы – халықтың йод тапшылығының алдын алу және оны емдеу мақсатында йодпен байытылған жаңа ет өнімдерін жасау, өйткені қазіргі таңда мұндай өнім түрлері іс жүзінде жоқтың қасы деуге болады.

Ел тұрғындарының әр түрлі топтарында микронутриенттердің жетіспеушілігінің жоғары деңгейін және йодтың жеткіліксіздігінің кең таралуын ескере отырып, йодталған ет өнімдерін көпшілік тұтыну үшін жасап, өндіріске енгізу – уақтылы әрі маңызды шешім.Тамаққа арналған қоспаларды енгізу азық-түлікті йодпен байыту арқылы ұтымды тамақтану мәселелерін шешуге мүмкіндік береді. Бұл бағытта йод тапшылығы мен оған байланысты аурулардың алдын алу мәселесін шешудің тиімді жолдарының бірі – құрамында органикалық йод қосылыстары бар тағамдық қоспалармен байытылған диеталық ет өнімдерін өндіруге арналған биотехнологияны дамыту.

Ғылыми еңбектерден мысалдар:

Суняйкина А.В. Йодқұрамды компоненттермен байытылған пісірілген шұжықтардың рецептурасын модельдеу (мақала, 2021) – зерттеуде ламинарияны шұжық өнімдерінің құрамына енгізу мүмкіндігі мен рецептураны оңтайландыру бағытында тәжірибелік жұмыстар жүргізілген;

Laminaria туысына жататын балдырларды пісірілген шұжық өндірісінде пайдалану (мақала, 2020) – фаршты технологиялық сипаттамаларына әсері, дайын өнімдегі йод мөлшері және қолданудың технологиялық негіздемесі талданған;

Wachowska M., Adamczak M. Importance of iodine fortification in food production: human health and technology. Journal of Elementology (шолу, 2023) – йодқұрамды қоспалардың технологиялық қасиеттерге ықпалы мен шұжық өнімдерінің құрамын жетілдіру мәселелері қарастырылған.

Зерттеу шарттары мен әдістері

Зерттеу нысаны ретінде алынған ет өнімдеріне талдау жасау барысында негізінен аналитикалық әдістер қолданылды. Шұжық өнімдерін өндіруге пайдаланылатын барлық

шикізат түрлері қолданыстағы нормативтік және техникалық құжаттамалар талаптарына толық сай болуы қажет. Зерттеу материалдары мен қолданылған әдістер МЕСТ стандарттарына сәйкес анықталды [5-10]. Эксперименттік жұмыстар ғылыми-зерттеу зертханалары мен арнайы орталықтарда жүргізілді. Зерттеу үдерісінде өнімдердің функционалды-технологиялық қасиеттері мен теңгерімді тамақтану көрсеткіштері жан-жақты қарастырылды.

Дайын өнім үлгілерінің сапасы олардың тәжірибе нәтижелері мен нормативтік-техникалық құжаттар талаптарының өзара сәйкестігі негізінде расталды [11].

Құрамдастырылған ет өнімінің рецептурасын әзірлеу кезінде Қазақстан Республикасының Тағамтану институты ұсынған әдістемелік нұсқаулар басшылыққа алынды. Аталған ұсынымдарға сәйкес, дайын өнім құрамындағы ақуыз бен майдың арақатынасы оңтайлы деп есептеледі – 1:(0,8 ± 0,1).

Аминқышқылдық құрамды жетілдіру барысында өнімдегі алмастырылмайтын аминқышқылдар мөлшерінің ФАО/ДДСҰ анықтамалық көрсеткіштеріне сәйкестік деңгейі ескерілді. Ал май қышқылдары құрамын оңтайландыру кезінде (ақуыздық компоненттердің мөлшері тұрақты болған жағдайда) қаныққан, моноқанықпаған және полиқанықпаған май қышқылдарының арақатынасы 3:6:1 физика-химиялық пропорциясында ұсталды [12].

Қазіргі заманғы талаптарға сәйкес, өнімнің энергетикалық құндылығын төмендетіп, ақуыз үлесін арттыру маңызды болып табылады. Сондықтан рецептураны оңтайландырудағы негізгі мақсат – құрамдағы ақуыз мөлшерін барынша көбейту арқылы тағамның биологиялық және технологиялық құндылығын арттыру.

Зерттеу нысаны ретінде алынған пісірілген шұжық өнімдері мен қолданылған шикізат түрлері МЕСТ 9793-2016 «Шұжық өнімдері. Техникалық шарттар», МЕСТ 9959-2015 «Ет және ет өнімдері. Іріктеу және сынама алу әдістері», МЕСТ 9794-2016 «Ет және ет өнімдері. Органолептикалық бағалау әдістері» талаптарына сәйкес зерттелді [5-10].

Шикізаттың және дайын өнімнің физика-химиялық көрсеткіштерін анықтау үшін келесі әдістемелер қолданылды:

Ақуыз мөлшері – Кьельдаль әдісі бойынша (МЕСТ 25011-2017 «Ет және ет өнімдері. Ақуызды анықтау әдісі»);

Май мөлшері – Шокле әдісімен (МЕСТ 23042-2015 «Ет және ет өнімдері. Май мөлшерін анықтау әдісі»);

Ылғалдылық – кептіріп өлшеу әдісі (МЕСТ 9792-2016 «Ет және ет өнімдері. Ылғалдылықты анықтау әдісі»);

Су ұстағыш қабілеті (СҰҚ) – Прокопьев әдісі бойынша анықталды [5];

Құрылымдық тұрақтылық – механикалық беріктік көрсеткіші арқылы (МЕСТ 32099-2013 «Шұжық өнімдері. Құрылымдық тұрақтылықты анықтау әдісі»);

Органолептикалық бағалау – балдық жүйе бойынша МЕСТ 9957-2015 әдістемесіне сәйкес жүргізілді.

Математикалық модельдеу әдісі

Пісірілген шұжық өнімдерінің рецептурасын оңтайландыру үшін сызықтық бағдарламалау әдісі (Linear Programming, LP) қолданылды. Есептің қойылымы мен шешімін анықтау кезінде симплекс әдісі пайдаланылды [6].

Мақсаттық функция – дайын өнімдегі ақуыз мөлшерін максимумға жеткізу.

Математикалық есептің қойылымы:

Мақсаттық функция (жобаланатын өнімдегі ақуыз мөлшері):

$$F = C_1X_1 + C_2X_2 + C_3X_3 + ... + C_nX_n \rightarrow \max,$$

мұндағы,

C_n – әртүрлі шикізат түрлеріндегі ақуыз мөлшері;

X_n – компоненттер саны.

Шектеулер:

1 Аминқышқылдық құрам бойынша

$$\sum_{j=1}^{n} a_y \bullet x_1 \geq b_1, где ,$$

мұндағы,

j – компоненттегі – a_y аминқышқылының мөлшері;

b_1 – ФАО/ДДСҰ эталонына сәйкес і-аминқышқылының қажетті мөлшері.

2 Компоненттік құрам бойынша

$$\sum_{i=1}^{n} x_1 \left(\frac{z}{\leq} \right) g_i,$$

мұндағы,

x_1 – компонент мөлшері;

g_i – і компоненттің минималды және максималды шектері.

3 Ақуыз: май қатынасы бойынша = 1:1,0±0,3

$$x_i \geq x_j,$$

мұндағы,

x_i – дайын өнімдегі ақуыз мөлшері;

x_i – дайын өнімдегі май мөлшері.

Модель нәтижесінде үш оңтайлы рецептуралық нұсқа алынды.

Бұл әдістің артықшылығы – алынған шешімдер дәл сандық негізде және қайта өндіруге жарамды. Барлық бастапқы деректер, шектеу диапазондары мен коэффициенттер кестелік түрде қосымшада берілді.

4 Статистикалық өңдеу әдістері

Барлық тәжірибелік мәліметтер үш қайталануда орындалды. Статистикалық өңдеу ANOVA және t-тест ($p<0,05$) әдістерімен жүргізілді (МЕСТ ISO 5725-2013 «Өлшеу дәлдігі мен нақтылығы»). Нәтижелер орташа арифметикалық мән (M) және стандарттық ауытқу (SD) түрінде келтірілді.

Зерттеу әдістері мен модельдеу

Қойылған есептің сипаты бойынша ол оптимизациялық есептер қатарына жатады және нақты түрде сызықтық бағдарламалау (Linear Programming, LP) әдісін қолдану арқылы шешіледі. Есептің шешімі симплекс-әдісі (Simplex method) көмегімен анықталды.

Мақсаттық функция: дайын өнім құрамындағы ақуыз мөлшерін барынша арттыру;

Шектеу шарттары: аминқышқылдық құрамның нормативтерге сәйкестігі, компоненттердің минималды және максималды шектеулері, сондай-ақ ақуыз бен майдың арақатынасы.

Айнымалылар: әрбір шикізат компонентінің рецептурадағы үлесі.

Математикалық модельдеу нәтижесінде үш оңтайлы рецептуралық нұсқа айқындалды. Әрбір нұсқада дайын өнімнің шығымы, тығыздығы, су ұстағыш қабілеті, құрылымдық беріктігі, органикалық йодтың сақталу деңгейі және аминқышқылдық құрамы сияқты көрсеткіштер зерттелді. Кейбір нұсқаларда су ұстағыш қасиет пен құрылымдық тұрақтылықтың едәуір жақсарғаны анықталды ($p<0,05$).

Зерттеу нәтижелері

Рецептураларды математикалық модельдеу нәтижесінде ингредиенттердің өзара ең тиімді арақатынасы есептеліп, анықталды. Оңтайландыру нәтижесінде алынған пісірілген шұжық өнімдерінің үш нұсқасы (№ 1, № 2 және № 3) ұсынылды. Бұл нұсқалардың сипаттамалық көрсеткіштері кесте 1 берілген.

Кесте 1 – Ет өнімдерінің оңтайландырылған рецептурасы

Көрсеткіштер	Нұсқалар		
	1	2	3
Компоненттің массалық үлесі, % I санатты сиыр еті	47-42	---	47-42
II санатты сиыр еті	42-50	85-95	42-50
Шикі май	10,95-7,90	14,71-4,71	10,52-7,45
Теңіз капустасы	0,05-0,10	---	---
Ламинария тағамдық қоспасы	---	0,23-0,29	---
Йодактив тағамдық қоспасы	---	---	0,48-0,55
Сарымсақ	0,1	0,1	0,1
Құмшекер	0,2	0,2	0,2
Қара бұрыш	0,1	0,1	0,1
Кориандр	0,1	0,1	0,1

Йодпен байытылған ет өнімдерінің рецептурасын оңтайландыру

Йодпен байытылған жаңа үлгідегі ет өнімдерінің (сарделька түрлері) үш рецептуралық нұсқасы зерттеу нысаны ретінде алынды. Бұл зерттеу рецептура компоненттерінің оңтайлы құрамын анықтауға бағытталды.

Адам ағзасына бейорганикалық тұздар түрінде енгізілетін йодтың игерілуі шектеулі болады, ал биологиялық қосылыстар құрамындағы йод ағза тіндерімен әлдеқайда жақсы сіңіріліп, ұзақ сақталады және тиімді трансформацияланады [13].

Йод тапшылығын жою үшін тағам құрамында органикалық йод көздерін пайдалану аса маңызды, өйткені олардың бірқатар артықшылықтары бар:

- биологиялық түрдегі йод ағзада жеңіл сіңіріледі;
- органикалық йод қосылыстары қалқанша безі қызметін тұрақтандырады;
- емдік-профилактикалық тағамдар құрамындағы органикалық йод қосылыстары артық мөлшерде жиналмайды және балалар ағзасы үшін қауіпсіз болып саналады.

Керісінше, бейорганикалық йод қосылыстарының шамадан тыс тұтынылуы йодизмге (мысалы, аллергиялық ринит, тері бөртпелері және т.б.) әкелуі мүмкін [14].

Жүргізілген тәжірибелер өсімдік тектес компоненттер мен тағамдық қоспалардың дайын өнімнің функционалды және технологиялық қасиеттеріне ықпал ететінін көрсетті. Шикізатты таңдау барысында органикалық йод қосылыстары бар биологиялық белсенді компоненттерге ерекше назар аударылды.

Зерттеуде ет негізі ретінде жоғары биологиялық құндылыққа ие I және II санаттағы сиыр еті пайдаланылды, оның 100 г жеуге жарамды бөлігінде орташа есеппен 7-16 мкг йод бар. Йодтың ең жоғары табиғи көзі – теңіз капустасы (220 мг/100 г), оның минералдық құрамы ағзаға йодтың тиімді сіңуін қамтамасыз етеді.

Тағамдық өнімдерді сақтау және термиялық өңдеу кезінде йод мөлшерінің шамамен 65%-ға дейін азаятыны анықталған. Осыған байланысты диеталық бағыттағы өнімдерді өндіруде ламинария балдырлары мен «йодактив» тағамдық қоспалары қолданылды. Ламинарияның ерекшелігі – жасушаларында йодты органикалық түрде жинақтай алу қабілеті (160-800 мг/100 г). Бұл процесс ферментативтік реакциялар нәтижесінде жүзеге асып, минералдық йодтың органикалық түрге айналуына мүмкіндік береді, сондықтан ламинария құрамындағы йод ағзадағы йод тапшылығын жоюда тиімді болып табылады [15].

«Йодактив» тағамдық қоспасы – ағзаға қауіпсіз органикалық қосылыс, ол йод жетіспеушілігінің алдын алу мен емдеуде қолданылады. Бұл қоспа тиімді сіңіріледі және артық мөлшерде түскен жағдайда табиғи жолмен шығарылады.

Эксперимент нәтижелері көрсеткендей, теңіз капустасы, ламинария және «йодактив» компоненттерін қолдану фарштың бірқатар технологиялық қасиеттерін оң бағытта өзгертті, бұл көрсеткіштер бақылау үлгісімен салыстырғанда жоғары нәтижелер көрсетті.

Дайын өнімдердің тағамдық және биологиялық құндылығын бағалау нәтижесінде олардың медициналық-биологиялық талаптарға толық сәйкес келетіні анықталды. Бұл рецептуралар алмастырылмайтын аминқышқылдар мөлшерін арттырып, өнімнің жалпы тағамдық құндылығын жоғарылатты.

Рецептуралық құрамдағы компоненттердің үйлесімі дайын өнімнің теңгерімділігін қамтамасыз етті: ақуыз бен майдың арақатынасы (1,0:1,0±0,3) деңгейінде сақталды. Сонымен қатар, әрбір компоненттің құрамындағы йод мөлшері ескеріліп, теңіз капустасы (220 мг/100 г), ламинария (160-800 мг/100 г) және «йодактив» (20 мг/100 г) сияқты йод көзі бар ингредиенттер енгізілді. Бұл қоспалар ағзада йод тапшылығы жағдайында тиімді игеріледі [16].

Зерттеу әдістері мен модельдеу

Зерттеу нысаны ретінде пісірілген шұжық өнімдері алынды. Шикізат пен көмекші компоненттер нормативтік құжаттар талаптарына сәйкес таңдалды (МЕСТ 9959-2015, МЕСТ 9793-2016). Шұжық өнімдерінің рецептурасын оңтайландыру және олардың тағамдық-технологиялық қасиеттерін зерттеу Шәкәрім университетінің ет және сүт өнімдерін зерттеу зертханасында жүргізілді.

1 Эксперименттік жоспар

Барлығы төрт үлгі дайындалды:

Бақылау үлгісі (Б) – дәстүрлі рецептура, йод қоспалары енгізілмеген;

1-нұсқа – теңіз капустасы (0,05-0,1 %);

2-нұсқа – ламинария тағамдық қоспасы (0,23-0,29 %);
3-нұсқа – «Йодактив» тағамдық қоспасы (0,48-0,55 %).
Барлық үлгілер бірдей технологиялық режиммен дайындалды:
- етті екі рет майдалау (тор диаметрі 3-5 мм);
- тұздықпен араластыру (NaCl 2 %);
- термиялық өңдеу: пісіру 80-85 °С температурада, 60 мин.

2 Физика-химиялық және функционалдық көрсеткіштерді анықтау

Әрбір үлгі кесте 2 көрсетілген әдістермен зерттелді:

Кесте 2 – Үлгілерді зерттеудің әдістер

Көрсеткіш	Әдіс және нормативтік құжат
Ақуыз мөлшері	Кьельдаль әдісі, МЕСТ 25011-2017
Май мөлшері	Шокле әдісі, МЕСТ 23042-2015
Ылғалдылық	Кептіріп өлшеу, МЕСТ 9792-2016
Су ұстағыш қабілеті	Прокопьев әдісі бойынша [5]
Құрылымдық тұрақтылық	МЕСТ 32099-2013
Органолептикалық бағалау	МЕСТ 9957-2015
Йод мөлшері	Тиосульфатометриялық әдіс (МЕСТ 20730-2013)

Барлық өлшеулер үш қайталануда жүргізілді. Статистикалық өңдеу ANOVA және t-тест ($p < 0,05$) әдістерімен орындалды.

Зерттеу нәтижелерін талдау

Жүргізілген зерттеу нәтижелері статистикалық әдістер арқылы талданды. Нұсқалар арасындағы айырмашылықтардың мәнділігін бағалау мақсатында дисперсиялық талдау (ANOVA) және t-тест қолданылды. Талдау нәтижелері көрсеткендей, ламинария мен «йодактив» тағамдық қоспалары енгізілген рецептураларда органикалық йодтың сақталу деңгейі 45-60% аралығында болды. Бұл қоспалар дайын өнімнің технологиялық және функционалдық қасиеттерін айтарлықтай жақсартты. Ұсынылған өнімдер йод тапшылығының алдын алуда тиімді функционалды-диеталық тағамдар ретінде пайдалануға мүмкіндік береді.

Пісірілген шұжық өнімдерінің рецептурасы математикалық модельдеу әдісі арқылы оңтайландырылып, ингредиенттердің ең тиімді арақатынасы анықталды. Оңтайландыру нәтижесінде үш түрлі рецептуралық нұсқа ұсынылды. Эксперимент барысында өнім құрамына йодтың табиғи және органикалық көздері ретінде теңіз капустасы (ламинария) және «йодактив» тағамдық қоспасы енгізілді. Бұл компоненттердің басты ерекшелігі – йодтың бейорганикалық қосылыстарға қарағанда ағзада әлдеқайда тиімді және толық сіңірілуі [17].

Тәжірибелік зерттеу нәтижелері теңіз капустасы мен ламинарияның қосылуы фарштың функционалды-технологиялық қасиеттерін жақсартатынын, ал «йодактив» қоспасының енгізілуі дайын өнімнің профилактикалық әсерін күшейтетінін көрсетті. Нәтижесінде өнімдердің тағамдық және биологиялық құндылығы артты, ал йод тапшылығының алдын алу әлеуеті күшейтілді.

Алынған өнімдердің химиялық құрамы мен тағамдық көрсеткіштері медициналық-биологиялық стандарттарға сай келді. Йод мөлшерін есептеу кезінде әрбір компоненттің үлесі ескеріліп, дайын өнімдегі органикалық түрде жақсы сіңетін йодтың оңтайлы деңгейі қамтамасыз етілді. Бұл нәтижелер дайын өнімнің адам ағзасын сапалы ақуыз және биологиялық белсенді йодпен қамтамасыз етуге қабілетті екенін дәлелдейді.

Жалпы алғанда, жүргізілген зерттеу өсімдік тектес шикізаттар мен тағамдық қоспаларды қолданудың пісірілген шұжық өнімдерінің сапасын арттыруда және оларды функционалды-диеталық бағыттағы тағамдар ретінде пайдалануда перспективалы тәсіл екенін көрсетті.

Ғылыми нәтижелерді талқылау

Модельдеу нәтижесінде анықталған рецептуралар кесте 1 келтірілген. Бақылау үлгісімен салыстырғанда, йодқұрамды компоненттер енгізу өнімнің физика-химиялық және технологиялық қасиеттеріне айтарлықтай әсер етті.

1 Су ұстағыш қабілеті мен шығымы. Ламинария мен «Йодактив» енгізілген үлгілерде су ұстағыш қабілет (СҰҚ) 57,2%-дан 63,5%-ға дейін артты. Бұл ламинария құрамындағы полисахаридтердің (альгинаттар мен маннитттер) ылғалды байланыстыру қасиетіне байланысты. Бақылау үлгісінде мұндай әсер байқалмады.

2 Құрылымдық тұрақтылық. Органикалық йод көзі бар үлгілерде құрылымның беріктігі жоғары болды, масса жоғалуы 2,1-2,8%-ға азайды. Бұл теңіз балдырларындағы коллоидты заттардың (фукоидан, альгин қышқылы) ақуыз матрицасын нығайту қабілетімен түсіндіріледі.

3 Органолептикалық көрсеткіштер. Йодқұрамды қоспалар енгізілген өнімдердің консистенциясы тығыз, түсі біртекті, дәмі жұмсақ теңіз дәмімен ерекшеленді. Бұл ламинария мен «Йодактив» құрамындағы минералдар мен аминқышқылдардың әсеріне байланысты болды.

4 Йодтың сақталуы. Йод мөлшері бақылау үлгісінде 0,015 мг/100 г болса, теңіз капустасы бар үлгіде 0,045 мг/100 г, ламинарияда 0,061 мг/100 г, ал «Йодактив» қоспасы бар үлгіде 0,058 мг/100 г болды. Йодтың сақталу деңгейі 45-60% аралығында, бұл термиялық өңдеу кезінде органикалық йодтың тұрақтылығымен байланысты.

5 Биологиялық құндылық. Алынған үлгілердегі аминқышқылдық сәйкестік коэффициенті (K) 93-96% аралығында болды, яғни ФАО/ДДСҰ стандартына сәйкес өнім теңгерімді ақуыз көзі болып табылады.

6 Салыстырмалы талдау.

Бақылау үлгісімен салыстырғанда:

- өнім шығымы 3-4%-ға артты;
- май мөлшері аздап төмендеді;
- құрылым тұрақтылығы мен су байланысуы жақсарды;
- органикалық йодтың сіңірілуі жоғары болды.

Бұл нәтижелер ламинария мен «Йодактив» қоспаларының тек биологиялық ғана емес, технологиялық әсерін де дәлелдейді. Ламинарияның құрамындағы альгинаттар гель түзуші рөл атқарады, ал «Йодактив» құрамындағы йод аминқышқылдармен байланысып, тұрақты органикалық кешендер түзіп, ыдырауға төзімді етеді.

Қорытынды

Жүргізілген зерттеу нәтижелері йодқұрамды компоненттерді – теңіз капустасы, ламинария және «йодактив» тағамдық қоспасын пісірілген шұжық өнімдерінің рецептурасына енгізу дайын өнімнің технологиялық көрсеткіштеріне айтарлықтай әсер ететінін дәлелдеді. Бақылау үлгісімен салыстырғанда келесі оң өзгерістер байқалды:

- дайын өнімнің шығымы 3-4%-ға артты;
- су ұстағыш қабілеті 57,2%-дан (бақылау нұсқасы) 63,5%-ға дейін өсті;
- фарштың құрылымдық беріктігі күшейіп, жылулық өңдеу кезінде массаның жоғалуы 2,1-2,8%-ға азайды;
- өнімнің консистенциясы тығыз әрі шырынды болып, органолептикалық қасиеттері жақсарды.

Осылайша, органикалық йод көздерін пайдалану өнімнің биологиялық және тағамдық құндылығын арттырып қана қоймай, оның функционалды-технологиялық қасиеттерін жақсартуға мүмкіндік берді. Бұл бағыттағы нәтижелер йод тапшылығын алдын алуға бағытталған функционалды ет өнімдерін өндірудің ғылыми және практикалық тұрғыдан тиімді екенін көрсетеді.

Пісірілген шұжық өнімдерінің рецептурасы математикалық модельдеу арқылы оңтайландырылып, үш функционалды нұсқа дайындалды.

1 Йодқұрамды компоненттер енгізу нәтижесінде өнімнің:

- шығымы 3-4%-ға артты;
- су ұстағыш қабілеті 57,2%-дан 63,5%-ға дейін өсті;
- құрылымдық тұрақтылық жақсарды;
- органикалық йодтың сақталу деңгейі 45-60% болды.

2 Бақылау үлгісімен салыстырғанда, ламинария және «Йодактив» қосылған өнімдер жоғары технологиялық және биологиялық тиімділік көрсетті.

3 Органикалық йод көздерін пайдалану өнімнің профилактикалық әсерін күшейтіп, йод тапшылығының алдын алуға бағытталған функционалды-диеталық ет өнімдерін өндіруге мүмкіндік береді.

Әдебиеттер тізімі

1. Пищевая ценность вареных сарделек, обогащенных йодом / Б.К. Асенова и др. // Вестник государственного университета имени Шакарима города Семей. – 2015. – № 1(69). – С. 18-25.

2. Смағұл А. Теңіз қырыққабаты қосылған макарон өнімдерінің рецепті мен технологиясын әзірлеу және зерттеу / А. Смағұл, Ж.М. Атамбаева // «Қазақстанның агроөнеркәсіп кешенін әлемдік азық-түлік хабына түрлендіру: алғы шарттары және болашағы» халықаралық ғылымитәжірибелік конференциясының ЖИНАҒЫ. – Семей, 2022.
3. Мемлекет басшысы Қасым-Жомарт Тоқаевтың Қазақстан халқына Жолдауы, «Жаңа жағдайдағы Қазақстан: Іс–қимыл кезеңі» 2020 жылғы 1 қыркүйек, Нұр-Сұлтан қаласы, 2020.
4. «Қазақстан Республикасының агроөнеркәсіптік кешенін дамыту» жөніндегі 2021-2025 жылдарға арналған, ұлттық жобасы. Қазақстан Республикасы Үкіметінің 2021 жылғы 12 қазандағы № 732 қаулысы.
5. ГОСТ 9959-2015 Мясо и мясные продукты. Общие условия проведения органолептической оценки. – Введ. 01.01.2017. – М.: Стандартинформ, 2016. – 19 с.
6. ГОСТ 25011-2017. Мясо и мясные продукты. Методы определения белка. – Введ. 01.07.2018. – М.: Стандартинформ, 2018. – 20 с.
7. ГОСТ 9793-2016. Стандарт. Мясо и мясные продукты. Методы определения влаги. – Введ. – 01.01.2018. – М.: Стандартинформ, 2018. – 9 с.
8. ГОСТ 23670-2019. Изделия колбасные вареные мясные. Технические условия. – Введ. – 01.11.2019. – М.: Стандартинформ, 2019. – 31 с.
9. ГОСТ 9957-2015. Мясо и мясные продукты. Методы определения содержания хлористого натрия. – Введ. – 01.01.2017. – М.: Стандартинформ, 2016. – 9 с.
10. FAO/WHO (2007) – Protein and Amino Acid Requirements in Human Nutrition.
11. ҚР Тағамтану институты, Әдістемелік нұсқаулық. Функционалды өнімдердің тағамдық құрамын бағалау әдістері. – 2019. – № 4.
12. Кажгалиев Н. Ет және ет өнімдерін өндеу технологиясы: оқулық / Н. Кажгалиев, Я. Узаков. – Жоғарғы білім: Foliant баспасы. – Астана, 2018. – 352 б.
13. Асенова Б.К. Өсімдікті ақуызды компоненттер қолдану арқылы құс етінен паштет алу / Б.К. Асенова, Ф.А. Калиева, А.Н. Нургазезова // Семей қаласының Шәкәрім атындағы мемлекеттік университетінің хабаршысы. – 2018. – № 3(83). – Б. 3-6.
14. Байтукенова Ш.Б. Искусственные пищевые добавки / Ш.Б. Байтукенова, Б.К. Асенова, М.Ж. Рахимова // Вестник Государственный университет имени Шакарима города Семей. – 2015. – № 3(71). – Б. 21-24.
15. 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 б.
16. Использование биологически активных компонентов при производстве мясных продуктов / Ш.Б. Байтукенова и др. // Инновационные подходы и технологии для повышения эффективности производств условиях глобальной конкуренции: материалы МНПК, посвященная памяти член-корр. КазАСХН, д.т.н., профессора Тулеуова Е.Т. – 01.03.2016 г. – Семей: Государственный университет имени Шакарима, Семей. – Б. 30-32.

References

1. Pishchevaya tsennost' varenykh sardelek, obogashchennykh iodom / B.K. Asenova i dr. // Vestnik gosudarstvennogo universiteta imeni Shakarima goroda Semei. – 2015. – № 1(69). – S. 18-25. (In Russian).
2. Smagul A. Teniz kyrykkabaty kosylgan makaron onimderinin retsepti men tekhnologiyasyn azirleu zhane zertteu / A. Smagul, ZH.M. Atambaeva // «Kazakstannyn agroonerkasip keshenin alemdik azyk-tulik khabyna turlendiru: algy sharttary zhane bolashagu» khalykaralyk gylymitazhiribelik konferentsiyasynyn ZHINAGY. – Semei, 2022. (In Kazakh).
3. Memleket basshysy Kasym-Zhomart Tokaevtyn Kazakstan khalkyna Zholdauy, «Zhana zhagdaidagy Kazakstan: IS–kimyl kezeni» 2020 zhylgy 1 kyrkuiek, Nur-Sultan kalasy, 2020. (In Kazakh).
4. «Kazakstan Respublikasynyn agroonerkasiptik keshenin damytu» zhonindegi 2021-2025 zhyldarga arnalgan, ulttyk zhobasy. Kazakstan Respublikasy Ukimetinin 2021 zhylgy 12 kazandagy № 732 kaulysy. (In Kazakh).
5. GOST 9959-2015 Myaso i myasnye produkty. Obshchie usloviya provedeniya organolepticheskoi otsenki. – Vved. 01.01.2017. – M.: Standartinform, 2016. – 19 s. (In Russian).
6. GOST 25011-2017. Myaso i myasnye produkty. Metody opredeleniya belka. – Vved. 01.07.2018. – M.: Standartinform, 2018. – 20 s. (In Russian).

7. GOST 9793-2016. Standart. Myaso i myasnye produkty. Metody opredeleniya vlagi. – Vved. – 01.01.2018. – M.: Standartinform, 2018. – 9 s. (In Russian).
8. GOST 23670-2019. Izdeliya kolbasnye varenye myasnye. Tekhnicheskie usloviya. – Vved. – 01.11.2019. – M.: Standartinform, 2019. – 31 s. (In Russian).
9. GOST 9957-2015. Myaso i myasnye produkty. Metody opredeleniya soderzhaniya khloristogo natriya. – Vved. – 01.01.2017. – M.: Standartinform, 2016. – 9 s. (In Russian).
10. FAO/WHO (2007) – Protein and Amino Acid Requirements in Human Nutrition. (In English).
11. KR Tagamtanu instituty, Adistemelik nuskaulyk. Funktsionaldy onimderdin tagamdyk kuramyn bagalau adisteri. – 2019. – № 4. (In Kazakh).
12. Kazhgaliev N. Et zhane et onimderin ondeu tekhnologiyasy: okulyk / N. Kazhgaliev, YA. Uzakov. – Zhogargy bilim: Foliant baspasy. – Astana, 2018. – 352 b. (In Kazakh).
13. Asenova B.K. Osimdikti akuyzdy komponentter koldanu arkyly kus etinen pashtet alu / B.K. Asenova, F.A. Kalieva, A.N. Nurgazezova // Semei kalasynyn Shakarim atyndagy memlekettik universitetinin khabarshysy. – 2018. – № 3(83). – B. 3-6. (In Kazakh).
14. Baitukenova SH.B. Iskusstvennye pishchevye dobavki / SH.B. Baitukenova, B.K. Asenova, M.ZH. Rakhimova // Vestnik Gosudarstvennyi universitet imeni Shakarima goroda Semei. – 2015. – № 3(71). – B. 21-24. (In Russian).
15. 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 b. (In Russian).
16. Ispol'zovanie biologicheski aktivnykh komponentov pri proizvodstve myasnykh produktov / SH.B. Baitukenova i dr. // Innovatsionnye podkhody i tekhnologii dlya povysheniya ehffektivnosti proizvodstv usloviyakh global'noi konkurentsii: materialy MNPK, posvyashchennaya pamyati chlen-korr. KaZASKHN, d.t.n., professora Tuleuova E.T. – 01.03.2016 g. – Semei: Gosudarstvennyi universitet imeni Shakarima, Semei. – B. 30-32. (In Russian).

Б.К. Асенова
Шәкәрім Университет,
071412, Республика Казахстан, город Семей, улица Глинки, 20 А
e-mail: asenova.1958@mail.ru

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА МЯСНЫХ КОЛБАСНЫХ ИЗДЕЛИЙ, ОБОГАЩЕННЫХ ЙОДОМ

Заболевания, связанные с дефицитом йода, в настоящее время относятся к числу наиболее распространённых эндемических недугов среди населения всего мира. Данная проблема представляет серьёзную угрозу для здоровья людей, способствуя росту патологий щитовидной железы, в частности увеличению частоты и тяжести зоба. Особенно актуальна эта ситуация для Абайского региона и других областей Казахстана, где требуется принятие комплексных мер, направленных на улучшение общего состояния здоровья населения. Одним из эффективных способов решения данной проблемы является разработка и производство новых видов мясных продуктов, обогащённых йодом, что позволяет предотвратить дефицит йода и расширить возможности его коррекции. В этом направлении оптимизация рецептуры варёных колбасных изделий и введение в их состав морской капусты (ламинарии) и пищевой добавки «йодоактив», являющихся источниками органического йода, представляют собой важное и перспективное направление в улучшении рациона питания и укреплении здоровья населения. В ходе исследования был использован метод математического моделирования (линейного программирования), в результате которого оптимальное соотношение белка и жира в готовом продукте определено на уровне 1:(1,0 ± 0,3). При создании продуктов лечебно-профилактического назначения основным требованием является разработка рецептуры, содержащей достаточное количество белка с незаменимыми аминокислотами, а также жировую часть, соответствующую справочной шкале ФАО/ВОЗ по содержанию жирных кислот. В результате экспериментальных исследований доказано, что внесение йодсодержащих компонентов улучшает влагоудерживающую способность, структурную стабильность и органолептические показатели продукта. При этом уровень сохранения органического йода в готовом продукте находится в пределах 45-60%. Предложенные рецептуры повышают пищевую и биологическую ценность вареных колбасных изделий и рекомендуются в качестве функционально-диетического продукта, эффективного для профилактики йододефицита.

Ключевые слова: *мясо и мясные продукты, дефицит йода, аминокислотный состав, функционально-технологические характеристики, сбалансированное питание.*

B.K. Asenova
Shakarim University,
071412, Republic of Kazakhstan, Semey, Glinki Street, 20 A
e-mail: asenova.1958@mail.ru

TECHNOLOGY FOR THE PRODUCTION OF MEAT SAUSAGE PRODUCTS ENRICHED WITH IODINE

Diseases associated with iodine deficiency are currently among the most widespread endemic disorders worldwide. This condition poses a significant threat to public health, contributing to an increase in thyroid gland pathologies, including a higher incidence and severity of goiter. The issue is particularly relevant for the Abai region and other areas of Kazakhstan, where comprehensive measures are required to improve the overall health of the population. One of the effective ways to address this problem is the development and production of new types of iodine-enriched meat products, which help prevent and treat iodine deficiency. In this regard, optimizing the formulation of cooked sausage products and incorporating seaweed (Laminaria) and the «Iodoactiv» food supplement – both sources of organic iodine – represent an important and promising direction in improving dietary nutrition and strengthening public health. During the study, the mathematical modeling method (linear programming) was applied, and the optimal ratio of protein to fat in the finished product was determined to be 1:(1.0±0.3). When developing therapeutic and preventive food products, the main requirement is to design a formulation that provides a sufficient amount of protein containing essential amino acids and a fatty acid composition close to the reference scale recommended by FAO/WHO. Experimental studies have shown that the addition of iodine-containing components improves the product's water-holding capacity, structural stability, and organoleptic properties. Furthermore, the retention rate of organic iodine in the finished product ranges from 45-60%. The proposed recipes enhance the nutritional and biological value of cooked sausages and are recommended as a functional dietary product effective for the prevention of iodine deficiency.

Key words: *meat and meat products, iodine deficiency, amino acid composition, functional and technological characteristics, balanced nutrition.*

Авторлар туралы мәліметтер

Бахыткуль Кажкенқызы Асенова – техника ғылымдарының кандидаты, «Тамақ технологиясы» кафедрасының профессоры, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: asenova.1958@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-8707-9725

Сведения об авторах

Бахыткуль Кажкеновна Асенова – кандидат технических наук, профессор кафедры «Пищевая технология», Шакарим университет, Республика Казахстан; e-mail: asenova.1958@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-8707-9725.

Information about the authors

Bakhytkul Asenova – Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of Food Technology, Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: asenova.1958@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-8707-9725.

Редакцияға енуі 13.06.2025
Өңдеуден кейін түсуі 11.11.2025
Жариялауға қабылданды 26.11.2025

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-32

ҒТАХР: 65.59.29

CC BY 4.0
Check for updates

М.А. Жамантай*, С.А. Карденов, А.Е. Қайыркелді
С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті
010011, Қазақстан Республикасы, Астана қаласы, Жеңіс көшесі, 62

ИТМҰРЫН ҰНТАҒЫНЫҢ ҚҰС ЕТТЕРІНЕН ЖАСАЛҒАН КОТЛЕТТЕРДІҢ ТҮСІНЕ ӘСЕРІ

Аңдатпа: *Бұл мақалада құс еттерінің түс қалыптасуына маңызды рөл атқаратын миоглобин пигментіне өсімдік текті қоспаның әсері эксперименттік тұрғыда бағаланды. Зерттеу жұмысы барысында төрт түрлі құс еті негізінде тәжірибелік үлгілер дайындалып, олардың әрқайсысына екі түрлі үлгілер дайындалды. Біріншісінде тек нитрит тұзы пайдаланылса, екіншісінде*

©М.А. Жамантай, С.А. Карденов, А.Е. Қайыркелді, 2026

нитрит тұзы итмұрын ұнтағымен бірге қосылды. Өсімдік текті қоспа миоглобиннің күйіне және еттің түсіне өз ықпалын салыстырмалы түрде анықтауға мүмкіндік берді.Тәжірибелер колориметриялық талдау әдістерін қолдану арқылы жүргізіліп, ет үлгілерінің негізгі түс көрсеткіштері анықталды. Зерттеу нәтижелері итмұрын ұнтағы қосылған үлгілерде қызыл түстің қарқындылығының сақталуы және түс тұрақтылығының артуы байқалғанын көрсетті. Сонымен қатар, өсімдік текті қоспаның антиоксиданттық қасиеттері миоглобиннің тотығу үдерістерін баяулатып, еттің сыртқы көрінісін жақсартуға ықпал ететіні анықталды. Өсімдік текті қоспаны пайдалану миоглобиннің тотығу-тотықсыздану күйін және еттің түстік көрсеткіштерін салыстырмалы түрде бағалауға мүмкіндік берді. Зерттеулер колориметриялық талдау әдістерін қолдану арқылы жүргізіліп, Munsell, XYZ және CIELab жүйелері бойынша түстің өзгерістері анықталды. Алынған нәтижелер итмұрын ұнтағы қосылған қаз және үйрек еттерінде түсі қызыл аймаққа ығысқан, жарықтылықтың төмендеуі (V = 4,4-5,8) миоглобин концентрациясының жоғары болуымен түсіндіріледі. Ал бройлер мен күркетауық еттері қызғылт-сары аймаққа ығысып, жарықтылық көрсеткіштерінің жоғарылағаны (V = 7,5-7,8) байқалды. Бұл түстің өзгеруі мен жарықтылықтың өзгеруі нитритті тұз бен итмұрын ұнтағын қолданудың әсерінен болатын өзгерістерді дәлелдейді.

Түйінді сөздер: *құс еті, миоглобин, нитрит тұзы, итмұрын ұнтағы, ет түсі, колориметриялық талдау, түс қанықтығы, тональдік ығысу.*

Кіріспе

Құс етінен дайындалатын өнімдер ет өңдеу саласында кең таралған және олардың өндіріс көлемі жыл сайын артып келеді. Бұл құбылыс құс етінің жоғары тағамдық құндылығымен, ақуыздық құрамының теңгерімділігімен және технологиялық өңдеуге қолайлы болуымен байланысты. Құс етінен алынатын жартылай фабрикаттардың сапасын бағалауда негізгі көрсеткіштердің бірі – өнімнің сыртқы түрі, әсіресе түс сипаттамалары болып табылады. Түс көрсеткіші тұтынушының өнімді қабылдауына тікелей әсер етіп, өнімнің балғындығы мен технологиялық дұрыстығының индикаторы ретінде қарастырылады.

Әдеби деректерде құс етінің түсі бұлшықет тініндегі миоглобин мөлшеріне және оның химиялық күйіне тәуелді екені көрсетілген. Әртүрлі құс түрлерінде миоглобин концентрациясы айтарлықтай өзгереді, бұл олардың физиологиялық белсенділігімен және бұлшықет талшықтарының типімен байланысты. Жаринов А.И. және әріптестерінің зерттеулерінде су құстарына жататын қаз бен үйрек етінде миоглобин мөлшерінің жоғары болуы олардың етінің қою түсті болуына әкелетіні, ал бройлер балапаны мен күркетауық етінде миоглобин аз болғандықтан түсі ашығырақ сипат алатыны атап өтіледі [1].

Жалпы ет өнімдерін өңдеу барысында түс тұрақтылығын қамтамасыз ету үшін нитрит тұзы кеңінен қолданылады. Нитрит миоглобинмен әрекеттесіп, тұрақты қызғылт,қызыл түске ие нитрозилмиоглобин түзеді, бұл дайын өнімнің визуалды тартымдылығын арттырады. Сонымен қатар нитриттің әсері тотығу үдерістерін баяулатып, өнімнің сақтау кезінде түсінің өзгеруін шектейді [2, 3]. Алайда нитрит тұздарының қолданылуы қауіпсіздік талаптарымен шектелетіндіктен, олардың мөлшерін азайту немесе әсерін күшейту жолдарын іздеу өзекті болып отыр.Әртүрлі құс еттерінде нитрит тұзы мен итмұрын ұнтағының әсерін зерттеу, миоглобиннің және түс көрсеткіштерінің өзгеруін колориметриялық әдістер арқылы бағалау ғылыми және практикалық тұрғыдан маңызды болып табылады. Мұндай зерттеулер құс етінен дайындалатын жартылай фабрикаттардың сапасын арттыруға, сондай-ақ табиғи өсімдік текті қоспаларды қолдану мүмкіндігін ғылыми негіздеуге мүмкіндік береді.

Зерттеулер көрсеткендей, мұндай өсімдік текті қоспалар құрамындағы фенолды қосылыстар, флавоноидтар және органикалық қышқылдар арқылы ет өнімдерінде айқын антиоксиданттық және антимикробиологиялық әсер көрсете алады. Атап айтқанда, жалбыз (Mentha piperita L.) жапырақтарынан алынған спирттік және су-спирттік экстракттар липидтердің тотығуын тежеп, сақтау барысында пероксидтік санның өсуін баяулататыны анықталған. Сонымен қатар, бұл экстракттар микрофлораның дамуын шектеп, салқындатылған және мұздатылған ет жартылай фабрикаттарының сақтау тұрақтылығын арттырған [4]. Бұл қасиет әсіресе құс етінен дайындалатын рубленген өнімдерде, соның ішінде котлеттерде, түстің тұрақсыздығы мен өнім сапасының төмендеуін болдырмау үшін маңызды болып саналады [5].

Дәрілік өсімдіктердің (шалфей, түймедақ, қалақай, жалбыз) су және спирттік экстракттарын қолдану фарш жүйесінің физико-химиялық көрсеткіштеріне де оң ықпал ететіні дәлелденген. Атап айтқанда, экстракттардың енгізілуі фарштың pH көрсеткішін

тұрақтандырып, суды ұстап тұру қабілетін арттырған, бұл өз кезегінде дайын өнімнің құрылымдық беріктігі мен шырындылығын қамтамасыз етеді [6]. Мұндай функционалды-технологиялық артықшылықтар котлеттерді қалыптау, термиялық өңдеу және сақтау кезеңдерінде өнім сапасының тұрақтылығын сақтауға мүмкіндік береді.

Өсімдік текті қоспаларды қолдану құс етінен дайындалған котлеттердің рецептурасын жетілдіруде де тиімді болып табылады. Мысалы, көкөніс және өсімдік шикізаттарын қосу өнімнің органолептикалық қасиеттерін жақсартып, дәмдік үйлесімділікті арттырады, сонымен қатар дайын өнімнің түсінің табиғилығын сақтауға ықпал етеді [7]. Бұл бағыттағы зерттеулер құс етінен жасалатын функционалды тағам өнімдерін әзірлеудің ғылыми негізін кеңейтеді.

Итмұрын (Rosa canina L.) жемістерінен алынған құрғақ ұнтақтың құрамында аскорбин қышқылының, каротиноидтардың және фенолды қосылыстардың жоғары мөлшері бар екені ғылыми тұрғыда дәлелденген [8]. Бұл биологиялық белсенді заттар ет өнімдерінде тотығу процестерін тежеуге қабілетті табиғи антиоксиданттар ретінде әрекет етеді. Итмұрын ұнтағын құс етінен дайындалған рубленген котлеттердің құрамына енгізу түстік тұрақтылықты арттырып, сақтау барысында сапалық көрсеткіштердің төмендеуін баяулатады [9].

Зерттеу әдістері мен нысандары

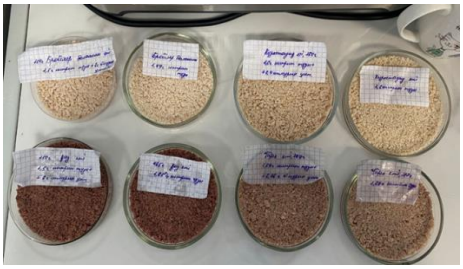
Зерттеу нысандары ретінде бройлер балапаны еті «Алель» өндіруші кәсіпорнынан, күркетауық еті «Пава-Пава» өндіруші кәсіпорнынан, үйрек еті «Кус Вкус» өндіруші кәсіпорнынан, қаз еті «Петропавл Мясо-Ет» өндіруші кәсіпорнынан, котлеттерге енгізілетін итмұрын ұнтағы (ТШ 11.07.19-019-22085818-2021 құжаттамасы бойынша сақтау шарттары 25℃ жоғары емес температурада, сақтау мерзімі 24 ай, шығарылған орны ЖШС «Вокруг Света» Ресей) мен нитрит тұзы 0,6% 1кг тартылған етке 10 г қосылады (шығарылған орны ААҚ «Мозырьсоль» Беларусь, сақтау шарттары герметикалық ыдыста, сақтау мерзімі 24 ай) пайдаланылды. Екі үлгі дайындалды: бақылау үлгісі нитрит тұзымен, зерттелетін үлгі нитрит тұзы мен итмұрын ұнтағы қосылған.

Зерттеу әдістері

Шикізатты қабылдау МемСТ 32607-2013 «Тауық еті жеткізу талаптары және сапа бақылауы», үйрек еті МемСТ 31990-2012, қаз еті МемСТ 33816-2016, күркетауық еті МемСТ 31473-2012 осы нормативтік құжаттар бойынша жүргізіледі [10-13]. Дайындалған құс етінен жасалған котлет үлгілерінің түстік сипаттамаларын анықтау мақсатындаколориметриялық талдау жүргізілді. Зерттеу барысында өнімнің түс көрсеткіштері Жапонияда жасалғанMinolta CR-400 колориметр көмегімен өлшенді. Өлшеу жүргізер алдында құрылғы стандарт арқылы калибрленді. Әр үлгіден массасы 70±90 г болатын бөлік алынып, біртекті консистенцияға дейін ұсақталды. Құрылғы үлгіге орналастырылып, сенсор бетімен толық жанасуы қамтамасыз етілді.

Зерттеу нәтижелері

Колориметриялық талдау бойынша 8 үлгіні өлшеу арқылы алты көрсеткіш анықталды.Түстің қанығуы (C*), тональдік ығысуы (H*) және интегралды түс айырмасы (ΔE*) есептелді. 1-суретте анализге дайындалған котлеттердің ұсақталған түрі көрсетілген.



Сурет 1 – 4 түрлі құс еттінен жасалған котлеттердің анализге ұсақталған түрі

Анализге дайындалған котлет үлгілерінің құрамы 1-кестеде көрсетілген.

Нитрит тұзы барлық үлгілерде ет массасының 1,0% мөлшерінде қолданылды. Бұл деңгей ет өнімдерінде түс қалыптастыру және микробиологиялық тұрақтылықты қамтамасыз ету үшін технологиялық тұрғыдан негізделген мөлшер болып табылады. Нитрит тұзының біркелкі енгізілуі барлық үлгілер арасында салыстырмалы талдау жүргізуге мүмкіндік берді.
Тәжірибелік үлгілерге итмұрын ұнтағы ет массасының 4 % мөлшерінде қосылды. Бұл мөлшер өсімдік текті қоспаның өнім құрылымына айқын әсерін бағалауға жеткілікті деңгейде таңдалды.

Кесте 1 – Котлет үлгілерінің құрамы

Құс түрі	Үлгі	Котлет салмағы	Нитрит тұзы (г)	Итмұрынұнтағы (г)
Бройлер балапаны	1. Бақылау (нитрит тұзымен)	70	0,7	-
	2. Тәжірибелік (нитрит тұзы + итмұрын ұнтағы)	75	0,75	3
Қаз	3. Бақылау (нитрит тұзымен)	80	0,8	-
	4. Тәжірибелік (нитрит тұзы + итмұрын ұнтағы)	85	0,85	3,4
Күркетауық	5. Бақылау (нитрит тұзымен)	70	0,7	-
	6. Тәжірибелік (нитрит тұзы + итмұрын ұнтағы)	75	0,75	3
Үйрек	7. Бақылау (нитрит тұзымен)	80	0,8	-
	8. Тәжірибелік (нитрит тұзы + итмұрын ұнтағы)	90	0,9	3,6

Кесте 2 – Munsell жүйесі бойынша түстік сипаттамалар (H,V, C)

Көрсеткіш	1-ші үлгі	2-ші үлгі	3-ші үлгі	4-ші үлгі	5-ші үлгі	6-шы үлгі	7-ші үлгі	8-ші үлгі
H	8,7 YR	9,5 YR	1,1 YR	1,4 YR	8,8 YR	0,8 Y	4,6 YR	5,9 YR
V	6,1	7,8	4,5	4,4	7,5	7,6	5,4	5,8
C	**1,9**	**2,4**	**4,1**	**4,1**	**3,0**	**2,4**	**3,7**	**3,6**

Итмұрын ұнтағы құрамындағы табиғи пигменттер, антиоксиданттық белсенділігі жоғары биологиялық қосылыстар өнімнің түстік және функционалдық қасиеттерін жақсартуға бағытталды. Келесі кестелерде түс нәтижелері көрсетілген. 2-кестеде ұсынылған деректер зерттелген үлгілердің түс тоны (H), жарықтылығы (V) және қанықтылығы (C) бойынша айырмашылықтарын сипаттайды.

3-кестеде XYZ түстік кеңістігі бойынша координаталардың өзгерісі келтірілген. Бақылау үлгілерінде ΔX, ΔY және ΔZ мәндерінің теріс бағытта ауытқуы түстің күңгірттену үдерістерінің қарқынды жүргенін көрсетеді. Ал итмұрын ұнтағы қосылған тәжірибелік үлгілерде координаталардың оң мәндерге ауысуы дәлелдейді.

Кесте 3 – XYZ түстік кеңістігі координаталарының өзгерісі

Көрсеткіш	1-ші үлгі	2-ші үлгі	3-ші үлгі	4-ші үлгі	5-ші үлгі	6-шы үлгі	7-ші үлгі	8-ші үлгі
ΔX	−14,15	+9,56	−27,70	−28,97	+5,32	+5,72	−20,69	−16,60
ΔY	−16,27	+10,64	−29,13	−30,34	+5,75	+7,21	−21,61	−17,31
ΔZ	−4,84	+11,34	−25,83	−27,15	+4,08	+7,10	−20,40	−17,02

4-кестеде берілген Δx және Δy көрсеткіштері түстің хроматикалық ығысу дәрежесін сипаттайды. Өзгеріс шамалы болғандығын білдіреді және өсімдік текті қоспаның антиоксиданттық қасиеті байқалады.

Кесте 4 – Хроматикалық координаталардың өзгерісі

Көрсеткіш	1-ші үлгі	2-ші үлгі	3-ші үлгі	4-ші үлгі	5-ші үлгі	6-шы үлгі	7-ші үлгі	8-ші үлгі
ΔY	−16,17	+10,64	−29,13	−30,34	+5,75	+7,21	−21,61	−17,31
Δx	−0,0153	−0,0109	+0,0422	+0,0483	−0,0007	−0,0099	+0,0271	+0,0214
Δy	−0,0331	−0,0025	−0,0045	−0,0020	+0,0031	+0,0014	+0,0051	+0,0066

5-кестеде CIELab жүйесі бойынша анықталған түстік айырмашылықтар келтірілген. ΔL* көрсеткіштері жарықтылықтың өзгерісін, ал Δa* және Δb* мәндері түстің қызыл-жасыл және сары-көк компоненттерінің ауытқуын сипаттайды.

Кесте 5 – CIELab жүйесі бойынша түстік айырмашылықтар

Көрсеткіш	1-ші үлгі	2-ші үлгі	3-ші үлгі	4-ші үлгі	5-ші үлгі	6-шы үлгі	7-ші үлгі	8-ші үлгі
ΔL*	−11,84	+6,53	−26,21	−27,87	+3,64	+4,53	−17,49	−13,33
Δa*	+5,86	−2,90	+9,33	+10,25	−1,24	−4,01	+5,06	+3,50
Δb*	−13,66	−1,32	−1,03	−0,22	+1,49	−0,03	+1,37	+2,00
ΔE*	**19,00**	**7,27**	**28,05**	**29,69**	**4,13**	**6,06**	**18,26**	**13,93**

6-кестеде есептелген ΔL, Δa, Δb және ΔE мәндері үлгілер арасындағы түстік айырмашылықтың сандық сипаттамасын нақтылай түседі.

Кесте 6 – CIELab жүйесі бойынша есептелген түстік айырмашылықтар

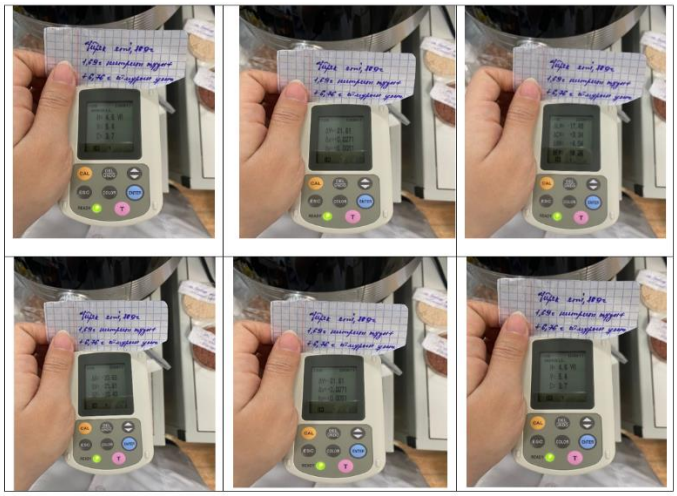
Көрсеткіш	1-ші үлгі	2-ші үлгі	3-ші үлгі	4-ші үлгі	5-ші үлгі	6-шы үлгі	7-ші үлгі	8-ші үлгі
ΔL	−13,06	+7,53	−27,34	−28,90	+4,16	+5,19	−18,78	−14,50
Δa	+5,24	−2,64	+7,47	+7,59	−1,09	−3,72	+3,87	+2,70
Δb	−10,64	−0,41	−3,34	−3,08	+1,45	+0,17	−0,95	−0,07
ΔE	**17,64**	**7,99**	**28,54**	**30,04**	**4,54**	**6,38**	**19,19**	**14,75**

7-кестеде түстің қанықтылығы (ΔC*) мен тональдік ығысуының (ΔH*) өзгерістері көрсетілген. Тәжірибелік үлгілерде ΔC* мәндерінің оң болуы түстің қанық сақталғанын, ал ΔH* көрсеткіштерінің салыстырмалы түрде төмен болуы тональдік ауытқудың шектелгенін көрсетеді.

Кесте 7 – Түстің қанықтылығы мен тональдік ығысуы

Көрсеткіш	1-ші үлгі	2-ші үлгі	3-ші үлгі	4-ші үлгі	5-ші үлгі	6-шы үлгі	7-ші үлгі	8-ші үлгі
ΔL*	−11,84	+6,53	−26,21	−27,87	+3,64	+4,53	−17,49	−13,33
ΔC*	−13,33	−1,98	+4,39	+5,19	+1,11	−1,15	+3,34	+3,17
ΔH*	−6,58	+2,50	−8,97	−8,84	+1,60	+3,86	−4,04	−2,49
ΔE*	**19,00**	**7,27**	**28,05**	**29,69**	**4,13**	**6,06**	**18,26**	**13,93**

2-суретте мысал ретінде итмұрын ұнтағы мен нитрит тұзы қосылған, үйрек етінен жасалған котлеттің 6 түрлі колориметриялық көрсеткіштері көрсетілген.



Сурет 2 – Бір үлгіден 6 түрлі колориметриялық көрсеткіштер

Осылайша кестедегі түс сипаттамаларының мазмұны 8-кестеде көрсетілген.

Колориметриялық талдау нәтижелері бойынша, итмұрын ұнтағының құс етіне қосылуы өнімнің түсін айтарлықтай өзгертеді. Оның қанықтылығын арттырады және түсін өзгерткенін анықтадық. Ең үлкен өзгеріс қаз және үйрек – жоғары миоглобин, қызыл спектрдің айқын ығысуы, NO-миоглобин түзілуі. Қаз ең қанық, қою қызыл түсті, ΔE* = 28-30. Итмұрын әсері миоглобиннің NO-формасына тез айналуын қамтамасыз еткен.

Масса айырмашылығы шикізаттың морфологиялық ерекшеліктерімен және өнімнің технологиялық қалыптасуымен түсіндірілді. Сонымен қатар, итмұрын ұнтағы енгізілген тәжірибелік үлгілерде масса көрсеткішінің сәл жоғарылауы өсімдік текті қоспаның су байланыстыру қабілетімен байланысты болды.Үлгілерді дайындау кезінде барлық компоненттер біркелкі араластырылып, стандартталған технологиялық режимдер сақталды. Бұл тәсіл зерттеу нәтижелерінің дәлдігі мен қайталанғыштығын қамтамасыз етуге мүмкіндік берді және алынған колориметриялық көрсеткіштердің рецептуралық құраммен тікелей байланысын анықтауға жағдай жасады.

Кесте 8 – Көрсеткіш мәндері

Көрсеткіш	Мағынасы	Ғылыми интерпретация	Үлгілер бойынша нәтижелер
H (Hue)	Түс тональдігі	H төмендегенде – спектрдің қызыл аймағына конвергенция; H жоғарылаған кезде – сары аймаққа таралуы	Қаз және үйрек: H = 1-4 YR → қызыл аймаққа айқын ығысу. Бройлер мен күркетауық: H = 8-9 YR → қызғылт-сары аймаққа ығысу.
V (Value)	Түс жарықтық деңгейі	V төмендегенде – оптикалық тығыздық артады; V жоғарылаған кезде – оптикалық шағылысу үлкейеді	Қаз және үйрек: V = 4,4-5,8 → жарықтықтың төмендеуі (миоглобин концентрациясы жоғары). Бройлер мен күркетауық: V = 7,5-7,8 → оптикалық шағылыстыру жоғары.
C (Chroma)	Түс қанығуы	C жоғарылаған сайын – түс қанығу индексі өседі; C төмендегенде – спектралдық қанығу әлсірейді	Қаз және үйрек: C = 3,7-4,1 → спектралдық қанығу жоғары. Бройлер: C = 1,9-2,4 → қанығуы төмен, түс әлсіреген.
ΔX	Қызыл-жасыл арна компоненті	Теріс мән: спектрдің қараңғы аймағына энергетикалық ығысу; оң мән: шағылу қарқындылығының артуы	Қаз және үйрек: ΔX = –20…–29 → спектралдық энергияның төмендеуі. Бройлер: ΔX = +9,56 → шағылу артуы.
ΔY	Ашық	Теріс мән – жарық энергиясының азаюы, оң мән – оптикалық ағару	Қаз және үйрек: ΔY = –17…–30 → жарық энергиясының ең үлкен редукциясы. Күркетауық, бройлер: ΔY = +5…+10 → ағару эффектісі.
ΔZ	Көк–сары компонент	Теріс мән – спектрдің қызыл-көк аймағына ығысу	Қаз және үйрек: ΔZ = –25…–27 → қою қызыл аймаққа спектралдық ығысу.
Δx	Хроматикалық ось (қызыл-жасыл спектр)	+Δx – қызыл спектрлік аймаққа векторлық ығысу; –Δx – жасыл аймаққа ығысу	Қаз: Δx = +0,04…+0,048 → қызыл спектрге ең үлкен векторлық ығысу. Бройлер: Δx = –0,015 → спектрдің "суық" аймағына қарай ығысу.
Δy	Хроматикалық ось (сары-көк спектр)	+Δy – сары компонентке акценттеледі; –Δy – көк-қызыл аймағына ығысу	Бройлер: Δy = –0,033 → спектрдің қызыл-көк аймағына жақындау. Үйрек: Δy = +0,005-0,006 → сәл сары бағытқа ауысу.
ΔL*	Жарықтық индексі	–ΔL* → оптикалық қараңғылану; +ΔL* → материалдың оптикалық ашықтығы артады	Қаз: ΔL* = –26…–28 → максималды оптикалық қараңғылану. Бройлер: ΔL* = +6,5 → ашықтық жоғарылады.
Δa*	Спектрдің қызыл-жасыл осі	+Δa* → қызыл спектрге интенсификация; –Δa* → жасыл компоненттің артуы	Қаз: Δa* = +9…+10 → қызыл спектр интенсивтілігі жоғары. Бройлер: Δa* = –2,9 → қызыл компоненттің төмендеуі.
Δb*	Спектрдің сары-көк осі	+Δb* → сары компоненттің күшеюі; –Δb* → қызыл-көк аймаққа ығысу	Бройлер: Δb* = –13,66 → қызыл-көк аймаққа айқын ығысу. Күркетауық: Δb* = +1,49 → жеңіл сары акцент.
ΔE*	Түс айырмасының интегралды индексі	>10 – айқын өзгеріс; >20 – радикалды жылжу	Қаз: ΔE* = 28-30 → ең жоғары өзгеріс. Үйрек: ΔE* = 18 → айқын жылжу. Бройлер: ΔE* = 7-19 → орташа өзгеріс.
ΔL	Жарықтық	Теріс мән – оптикалық редукция	Қаз және үйрек: ΔL = –18…–28 → айқын редукция.
Δa	Қызыл спектр аймағы	+Δa – қызыл спектр энергиясының күшеюі	Қаз: Δa = +7,4…+7,5.
Δb	Сары/көк компонент	Теріс мән – спектрдің қызыл аймағына қисаюы	Бройлер: Δb = –10,64.
ΔC*	Түс қанығуының өзгерісі	+ΔC* – хроматикалық қанығудың артуы	Қаз: ΔC* = +4,39…5,19 → қанығудың айқын өсуі.
ΔH*	Тональді ығысу	–ΔH* – спектрдің қызыл аймағына бағытталған ығысу	Қаз: ΔH* = –8,84…–8,97 → қызыл спектрге күшті ығысу.
ΔE*	Түс өзгерісінің интегралды көрсеткіші	Барлық компоненттердің векторлық қосындысы	Қаз және үйрек – ең үлкен тіркелген өзгеріс.

Munsell жүйесі бойынша жүргізілген түстік талдау нәтижелері 2-кесте зерттелген үлгілер арасында айқын айырмашылықтардың бар екенін көрсетті. Барлық үлгілердің түс негізінен YR (Yellow-Red) аймағында орналасып, құс етінен дайындалған рубленген өнімдерге тән сары-қызғылт тондардың басым екенін көрсетті. Hue (H) көрсеткіші 0,8 Y-9,5 YR аралығында өзгеріп, 3-ші және 4-ші үлгілерде түстің қызғылт бағытқа ығысуы байқалды, бұл өңдеу немесе қоспа құрамының әсерімен түс пигменттерінің өзгеруімен байланысты болуы мүмкін.

Value (V) параметрі бойынша ең төмен жарықтық 3-ші (4,5) және 4-ші (4,4) үлгілерде тіркеліп, бұл үлгілердің визуалды түрде күңгірттенгенін көрсетеді. Керісінше, 2-ші, 5-ші және 6-шы үлгілерде V мәндерінің жоғары болуы (7,5-7,8) түстің ашық әрі тұрақты екенін дәлелдейді. Chroma (C) көрсеткіші 3-ші және 4-ші үлгілерде ең жоғары (4,1) болып, түстің қанықтылығы артқанын, ал 1-ші үлгіде төмен мән (1,9) байқалып, әлсіз боялғанын көрсетті.

XYZ түстік кеңістігі координаталарының өзгерісі 3-кесте түстің жалпы қарқындылығы мен жарықтық деңгейіндегі айырмашылықтарды нақтылады. 3-ші және 4-ші үлгілерде ΔX, ΔY және ΔZ координаталарының айқын теріс мәндері (−27,70…−30,34) түстің едәуір күңгірттенуін және жарық шағылысуының төмендеуін көрсетеді. Ал 2-ші, 5-ші және 6-шы үлгілерде координаталардың оң мәндері тіркеліп, бұл үлгілерде түстік тұрақтылықтың жоғары екенін және өңдеу барысында түс пигменттерінің сақталғанын білдіреді.

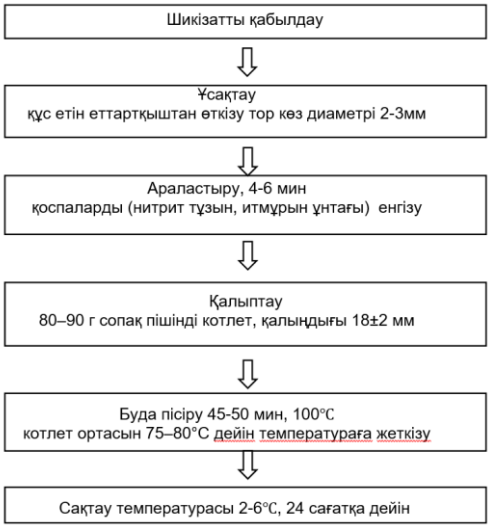
Хроматикалық координаталар өзгерісі 4-кестеде түстің тональдік ығысу сипатын көрсетті. 3-ші, 4-ші, 7-ші және 8-ші үлгілерде Δx және Δy мәндерінің оң бағытта өзгеруі сары-қызыл түстің күшеюін айқындады. Бұл құбылыс табиғи өсімдік текті қоспалардың немесе тотығу процестерінің әсерінен меланоидиндер мен каротиноидты пигменттердің белсенуімен байланысты болуы мүмкін.

CIELab жүйесі бойынша алынған нәтижелер 5-кестеде түстік айырмашылықтардың визуалды қабылдануын бағалауға мүмкіндік берді. ΔL* мәндерінің 3-ші және 4-ші үлгілерде айқын теріс болуы (−26,21 және −27,87) бұл үлгілердің айтарлықтай қарайғанын көрсетсе, 5-ші және 6-шы үлгілерде ΔL* оң мәндерге ие болып, жарықтану байқалды. Δa* параметрі 3-ші және 4-ші үлгілерде жоғары болып, қызғылт түстің күшеюін дәлелдейді, ал Δb* көрсеткіштері барлық үлгілерде сары тонның басым екенін растады.

Жалпы түстік айырмашылық ΔE* бойынша ең жоғары мәндер 3-ші (28,05) және 4-ші (29,69) үлгілерде тіркеліп, бұл үлгілердің бақылау нұсқасынан визуалды түрде айқын ерекшеленетінін көрсетеді. Керісінше, 5-ші және 6-шы үлгілерде ΔE* мәндерінің төмен болуы (4,13–6,06) түстің тұрақты сақталғанын және тұтынушы үшін көзге жағымды екенін білдіреді.

CIELab жүйесі бойынша есептелген түстік айырмашылықтар 6-кесте мен түстің қанықтылығы және тональдік ығысуы 7-кестеден алынған деректерді толықтырды. 3-ші және 4-ші үлгілерде ΔC* және ΔH* көрсеткіштерінің жоғары болуы түстің қанық әрі тұрақсыз екенін, ал 5-ші және 6-шы үлгілерде бұл мәндердің салыстырмалы түрде төмен болуы өнімнің түс сапасының технологиялық тұрғыдан қолайлы екенін көрсетті.

Жалпы алғанда, колориметриялық талдау нәтижелері зерттелген үлгілер арасында түстік тұрақтылық пен қанықтылық бойынша айқын айырмашылықтардың бар екенін көрсетті. 5-ші және 6-шы үлгілер түстік көрсеткіштердің теңгерімділігімен және төмен ΔE мәндерімен ерекшеленіп, құс етінен дайындалған котлет өнімдері үшін визуалды сапасы жоғары нұсқалар ретінде бағаланды. Котлет жаусау кезеңдері 1-сұлбада көрсетілген.



Сұлба 1 – Өсімдік текті қоспаны қолдану арқылы құс етінен котлет жасау технологиясы

Зерттеу барысында қолданылған котлет үлгілерінің құрамы 9-кестеде берілген.

Кесте 9 – Котлет құрамы

Құс түрі	Үлгі	Филе (г)	Нитрит тұзы (г)	Итмұрынұнтағы (г)
Бройлер балапаны	1. Бақылау (нитрит тұзымен)	149	1,49	-
	2. Тәжірибелік (нитрит тұзы + итмұрын ұнтағы)	150	1,5	6
Қаз	3. Бақылау (нитрит тұзымен)	165	1,65	-
	4. Тәжірибелік (нитрит тұзы + итмұрын ұнтағы)	150	1,5	6
Күркетауық	5. Бақылау (нитрит тұзымен)	160	1,6	-
	6. Тәжірибелік (нитрит тұзы + итмұрын ұнтағы)	160	1,6	6,4
Үйрек	7. Бақылау (нитрит тұзымен)	167	1,67	-
	8. Тәжірибелік (нитрит тұзы + итмұрын ұнтағы)	169	1,69	6,76

Ғылыми нәтижелерді талқылау

Колориметриялық талдау кезінде 8 түрлі үлгіден 6-6-дан түс көрсеткіштері анықталды. Итмұрын ұнтағының қосылуы түс қанықтығын арттырып, өнімнің органолептикалық қасиеттерін жақсартты. Үлгілердегі түстің қанықтылығы (C) және хроматикалық координаттар (ΔC* = 4,39-5,19) көрсеткендей, ет өнімдерінің түсі қанығырақ болды. Сонымен қатар, нитритті тұздың қосылуы ет өнімдерінің түсін сақтауға және олардың микробиологиялық тұрақтылығын арттыруға ықпал етті.

Қаз және үйрек еттерінде ΔE* көрсеткіші 28-30 арасында болды, бұл еттің түстегі айтарлықтай өзгерістерді көрсетеді. Бройлер мен күркетауық еттерінде ΔE* көрсеткіші 7-19 аралығында болды, яғни орташа деңгейдегі түстің өзгеруі байқалды. Бұл нәтижелер нитритті тұз бен итмұрын ұнтағымен өңделген еттің органолептикалық қасиеттерінің жақсарғанын көрсетеді.

Итмұрын ұнтағын қосу туралы басқа зерттеу нәтижелері бойынша ет-өсімдік паштетініңорганолептикалық қасиеттеріне маңызды әсер етеді. Оның түсін, құрылымын және дәмін жақсартады. Бұл итмұрын құрамындағы табиғи антиоксиданттардың әсерінен өнімнің сапасы мен сақталуына ықпал етеді. Колориметриялық талдау нәтижелері өнімнің түсі мен қанықтылығында айтарлықтай өзгерістер болғанын көрсетті, бұл Скрипникова және Лещукова (2021) зерттеулерінде расталған, олардың айтуынша, өсімдік қосымшалары ет өнімдерінің функционалды-технологиялық қасиеттері мен түсін жақсартуға мүмкіндік береді [14].

Сонымен қатар, нитритті тұзды осы технологияда қолдану тек түсті сақтау және микробиологиялық белсенділікті болдырмау тұрғысынан ғана емес, өндіріс технологиясын оңтайландыру мақсатында да тиімді екені дәлелденді. Мисунов пен Лагутин (2020) өз зерттеулерінде нитриттер мен өсімдік қосымшаларын комбинацияда қолдану өнімнің түсін тұрақтандырып, оның құрылымын жақсартатынын атап өтті. Бұл өз кезегінде өнімнің тұтынушылар үшін тартымдылығын арттырады [15].

Итмұрын ұнтағын қосу паштет өнімдерін витаминдер мен минералдармен байытуға мүмкіндік береді, олардың қоректік құндылығын арттырады. Алайда, өсімдік қосымшаларының дозасын мұқият бақылау қажет, өйткені олардың тым айқын дәмдік және түс әсері өнімнің соңғы тұтынушыға қалай қабылдануына әсер етуі мүмкін [16].

Қорытынды

Қорыта келе, ең айқын әсері миоглобині көп қаз және үйрек етінде байқалады; бройлер және күркетауықта эффект әлсіз, тек жарықтық пен қызыл түстің жеңіл артуы тіркелді. Қаз бен үйрек етінде Δa*, ΔC* және ΔE* жоғары мәндері түстің өзгеру динамикасы және миоглобинге әсері ғылыми тұрғыдан дәлелденеді.Зерттеу нәтижелері бойынша, итмұрын ұнтағымен және нитритті тұзбен өңделген ет өнімдерінің колориметриялық көрсеткіштерінде елеулі өзгерістер байқалды. Қаз және үйрек еттерінде түсі қызыл аймаққа ығысқан, жарықтылықтың төмендеуі (V = 4,4-5,8) миоглобин концентрациясының жоғары болуымен түсіндіріледі. Ал бройлер мен күркетауық еттері қызғылт-сары аймаққа ығысып, жарықтылық көрсеткіштерінің жоғарылағаны (V = 7,5-7,8) байқалды. Бұл түстің өзгеруі мен жарықтылықтың өзгеруі нитритті тұз бен итмұрын ұнтағын қолданудың әсерінен болатын өзгерістерді дәлелдейді.

Зерттеу көрсеткендей, итмұрын ұнтағын және нитритті тұзды үйлестіре қолдану ет өнімдерінің құрылымын сақтап, олардың физико-химиялық және органолептикалық қасиеттерін жақсартуға мүмкіндік береді.

Әдебиеттер тізімі

1. Жаринов А.И. Некоторые особенности производства продукции из мяса птицы / А.И. Жаринов, О.В. Кузнецова, А.А. Зимин // Мясной ряд. – 2019. – № 3 (77). – С. 24-28.
2. Honikel K.O. The use and control of nitrate and nitrite for the processing of meat products / K.O. Honikel // Meat Science. – 2008. – Vol. 78, № 1-2. – P. 68-76.
3. Mancini R.A. Current research in meat color / R.A. Mancini, M.C. Hunt // Meat Science. – 2005. – Vol. 71, № 1. – P. 100-121.
4. Влияние экстракта перечной мяты на процесс хранения мясных полуфабрикатов / А.А. Собхи и др. // Промышленные биотехнологии. – 2024. – № 2. – С. 189-198.
5. Еремеева Н.Б. Изучение антиоксидантных свойств лекарственных растений и их влияние на микробную порчу полуфабрикатов мяса, птицы и рыбы / Н.Б. Еремеева, Н.В. Макарова // Промышленные биотехнологии. – 2024. – № 1. – С. 45-53.
6. Меркулова С.Н. Изучение физико-химического состава и функционально-технологических свойств комбинированных мясных продуктов с использованием экстрактов из лекарственных растений / С.Н. Меркулова, Т.А. Козлова // Технология мясных продуктов. – 2023. – № 4. – С. 78-86.
7. Жарова А.В. Перспектива использования тыквы для совершенствования рецептуры блюда «Котлеты из индейки с хвойным картофелем» / А.В. Жарова, В.Н. Вавилова // Вестник Рязанского ГАТУ. – 2022. – № 3. – С. 12-18.
8. Шарибаев Р.Н. Обогащение мясных рубленных полуфабрикатов с использованием вторичного растительного сырья / Р.Н. Шарибаев, А.Д. Тошев // Пищевая промышленность. – 2021. – № 6. – С. 55-62.
9. Дедкова А.И. Изучение влияния сухого порошка из плодов шиповника на продуктивность цыплят-бройлеров / А.И. Дедкова, Н.Н. Сергеева // Животноводство и молочное дело. – 2020. – № 5. – С. 33-40.
10. ГОСТ 32607-2013. Мясо куриное. Требования при поставке и контроль качества. – М.: Стандартинформ, 2013. – 15 с.
11. ГОСТ 31990-2012. Мясо утки. Общие технические требования. – М.: Стандартинформ, 2012. – 12 с.
12. ГОСТ 33816-2016. Мясо гуся. Общие технические требования. – М.: Стандартинформ, 2016. – 14 с.
13. ГОСТ 31473-2012. Мясо индейки. Общие технические требования. – М.: Стандартинформ, 2012. – 16 с.
14. Скрипникова Д.П. Изучение влияния порошка плодов шиповника на химический состав и функционально-технологические свойства мясорастительных паштетов / Д.П. Скрипникова, К.А. Лещуков // Журнал сельскохозяйственных наук. – 2021. – 24, № 1. – С. 35-42.
15. Меренкова С.П. Технологическое обоснование применения растительных добавок в рецептуре мясных полуфабрикатов / С.П. Меренкова, А.А. Лукин // Технологии пищевых продуктов. – 2020. – №3. – С. 112-118.
16. Мисунов С.Н. Применение нитритной соли в технологии мясных продуктов / С.Н. Мисунов, А.М. Лагутин // Технологические науки. – 2020. – №5(19) – С. 75-82.

References

1. Zharinov A.I. Nekotorye osobennosti proizvodstva produktsii iz myasa ptitsy / A.I. Zharinov, O.V. Kuznetsova, A.A. Zimin // Myasnoi ryad. – 2019. – № 3 (77). – S. 24-28. (In Russian).
2. Honikel K.O. The use and control of nitrate and nitrite for the processing of meat products / K.O. Honikel // Meat Science. – 2008. – Vol. 78, № 1-2. – P. 68-76. (In English).
3. Mancini R.A. Current research in meat color / R.A. Mancini, M.C. Hunt // Meat Science. – 2005. – Vol. 71, № 1. – P. 100-121. (In English).
4. Vliyanie ehkstrakta perechnoi myaty na protsess khraneniya myasnykh polufabrikatov / A.A. Sobkhi i dr. // Promyshlennye biotekhnologii. – 2024. – № 2. – S. 189-198. (In Russian).

5. Eremeeva N.B. Izuchenie antioksidantnykh svoistv lekarstvennykh rastenii i ikh vliyanie na mikrobnuyu porchu polufabrikatov myasa, ptitsy i ryby / N.B. Eremeeva, N.V. Makarova // Promyshlennye biotekhnologii. – 2024. – № 1. – S. 45-53. (In Russian).
6. Merkulova S.N. Izuchenie fiziko-khimicheskogo sostava i funktsional'no-tekhnologicheskikh svoistv kombinirovannykh myasnykh produktov s ispol'zovaniem ehkstraktov iz lekarstvennykh rastenii / S.N. Merkulova, T.A. Kozlova // Tekhnologiya myasnykh produktov. – 2023. – № 4. – S. 78-86. (In Russian).
7. Zharova A.V. Perspektiva ispol'zovaniya tykvy dlya sovershenstvovaniya retseptury blyuda «Kotlety iz indeiki s khvoinym kartofeleM» / A.V. Zharova, V.N. Vavilova // Vestnik Ryazanskogo GATU. – 2022. – № 3. – S. 12-18. (In Russian).
8. Sharibaev R.N. Obogashchenie myasnykh rublennykh polufabrikatov s ispol'zovaniem vtorichnogo rastitel'nogo syr'ya / R.N. Sharibaev, A.D. Toshev // Pishchevaya promyshlennost'. – 2021. – № 6. – S. 55-62. (In Russian).
9. Dedkova A.I. Izuchenie vliyaniya sukhogo poroshka iz plodov shipovnika na produktivnost' tsyplyat-broilerov / A.I. Dedkova, N.N. Sergeeva // Zhivotnovodstvo i molochnoe delo. – 2020. – № 5. – S. 33-40. (In Russian).
10. GOST 32607-2013. Myaso kurinoe. Trebovaniya pri postavke i kontrol' kachestva. – M.: Standartinform, 2013. – 15 s. (In Russian).
11. GOST 31990-2012. Myaso utki. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya. – M.: Standartinform, 2012. – 12 s. (In Russian).
12. GOST 33816-2016. Myaso gusya. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya. – M.: Standartinform, 2016. – 14 s. (In Russian).
13. GOST 31473-2012. Myaso indeiki. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya. – M.: Standartinform, 2012. – 16 s. (In Russian).
14. Skripnikova D.P. Izuchenie vliyaniya poroshka plodov shipovnika na khimicheskii sostav i funktsional'no-tekhnologicheskie svoistva myasorastitel'nykh pashtetov / D.P. Skripnikova, K.A. Leshchukov // Zhurnal sel'skokhozyaistvennykh nauk. – 2021. – 24, № 1. – S. 35-42. (In Russian).
15. Merenkova S.P. Tekhnologicheskoe obosnovanie primeneniya rastitel'nykh dobavok v retsepture myasnykh polufabrikatov / S.P. Merenkova, A.A. Lukin // Tekhnologii pishchevykh produktov. – 2020. – №3. – S. 112-118. (In Russian).
16. Misunov S.N. Primenenie nitritnoi soli v tekhnologii myasnykh produktov / S.N. Misunov, A.M. Lagutin // Tekhnologicheskie nauki. – 2020. – №5(19) – S. 75-82. (In Russian).

М.А. Жамантай*, С.А. Карденов, А.Е. Кайыркелди
Казахский агротехнический исследовательский университет им. С. Сейфуллина,
010011, Республика Казахстан, город Астана, улица Женис, 62
*e-mail: zhamantay2002@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ПОРОШКА ШИПОВНИКА НА ЦВЕТ КОТЛЕТОВ ИЗ МЯСА ПТИЦЫ

В этой статье экспериментально оценивалось влияние смеси растительного происхождения на пигмент миоглобин, который играет важную роль в формировании цвета птицы. В ходе исследовательской работы были подготовлены экспериментальные образцы на основе четырех видов мяса птицы, для каждого из которых были подготовлены два разных образца. В первом использовалась только нитритная соль, а во втором нитритная соль добавлялась вместе с порошком шиповника. Добавка растительного происхождения позволила сравнительно определить свое влияние на состояние миоглобина и окраску мяса. Эксперименты проводились с использованием методов колориметрического анализа, определялись основные цветовые показатели образцов мяса. Результаты исследования показали, что в образцах с добавлением порошка шиповника наблюдалось сохранение интенсивности красного цвета и увеличение стабильности цвета. Кроме того, установлено, что антиоксидантные свойства смеси растительного происхождения способствуют замедлению процессов окисления миоглобина и улучшению внешнего вида мяса. Использование растительной добавки позволило провести сравнительную оценку окислительно-восстановительного состояния миоглобина и цветовых характеристик мяса. Исследования выполнялись с применением методов колориметрического анализа, в ходе которых изменения цвета оценивались по системам Munsell, XYZ и CIELab. Полученные результаты показали, что в образцах гусиного и утиного мяса с добавлением порошка шиповника цвет сместился в красную область, а снижение светлоты (V = 4,4-5,8) объясняется

более высокой концентрацией миоглобина. В то же время мясо бройлера и индейки сместилось в розово-оранжевую область, при этом было отмечено увеличение показателей светлоты (V = 7,5-7,8). Эти изменения окраски и светлоты подтверждают влияние применения нитритной соли и порошка шиповника на формирование цвета мяса.

Ключевые слова: *мясо птицы, миоглобин, нитритная соль, порошок шиповника, цвет мяса, колориметрический анализ, антиоксидантные свойства, насыщенность цвета, тональный сдвиг.*

M.A. Zhamantay*, S.A. Kardenov, A.E. Kaiyrkeldi
Kazakh agrotechnical research university named after S. Seifullin
62 Zhenis Street, Astana, Republic of Kazakhstan, 010011
*e-mail: zhamantay2002@mail.ru

THE EFFECT OF ROSEHIP POWDER ON THE COLOR OF POULTRY CUTLETS

This article experimentally evaluated the effect of a mixture of plant origin on the pigment myoglobin, which plays an important role in the color formation of poultry. During the research work, experimental samples were prepared on the basis of four different types of poultry, and two different samples were prepared for each of them. In the first, only nitrite salt was used, in the second, nitrite salt was added along with rosehip powder. The mixture of plant origin made it possible to relatively determine its influence on the state of myoglobin and the color of meat. Experiments were carried out using colorimetric analysis methods and the main color indicators of meat samples were determined. The results of the study showed that in samples with the addition of rosehip powder, there was a preservation of the intensity of the red color and an increase in color fastness. It was found that the antioxidant properties of the mixture of plant origin slow down the processes of oxidation of myoglobin and contribute to improving the appearance of meat. The use of a plant-based additive made it possible to comparatively assess the redox state of myoglobin and the color characteristics of meat. The studies were carried out using colorimetric analysis methods, and color changes were evaluated according to the Munsell, XYZ, and CIELab systems. The obtained results showed that in goose and duck meat samples with the addition of rosehip powder, the color shifted toward the red region, while the decrease in lightness (V = 4.4-5.8) is explained by a higher concentration of myoglobin. At the same time, broiler chicken and turkey meat shifted toward the pink–orange region, and an increase in lightness values (V = 7.5-7.8) was observed. These changes in color and lightness confirm the effect of using nitrite salt and rosehip powder on the formation of meat color.

Key words: *poultry meat, myoglobin, nitrite salt, rosehip powder, meat color, colorimetric analysis, antioxidant property, color saturation, tonal shift.*

Авторлар туралы мәліметтер

Меруерт Айтуғанқызы Жамантай* – «Тамақ және қайта өңдеу өндірістерінің технологиясы» кафедрасының магистранты, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана, Қазақстан Республикасы; e-mail: zhamantay2002@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-2894-0845.

Серик Аскербекович Карденов – Сейфуллин атындағы Казақ агротехникалық зерттеу университеті, «Тамақ және қайта өңдеу өндірістерінің технологиясы» кафедрасының қауымдастырылған профессор м.а., т.ғ.к., Астана, Қазақстан Республикасы; e-mail: serik.69@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9004-2903.

Арғын Ержанұлы Қайыркелді – «Тамақ және қайта өңдеу өндірістерінің технологиясы» кафедрасының магистранты, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана, Қазақстан Республикасы; e-mail: popugaevpapug@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/ 0009-0008-4494-4472.

Сведения об авторах

Меруерт Айтуганкызы Жамантай* – магистрант кафедры «Технология пищевых и перерабатывающих производств», Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Астана, Республика Казахстан; e-mail: zhamantay2002@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-2894-0845.

Серик Аскербекович Карденов – Казахский агротехнический исследовательский университет им. С.Сейфуллина, и.о. ассоциированного профессора кафедры «Технология пищевых и перерабатывающих производств», к.т.н., Республика Казахстан, город Астана; e-mail: serik.69@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9004-2903.

Аргын Ержанулы Кайыркелди – магистрант кафедры «Технология пищевых и перерабатывающих производств», Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Астана, Республика Казахстан; e-mail: popugaevpapug@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-4494-4472.

Information about the authors

Meruert Aitugankyzy Zhamantay* – Master's student of the Department of «Food Technology and Processing Products», S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Republic of Kazakhstan; e-mail: zhamantay2002@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-2894-0845.

Serik Askerbekovich Kardenov – S. Seyfullin Kazakh Agrotechnical Research University, Acting Associate Professor, Department of Technology of Food and Processing Industries, Candidate of Technical Sciences, Republic of Kazakhstan, Astana; e-mail: serik.69@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9004-2903.

Argyn Erzhanuly Kaiyrkeldi – Master's student of the Department of «Food Technology and Processing Products», S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Republic of Kazakhstan; e-mail: popugaevpapug@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-4494-4472.

Редакцияға енуі 05.01.2026
Өңдеуден кейін түсуі 16.01.2026
Жариялауға қабылданды 22.01.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-33

ҒТАХР: 65.63.91

CC BY 4.0
Check for updates

А.К. Мустафаева[1*], З. Қуанышева[1], Б. Калемшарив[1], Г.Ж. Шарикбаева[1], Г.Б. Абдилова[2]
[1]С. 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

СҮЗБЕ САРЫСУЫНАН ӘЗІРЛЕНГЕН СУСЫННЫҢ РЕЦЕПТУРАСЫН ЖЕТІЛДІРУ

Аңдатпа: *Мақалада сүт өндірісіндегі екіншілік шикізатты қалдықсыз өңдеу мәселелері қарастырылды. Сүт сарысуының жоғары сапалылығы мен зиянсыздығы, жеткілікті калориялылығы, ағзаға сіңімділігі, қоректік заттардың оңтайлы арақатынаста болуы, биологиялық және физиологиялық толыққандылығы оның тағамдық құндылығын сипаттайды. Сонымен бірге, сүт сарысуының энергетикалық құндылығы майсыздандырылған сүтке қарағанда төмен, ал биологиялық құндылығы шамамен бірдей, бұл оны диеталық тағам өнімдерін өндіруде пайдалануға болатынын көрсетеді. Сүзбе өндірісінің жанама өнімі-сарысуға өсімдік тектес шикізаттарды қосу арқылы, адам ағзасына пайдалы сусын өндіру әдістері және оларды жаппай тұтынуға ұсыну жағдайлары қарастырылды. Өсімдік тектес шикізат ретінде Балан және қара қарақат жидектері қосылып, жаңа сусын әзірленді. Зерттеу барысында сүзбе өндірісінде қалатын екіншілік шикізат – сүт сарысуы негізіндегі сусындарды өсімдік тектес шикізаттармен байыту арқылы дайын өнім әзірленіп, оның физика-химиялық, органолептикалық көрсеткіштеріне бағалау жүргізілді, сусынның құрамындағы құрғақ заттар мөлшерінің, pH көрсеткішінің өсімдік қоспаларының түріне және концентрациясына байланысты өзгеретіні анықталды. Өсімдік тектес қоспалардың сүт сарысуы негізіндегі сусындардың тағамдық және биологиялық құндылығын арттыруға елеулі үлес қосатыны белгілі болды. Балан мен қара қарақат жидектерінің табиғи антиоксиданттарға, дәрумендерге, органикалық қышқылдарға, пектиндерге бай болуы дайын өнімнің биологиялық белсенділігін күшейтті. Зерттеу нәтижесінде оңтайлы деп таңдап алынған Балан мен қара қарақат жидектері қосылған сусынның құрымындағы ақуыздың массалық үлесі 1,56%, құрғақ заттардың мөлшері 5,3%, лактозаның массалық мөлшері 4,7%, рн мәні 3,96, сонымен қатар С дәруменінің мөлшері 1,8% және тағамдық талшықтың мөлшері 0,15% екендігі анықталды.*

Түйін сөздер: *сүзбе сарысуы; өсімдік тектес шикізат; сусын; Балан; қара қарақат жидегі.*

Кіріспе

Қазіргі таңда, мектеп жасындағы жасөспірімдердің және колледж, университет студенттерінің күнделікті тұтынатын тамақ рационы әртүрлі және тұрақты емес. Мектеп оқушылары мен жоғары оқу орнының студенттері шамамен 70%-ы бояғышы бар сусындар мен газдалған сусындарды, әртүрлі тәтті бәліштерді және жылдам әзірленетін тағамдармен

©А.К. Мустафаева, З. Қуанышева, Б. Калемшарив, Г.Ж. Шарикбаева, Г.Б. Абдилова, 2026

тұтынады. Бұл өсіп келе жатқан жасөспірімдер үшін ерекше қауіпті болып келеді, яғни өсу кезеңіндегі ағзаға кальций мен басқа да дәрумендердің жетіспеушілігі пайда болады, тәттіге деген тәуелділік қалыптасып, кейін қантты көп тұтынуға әкеледі. Дүниежүзілік денсаулық сақтау ұйымының мәліметтеріне сүйенсек, адам ағзасына әсіресе жасөспірімдер күнделікті рационында 20-25 г-нан аспайтын таза сахарозаны тұтыну керек [1]. Ал елімізде төмендегі сусындарға деген сұраныс азаймай отыр. Оларға:

– газдалған сусындар құрамында Е-коды бар жасанды бояғыштар (мысалы, Е102, Е110, Е129) жиі болады;

– қаптамада сатылатын дайын «жидек» және «жеміс» сусындары – табиғи шырын үлесі аз, ал жасанды түс беретін бояғыштар көп болады;

– энергетикалық сусындар көп мөлшерде кофеин, таурин, жасанды бояғыштар мен консерванттар бар.

Жаңадан қалыптасып келе жатқан ағзаға сусындар теріс әсерін береді, өйткені олардың құрамындағы синтетикалық бояғыштар, қанттың шектен тыс мөлшері, жасанды қоспалар мен консерванттардың ағзаға қосымша жүктеме түсіріп, табиғи физиологиялық үдерістерді бұзуынан туындайды [2].

Бұл сусындардың зардабы бірден байқалмасада, бірте-бірте ағзаның әлсіреуіне, жүйке жүйесінің бұзылуына, ұйқы режимінің бұзылуына әсер етеді, нәтижесінде сусынға деген тәуелділік байқалады. Елімізде жасөспірімдердің газдалған, қанттың мөлшері жоғары сусындарды шамадан тыс тұтынатындықтан әртүрлі ауруға шалдығып отыр, мұндай сусындарды тұрақты түрде тұтыну жасөспірімдерде қан қысымының пайда болуына ғана емес, сондай-ақ артық салмақ қосуға да әкелуі мүмкін. Осындай күрделі мәселелерді оңтайлы шешу үшін пайдалы сусындармен алмастырған жөн. Оның бірден бір шешімі күнделікті тұтынып отырған сусынды, сүзбе сарысуы негізінде әзірленген сусынға алмастыру. Сүзбе сарысуына әртүрлі микс өнім ретінде Балан және қара қарақат жидектерін қосу арқылы органолептикалық көрсеткіштерін жақсарта аламыз [3].

Сүзбе сарысуынан әзірленген сусынның пайдалы тұстары:

– нәтижесінде қалдықсыз өнім өндіру технологиясы ұсынылады және дәруменге бай сусын алуға мүмкіндік береді;

– сүзбе сарысуынан әзірленген сусын ішек микрофлорасын қалыпқа келтіреді және ас қорытуды жақсартады;

– шаршағанды басып, иммунитетті көтереді, яғни лактоза мен сарысу ақуыздары энергия көзі болып, жүйке жүйесін тыныштандырады;

– майлылығы төмен, бірақ тойымды сусын, сол себепті жасөспірімдердің артық салмағынан арылуына көмектеседі;

– микс ретінде Балан және қара қарақат жидектерін қосу арқылы қанық түс, жағымды хош иіс береді [4].

Балан жидегі (калина) – өнімді қыркүйек және қазан айларында жинап алады. Алғашқы аяз өткеннен кейін жиналған жемістерінде аса бағалы компоненттер жинақталады, аса ащы болмайды. Балан жидегін шырын және шай дайындау үшін пайдаланады. Олардағы А дәрумені адамға қажетті тәуліктік нормадан артық, сондықтан репродуктивті жүйе үшін жидек қажет, көздің, терінің жағдайын жақсартып, иммунитетті қалыпқа келтіреді. Балан жидегі антиоксиданттарға бай, жүрекке пайдалы, ұйқыны жақсартады, иммунитетті арттырады, ас қорытуға жақсы әсер етеді. Қан қысымын реттеуге көмектеседі, яғни Балан құрамындағы органикалық қышқылдар мен пектиндер қан тамырларын кеңейтіп, қан айналымын жақсартады. Қабынуға қарсы әсері бар – жидектегі фитонутриенттер ағзадағы қабыну процестерін азайтады. Бұл буын аурулары, бас аурулары, суық тию сияқты жағдайларда пайдалы болуы мүмкін. Жүйке жүйесін тыныштандырады – Балан шайы немесе жылы тұнбасы стрессті азайтып, жүйкені тыныштандырады [5].

Қара қарақат жидегі – құнды дәрумендерге, органикалық қышқылдарға және антиоксиданттарға бай жидек. Піскен кезде жидектер өзінің ең жоғары қоректік құрамына жетеді, ал дұрыс кептірілген, мұздатылған түрінде де пайдалы қасиеттерін ұзақ сақтайды. Жидектерді шырын, морс, шай, тосап және түрлі сусындар дайындау үшін кеңінен қолданады. Қара қарақатта С дәрумені мөлшері өте жоғары: тәуліктік қажеттіліктен бірнеше есе артық. Сондықтан ол иммунитетті нығайтуға, ағзаның төзімділігін арттыруға ерекше пайдалы. Сонымен қатар көздің, терінің, шаш пен тырнақтың жағдайын жақсартады. Бұл өсімдік тектес шикізат: антиоксиданттарға өте бай, жүрек және қан тамырлары жұмысын реттейді,

иммунитетті күшейтеді, ас қорыту жүйесін жақсартады, биологиялық белсенді заттар буын, бұлшық ет, тамақ ауруларындағы қабынуды жеңілдетеді, В тобы дәрумендері жүйкені тыныштандырып, шаршауды азайтады, ұйқының жақсаруына ықпал етеді. Қара қарақат жидегін сусынға қоспа ретінде қосып, сергіткіш дәм, табиғи қанық түс және пайдалы дәрумендерін ала аламыз [6].

Төменде 100 г. өсімдік тектес шикізаттардың химиялық құрамы 1-кестеде көрсетілген.

Кесте 1 – Өсімдік тектес шикізаттардың химиялық құрамы, 100 г

Аталуы	Массалық мөлшері, %				
	Ақуыз	Көмірсутегі	Су	Органикалық қышқылдар	Күл
Балан	1,4±0,4	8,9±6,5	81,1±1,0	2,2±1,4	0,8±0,1
Қарақат	1,2±0,2	17,5 ±0,5	83,3±1,2	2,3 ±0,2	0,3±0,7

1-кестеге сәйкес Балан мен қарақат сияқты табиғи жемістердің құрамы мен қасиеттерін зерттей отырып, ірімшік өндірісіндегі екіншілік өнім сарысу негізіндегі сусынды өндіруде оларды тиімді пайдалану жұмыстары қарастырылды.

Балан (калина) – жидегі қышқылды дәм бергендіктен, одан джем, тосап, шырынды сусын және шай дайындауда пайдаланады. Көптеген ауруларға: қан қысымы жоғары, үнемі күйзелісте жүретін адамдарға, қарапайым тамақ ауырғанда, яғни ангинаға ем.

Қарақат жидегін ағзада дәрумен жетіспеген кезде тұтынған жақсы, ол салыстырмалы түрде дәрумендерге бай. Диабетпен ауыратын адамдарға қара қарақат жидегінің жапырағын әртүрлі тағамдарға қосу арқылы тұтынған пайдалы болып келеді. Сондықтан ұсынылып отырған жидектеріміз дәрумендерге бай, төмендегі 2-ші және 3-ші кестелерден Балан мен қарақат жидегінің дәрумендік құрамын, жидектердің құрамындағы макроэлементтер көрсетілген

Кесте 2 – Өсімдік тектес шикізаттар құрамындағы дәрумендер, (мг%)

Дәрумендер	Балан	Қарақат
А дәрумені (ретинол)	17	18
B_1 дәрумені (тиамин)	0,05	0,03
B_2 дәрумені (рибофлавин)	0,02	0,04
B_5 дәрумені (пантотен қышқылы)	0,31	0,4
B_6 дәрумені (пиридоксин)	0,013	0,20
B_9 дәрумені (фоли қышқылы)	0,2	5
РР дәрумені (ниацин)	0,7	0,9
С дәрумені (аскорбин қышқылы)	83,5	210

Кесте 3 – Балан мен қарақаттың құрамындағы макроэлементтер, 100 г

Элементтердің атауы	Мөлшері, мг	
	Балан	Қарақат
Кальций	36,5	41
Магний	14,5	32
Калий	38,5	355
Фосфор	96,7	35
Хлор	21	14
Күкірт	12	2,5

Жоғарыдағы кестелерден көріп отырғанымыздай өсімдік тектес шикізаттар дәрумендерге және макроэлементтерге бай: магний жүйке және бұлшық ет жүйесінің саулығы үшін, тіс және сүйектер үшін маңызды. Калий жүрек бұлшық етінің жұмысқа қабілеттілігін ұстап тұрады. Сулы-тұзды зат алмасуды реттеп, артериялық қысымды реттейді. Кальций ас қорыту жұмысына, адамның қорғаныс қабілетінің жетілуіне қатысады.

Зерттеу нәтижелерін саралай отыра, сонымен қатар өсімдік шикізатының жекеленген түрлерінің құрамы мен қасиеттерін зерттей отырып Балан (калина) мен қара қарақат өнімі құрамында күшті антиоксиданттық қасиеттерге ие С дәруменінің қайнар көзі екендігі анықталды. Ол аралық катализатор рөлінде тотығу-қалпына келтіру үдерістерін реттеуде маңызды рөл атқарады, сонымен бірге холестерин мөлшерін азайта отырып, атеросклероз

ауыруының дамуын тоқтатады және қан қысымы ауыруларының пайда болуын тежейді, ағзаның жұмысқа қабілеттілігін арттырады, сонымен қатар, түрлі инфекцияларға және қоршаған ортаның басқа да қолайсыз жағдайларына шыдамдылығын арттырады. Адам ағзасында С дәрумені синтезделмейді және жинақталмайды, сондықтан тамақпен үнемі ағзаға түсіп отыруы керек.

Зерттеу материалдары мен әдістері

Зерттеу барысында сүт өндірісіндегі жалпы қабылданған стандарттар бойынша МЕМСТ 3624-92 «Сүт және сүт өнімдері. Титрлік әдіспен қышқылдылықты анықтау», МЕМСТ 26781-85 «pH өлшеу әдісі», МЕМСТ 25179-2014 «Сүт және сүт өнімдері. Ақуыздың массалық мөлшерін анықтау әдісі», МЕМСТ 3626-73 «Сүт және сүт өнімдері. Құрғақ заттарды анықтау әдісі», МЕМСТ 34352-2017 «Сүт сарысуы-шикізат», МЕМСТ 26323-2014 «Жемістер мен көкөністердің қайта өңделген өнімдері. Өсімдік тектес қоспалардың құрамын анықтау әдістері» зерттеу жұмыстары жүргізілді. Өсімдік тектес шикізат ретінде Балан мен қара қарақат жемісімен байытылған сусын зерттелді. Органолептикалық зерттеулерді МЕМСТ 9959-2015 «Сүт және сүт өнімдерінің органолептикалық көрсеткіштерін анықтау» әдісімен анықталды. МЕМСТ 28562-90 «Жемістер мен көкөністерді қайта өңдеу өнімдері» бойынша қара қарақаттың құрамы анықталды [7-10].

Сүт сарысуында көптеген адам ағзасына пайдалы дәрумендер кездеседі, олардың әрқайсысының орны маңызды. 4-кестеде ірімшік пен сүзбе сарысуы құрамындағы дәрумендер көрсетілген.

Кесте 4 – Сүт сарысуы құрамындағы дәрумендер, мкг/кг

Дәрумендер	Сарысу	
	Ірімшік	Сүзбе
А дәрумені (ретинол)	22	110
Е дәрумені (альфа токоферол)	227	315
B_1 дәрумені (тиамин)	315	263
B_2 дәрумені (рибофлавин)	1389	1107
B_6 дәрумені (пиридоксин)	524	478
B_4 дәрумені (холин)	160000	140000
РР дәрумені (ниацин)	140	140
С дәрумені (аскорбин қышқылы)	500	500

Сарысу – В тобындағы дәрумендерге бай, себебі сергітетін сусынның сапасын көтергендіктен негіз ретінде қолданады, бұл атеросклероз, жүрек талма ауруы, эмоцияналды және жүйке ауруларының патологиялық жағдайда дамуы және олардың қалыптасуына мүмкіндік беретін дәрумендердің жетіспеушілігінің жасырын түрлерімен қарсы күреседі. Артық салмақтан арылу үшін балғын сарысуды немесе одан өндірілген өнімдерді тұтыну ұсынылады [11].

Сүт сарысуында ағзаға қажетті негізгі минералды заттар да жетерлік. Соның ішінде кальций мен фосфор жасөспірім балалардың тістерінің, егде жастағы адамдардың сүйегінің қатаюына оң ықпал етеді [12]. 5-кестеде сүзбе және ірімшік сарысуының құрамындағы минералды заттардың мөлшері көрсетілген.

Кесте 5 – Сүт сарысуындағы негізгі минералды заттар мөлшері, г/мг

Минералды заттар	Сүзбе сарысуында	Ірімшік сарысуында
Кальций	86,00	22,50
Фосфор	63,00	42,50
Магний	8,90	5,80
Натрий	40,00	35,00
Калий	133,00	109,00

5-кестеден көріп отырғанымыздай сүзбе сарысуында ірімшік сарысуына қарағанда кальций, фосфор, магний, натрий, калий едәуір жоғары болып келеді. Сондықтан зерттеу жұмысында сүзбе сарысуы негізінде сусын дайындадық. Сарысудан өсімдік тектес шикізатпен байытылған сусын өндіру мақсатында Балан мен қара қарақат жидегінің езбесін қосу арқылы сүт сарысуы негізінде сусын дайындалды.Төмендегі 6-кестеде өсімдік тектес шикізатпен байытылған сусынның рецептурасы көрсетілген.

Кесте 6 – Өсімдік тектес шикізатпен байытылған сусынның рецептурасы

	Бақылау үлгісі	№1-нұсқа	№2-нұсқа	№3-нұсқа
Сүзбе сарысуы, г	1000	800	800	700
Қара қарақат, г	-	-	100	100
Балан (калина), г	-	100	-	100
Қант, г	-	100	100	100
Барлығы, г	1000	1000	1000	1000

Зерттеу барысында бақылау үлгісі және 3 нұсқада зерттеу жұмыстары жүргізілді. Бақылау үлгісі ретінде сарысу сусыны алынды. Бірінші нұсқа бойынша сүзбе сарысуына Балан жидегінің езбесі 10% қосылып, сусын дайындалды. Екінші нұсқа бойынша сүзбе сарысуына қара қарақат жидегінің езбесі 10% қосылып, сусын әзірленді. Үшінші нұсқа бойынша сүзбе сарысуына Балан жидегі 10% және қара қарақат жидегі 10% қосылып сусын әзірленіп, микс қоспа дайындалды.

Төмендегі 1-суретте Балан мен қара қарақат қосылып дайындалған сусынның технологиялық сұлбасы көрсетілген.



Сурет 1 – Сарысу негізіндегі сусынды дайындау технологиясы

Дайын өнімнің тағамдық және биологиялық құндылықтары Астана қаласындағы С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университетінің «Сүт өнімдерін қайта өңдеуге арналған тәжірибелік-өндірістік цехында» анықталды. Зерттеулер нәтижесі Балан және қарақат түріндегі өсімдік тектес қоспаның 20%-дық (10% қарақат жидегі және 10% Балан жидегі) мөлшерін сарысу сусынына қосқан кезде ең жоғары көрсеткішті көрсетті.

Нәтижелер және оларды талқылау

Сусынды бағалау «Тамақ және қайта өңдеу өндірістерінің технологиясы» кафедрасының оқытушыларының дегустация жүргізу нәтижесінде бағаланды. Өсімдік тектес шикізат ретінде Балан мен қара қарақат жидегімен байытылған сусындар зерттелді, оларды келесі құрам бойынша үлгілері дайындалды:

№ 0 нұсқа – бақылау үлгісі;

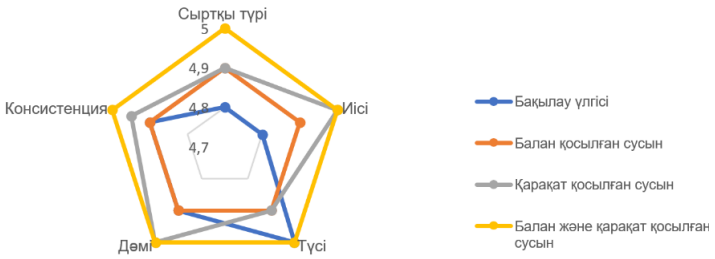
№ 1 нұсқа – 10% Балан қосылған сарысу сусыны;

№ 2 нұсқа – 10% қара қарақат қосылған сарысу сусыны;

№ 3 нұсқа – 10% қарақат жидегі және 10% Балан жидегі қосылған микс түріндегі сусын. Бағалау барысында үшінші нұсқаға (Балан мен қарақат қосылған сусын) басым дауыс берілді. Дегустациялық бағалау нәтижесі 2-суретте көрсетілген.

Жоғары нәтиже көрсеткен № 3 нұсқадағы үлгінің органолептикалық сипаттамасы 7-кестеде көрсетілген

Органолептикалық бағалау нәтижесінде оңтайлы етіп таңдап алынған Балан және қарақат түріндегі өсімдік тектес қоспаның 20%-ын микс ретінде сарысу сусынына қосқан кезде ең жоғары көрсеткіш көрсеткен сусынның физика-химиялық көрсеткіштері Қазақстан Республикасының Президентінің Іс Басқармасы Медициналық орталығының «Санитарлық-эпидемиялогилық сараптама орталығы» шаруашылық жүргізу құқығындағы РМК зертханасына жіберілді. Зертхана сараптамасының нәтижесімен өнім барлық талаптарға сай деген қорытынды-хаттама алынды және нәтижелері 8-кестеде көрсетілген.



Сурет 2 – Сарысу негізіндегі өсімдік тектес шикізатпен байытылған сусынның органолептикалық көрсеткіштері

Кесте 7 – Сусынның органолептикалық сипаттамасы

Көрсеткіш атауы	Көрсеткіш
Иісі мен дәмі	Таза өнім қосылғандықтан, ингредиенттердің сонымен қоса тәтті сүзбе сарысуының дәмдері сезіледі; дәмі ингредиенттер қышқыл дәм мен сүзбе сарысуы тәтті дәм болғандықтан олардың қосындысы орташа ашқылтым дәмді құрайды.
Консистенциясы	Біркелкі сұйық сусын; тағамдық бояғыштар мен ароматты қоспаларды қажет етпейді.
Түсі	Қосылған ингредиенттің түсіне байланысты, біздің жағдайымызда ашық күлгін түске ие.

Кесте 8 – Сусынның физикалық көрсеткіштері

Көрсеткіш атауы	Дайын өнімнің көрсеткішінің мәні	МЕМСТ 34352-2017
Титрлік қышқылдық, ^{0}Т	55	70 көп емес
pH мәні	3,96	3-тен 8 дейін
Ақуыздың массалық үлесі, %	1,56	0,4 кем емес
Құрғақ заттардың мөлшері, %	5,3	5,0 кем емес
Лактозаның массалық мөлшері, %	4,7	3,5 кем емес

8-кестеден көріп отырғанымыздай сарысу негізіндегі сусынның нәтижелері МЕМСТ 34352-2017 талаптарына сәйкес келеді. Зерттеу барысында сарысу негізді сусынды әзірлеу кезіндегі негізгі көрсеткіш сусынның тұрақтылығын сақтауы, сондықтан осы мақсатта сусынды сақтау ұзақтығы белсенді қышқылдылықтың өзгерісі негізінде зерттелді. Төмендегі 3-суретте сарысу негізінде өсімдік тектес шикізатпен байытылған сусынның сақтау мерзімінің белсенді қышқылдылыққа сәйкес өзгеруі көрсетілген.



Сурет 3 – Сарысу негізіндегі сусынның белсенді қышқылдылығының сақтау мерзіміне қатысты өзгерісі

3-суреттен көріп тұрғанымыздай 5 тәулікте сақтау кезінде сусыннан жағымды тәтті дәмі сақталады. Өнімнің органолептикалық қасиеттерін және физикалық көрсеткіштерін анықтау үшін әр нұсқадан сынамалар алынып зерттелді. Зерттеудің нәтижесінде Балан және қара қарақатпен байытылған сарысу негізіндегі сусын тағамдық талшықтарға бай екенін және дәрумендерінің мөлшері жоғары екенін байқауға болады (4 сурет).

Зерттеу барысында оңтайлы деп таңдап алынған № 3 үлгідегі сусынның 100 г құрамындағы С дәруменінің мөлшері 1,8% және тағамдық талшықтың мөлшері 0,15% болатындығы АО «Алматы технологиялық университеті» АҚ, «Азық-түлік өнімдерінің сапасын және қауіпсіздігін бағалау» зертханасына жіберіліп, оң нәтиже алынды. Хаттама нәтижесінде сусынның құрамындағы тағамдық талшық және С дәруменінің мөлшері анықталды, ол 9-кестеде көрсетілген.



Сурет 4 – Сарысу негізінде дайындалған сусын үлгілері

Кесте 9 – Сарысу негізіндегі сусынның құрамындағы С дәрумені мен тағамдық талшықтың мөлшері

Көрсеткіштер	Өсімдік тектес шикізатпен байытылған сусын	Сынақ әдістерінің НҚ
Тағамдық талшықтар,%	0,15 ±0,01	МЕМСТ 31675-2012
С дәрумені, мг/100 г	1,8 ± 0,24	МЕМСТ 30672-98

Қорытынды

Зерттеу жұмысын орындау барысында сүзбе өндірісіндегі екіншілік өнімді қалдықсыз өңдеу технологиясы қарастырылды, әдеби шолу негізінде сарысуды пайдалану артықшылықтары зерттелді. Өсімдік тектес шикізаттарға негіздеме жүргізіліп, Балан және қара қарақат жидегі қосылып дайындалған сарысу негізіндегі сусынның рецептурасы мен технологиясы әзірленді. Дайын өнімнің органолептикалық және физика-химиялық көрсеткіштері анықталды. Зерттеу нәтижесінде оңтайлы деп таңдап алынған Балан мен қара қарақат жидектері қосылған сусынның құрымындағы ақуыздың массалық үлесі 1,56%, құрғақ заттардың мөлшері 5,3%, лактозаның массалық мөлшері 4,7%, pH мәні 3,96, сонымен қатар С дәруменінің мөлшері 1,8% және тағамдық талшықтың мөлшері 0,15% екендігі анықталды. Сондықтан мұндай сусынды жасөспірімдерге тұтыну ұсынылады.

Әдебиеттер тізімі

1. Zhakupova G.N. Development of technology of yoghurt by using acid whey / G.N. Zhakupova, A.T. Sagandyk // Series chemistry and technology. – 2020. – № 4. – P. 51-57.
2. Храмцов А.Г. Феномен молочной сыворотки: Монография / А.Г. Храмцов, 2011. – С.-Петербург. – 804 с.
3. Дыкало Н.Я. Опять о молочной сыворотке / Н.Я. Дыкало // Современные тенденции в обработке сыворотки: сборник материалов 118: международный научно-практический семинар. – Москва: «Образовательный научно-технический центр молочной промышленности», 2006. – С. 15-17.
4. Nutritional, phytochemical, and bioactive prospects of black chokeberry (Aronia melanocarpa) and saskatoon berry (Amelanchier ovalis) grown in the Republic of Kazakhstan / A.T. Sagandyk et al // Applied Food Research. – 2024. – № 4(2). – P. 100564. https://doi.org/10.1016/j.afres.2024.100564.
5. Exploring the impact of wild northern kazakhstan raw material juices on the chemical composition of whey drinks / G. Zhakupova et al // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2023. – № 126(11).
6. Нуртаева А.Б. Сүт және сүт өнімдерінің технологиясы: Оқу құралы / А.Б. Нуртаева, А.Ж. Беккожин. – Астана; С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық университеті, 2014. – 180 б.
7. Елисеева Т. С дәрумені (аскорбин қышқылы): сипаттамасы, пайдасы және қай жерде кездеседі / Т. Елисеева, А. Мироненко // Салауатты тамақтану және диетология журналы. – 2018. – № 4. – Б. 33-45.
8. Теплова А.И. Витамины и минералы для жизни и здоровья. – 2 е изд., сте. реотип. – Санкт Петербург: СпецЛит, 2016.
9. С дәруменнің (аскорбин қышқылы) массалық үлесін анықтау әдістері. С дәруменнің (аскорбин қышқылы) массалық үлесін МЕМСТ 30627.2-98.
10. Сүт және сүт өнімдері. Микробиологиялық талдау әдістері МЕМСТ 9225-84.
11. Евдокимов И.А. Современное состояние переработки молочной сыворотки / И.А. Евдокимов, А.Г. Храмцов, П.Г. Нестеренко / Молочная промышленность. – 2008. – № 11. – с. 36-40.
12. Мирзакулова А.А. Итмұрын дәрумендік кешенімен байытылған сүт сарысуы негізіндегі сусындар технологиясын әзірлеу / А.А. Мирзакулова, Т.Е. Сарсембаева, Б. Калемшарив // Алматы технологиялық университетінің хабаршысы. – 2025. – № 147(1). – Б. 28-34.

References

1. Zhakupova G.N. Development of technology of yoghurt by using acid whey / G.N. Zhakupova, A.T. Sagandyk // Series chemistry and technology. – 2020. – № 4. – P. 51-57. (In English).
2. Khramtsov A.G. Fenomen molochnoi syvorotki: Monografiya / A.G. Khramtsov, 2011. – S.-Peterburg. – 804 s. (In Russian).
3. Dykalo N.YA. Opyat' o molochnoi syvorotke / N.YA. Dykalo // Sovremennye tendentsii v obrabotke syvorotki: sbornik materialov 118: mezhdunarodnyi nauchno-prakticheskii seminar. – Moskva: «Obrazovatel'nyi nauchno-tekhnicheskii tsentr molochnoi promyshlennostI», 2006. – S. 15-17. (In Russian).
4. Nutritional, phytochemical, and bioactive prospects of black chokeberry (Aronia melanocarpa) and saskatoon berry (Amelanchier ovalis) grown in the Republic of Kazakhstan / A.T. Sagandyk et al // Applied Food Research. – 2024. – № 4(2). – R. 100564. https://doi.org/10.1016/j.afres.2024.100564. (In English).
5. Exploring the impact of wild northern kazakhstan raw material juices on the chemical composition of whey drinks / G. Zhakupova et al // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2023. – № 126(11). (In English).
6. Nurtaeva A.B. Sut zhane sut onimderinin tekhnologiyasy: Oku kuraly / A.B. Nurtaeva, A.ZH. Bekkozhin. – Astana; S. Seifullin atyndagy Kazak agrotekhnikalyk universiteti, 2014. – 180 b. (In Kazakh).
7. Eliseeva T. S darumeni (askorbin kyshkyly): sipattamasy, paidasy zhəne kai zherde kezdesedi / T. Eliseeva, A. Mironenko // Salauatty tamaktanu zhane dietologiya zhurnaly. – 2018. – № 4. – B. 33-45. (In Kazakh).
8. Teplova A.I. Vitaminy i mineraly dlya zhizni i zdorov'ya. – 2 e izd., ste. reotip. – Sankt Peterburg: SpeTSLit, 2016. (In Russian).
9. S dərumennin (askorbin kyshkyly) massalyk ylesin anyktau adisteri. S darumennin (askorbin kyshkyly) massalyk ylesin MEMST 30627.2-98. (In Kazakh).
10. Sut zhane syt onimderi. Mikrobiologiyalyk taldau adisteri MEMST 9225-84. (In Kazakh).
11. Evdokimov I.A. Sovremennoe sostoyanie pererabotki molochnoi syvorotki / I.A. Evdokimov, A.G. Khramtsov, P.G. Nesterenko / Molochnaya promyshlennost'. – 2008. – № 11. – s. 36-40. (In Russian).
12. Mirzakulova A.A. Itmyryn darumendik keshenimen baiytylgan syt sarysuy negizindegi susyndar tekhnologiyasyn azirleu / A.A. Mirzakulova, T.E. Sarsembaeva, B. Kalemshariv // Almaty tekhnologiyalyk universitetinin khabarshysy. – 2025. – № 147(1). – B. 28-34. (In Kazakh).

A. Mustafaeva*, Z. Kuanysheva[1], B. Kalemshariv[1], G. Sharikbaeva[1], G. Abdilova[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, Glinki str. 20 A
e-mail: ayaulym.mustafa@mail.ru

IMPROVING THE FORMULATION OF A BEVERAGE PRODUCT PREPARED FROM CURD WHEY

This article examines waste-free recycling of secondary raw materials in the dairy industry. Whey's high quality and safety, adequate caloric value, digestibility, optimal nutrient balance, and biological and physiological completeness characterize its nutritional value. Moreover, whey's energy value is lower than that of skim milk, while its biological value is approximately the same, indicating its potential for use in the production of dietary foods. Methods for producing a healthy beverage by adding plant-based ingredients to whey, a byproduct of cottage cheese production, and the conditions for introducing these ingredients into mass consumption are discussed. A new beverage has been developed using blackcurrants and black currants as plant-based ingredients. The study resulted in the development of a finished product fortified with plant-based ingredients for beverages based on whey, a secondary raw material remaining during cottage cheese production. Its physicochemical and organoleptic properties are evaluated. It was found that the dry matter content of the drink and the pH value varied depending on the type and concentration of herbal additives. It was revealed that herbal additives significantly contributed to the nutritional and biological value of whey-based drinks. The rich content of natural antioxidants, vitamins, organic acids and pectins in caline berries and black currants increased the biological activity of the finished product. The results of the study showed that the protein mass proportion in a drink with calla berries and black currants selected as optimal was 1,56%, the

amount of dry matter – 5,3%, the lactose mass proportion – 4,7%, the pH value – 3,96, as well as the vitamin C quantity – 1,8%, and the amount of food fibers – 0,15%.

Key words: *curd whey; plant-based raw materials; drink; viburnum; blackcurrant berries.*

А.К. Мустафаева[1*], З.К. Қуанышева[1], Б. Калемшарив[1], Г.Ж. Шарикбаева[1], Г.Б. Абдилова[2]
[1]Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина,
010011, Казахстан, Астана, пр. Женис 62
[2]Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А
[*]e-mail: ayaulym.mustafa@mail.ru*

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РЕЦЕПТУРЫ НАПИТКА ИЗ ТВОРОЖНОЙ СЫВОРОТКИ

В данной статье рассмотрены вопросы безотходной переработки вторичного сырья в молочной промышленности. Высокое качество и безвредность сыворотки, достаточная калорийность, усвояемость для организма, оптимальное соотношение питательных веществ, биологическая и физиологическая полнота характеризуют ее пищевую ценность. При этом энергетическая ценность сыворотки ниже, чем у обезжиренного молока, а ее биологическая ценность примерно одинакова, что указывает на возможность ее использования в производстве диетических продуктов питания. Рассмотрены способы производства полезного для организма напитка путем добавления растительного сырья к сыворотке, побочному продукту производства творога, и условия их введения в массовое потребление. Разработан новый напиток с добавлением ягод калины и черной смородины в качестве растительного сырья. В ходе исследования разработан готовый продукт, обогащенный растительным сырьем для напитков на основе сыворотки, вторичного сырья, остающегося при производстве творога. Оценены его физико-химические и органолептические показатели. Было установлено, что количество сухого вещества в напитке и значение pH варьируются в зависимости от типа и концентрации растительных добавок. Выявлено, что растительные добавки вносят значительный вклад в повышение питательной и биологической ценности напитков на основе сыворотки. Богатое содержание природных антиоксидантов, витаминов, органических кислот и пектинов в ягодах калины и черной смородины повысило биологическую активность готового продукта. В результате исследования было установлено, что массовая доля белка в составе напитка с ягодами калины и черной смородины, выбранного в качестве оптимального, составила 1,56%, количество сухого вещества – 5,3%, массовая доля лактозы – 4,7%, значение pH – 3,96, а также количество витамина С – 1,8%, и количество пищевых волокон – 0,15%.

Ключевые слова: *творожная сыворотка; растительное сырьё; напиток; калина; чёрная смородина.*

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.

Зәру Кадрханқызы Куанышева – студент, «Тамақ және қайта өңдеу өндірістерінің технологиясы» кафедрасы, Сәкен Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қаласы, Қазақстан Республикасы; email: kuanysevazaru@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-5500-9616.

Бегжан Калемшарив – «Тамақ және қайта өңдеу өндірістерінің технологиясы» кафедрасының оқытушысы, Сәкен Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қаласы, Қазақстан Республикасы; e-mail: begjan.ae@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8036-9718.

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: https://orcid.org/0009-0006-1786-3250.

Галия Бекеновна Абдилова – техника ғылымдарының кандидаты, «Биоинженерлік жүйелер» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Шәкәрім университеті, Семей, Қазақстан Республикасы; e-mail: abdilova1979@bk.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002- 6647-6314.

Сведения об авторах

Аяулым Какеновна Мустафаева* – кандидат технических наук, ассоциированный профессор кафедры «Технология пищевых и перерабатывающих производств», Казахский агротехнический исследовательский университет имени Сакена Сейфуллина, город Астана, Республика Казахстан; e-mail: ayaulym.mustafa@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9627-7543.

Зару Кадрханкызы Куанышева – студентка; кафедра «Технология пищевых и перерабатывающих производств», Казахский агротехнический исследовательский университет имени Сакена Сейфуллина, г. Астана, Республика Казахстан; e-mail: kuanysevazaru@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-5500-9616.

Бегжан Калемшарив – преподаватель кафедры «Технология пищевых и перерабатывающих производств», Казахский агротехнический исследовательский университет имени Сакена Сейфуллина, Астана, Казахстан; e-mail: begjan.ae@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-00028036-9718.

Гульмира Жексеновна Шарикбаева – преподаватель кафедры «Технология пищевых и перерабатывающих производств», Казахский агротехнический исследовательский университет имени Сакена Сейфуллина, Астана, Казахстан; e-mail: gsharikbaeva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-1786-3250.

Галия Бекеновна Абдилова – кандидат технических наук, ассоциированный профессор кафедры «Биоинженерные системы», Шәкәрім университет, Семей, Республика Казахстан; e-mail: abdilova1979@bk.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6647-6314.

Information about the authors

Ayaulym Mustafayeva* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department «Technology of Food and Processing Industries», S. Seifullin Kazakh Agro Technical Research University, Astana, Republic of Kazakhstan; e-mail: ayaulym.mustafa@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9627-7543.

Zaru Kuanysheva – student, Department of Food and Processing Industry Technology, S. Seifullin Kazakh Agro Technical Research University, Astana, Republic of Kazakhstan; e-mail: kuanysevazaru@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-5500-9616.

Begzhan Kalemshariv – Lecturer of the Department of Food Technology and Processing Products, S. Seifullin Kazakh Agro Technical Research University, Astana, Kazakhstan; e-mail: begjan.ae@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-00028036-9718.

Gulmira Sharikbaeva – Lecturer of the Department of Food Technology and Processing Products, S. Seifullin Kazakh Agro Technical Research University, Astana, Kazakhstan; e-mail: gsharikbaeva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-1786-3250.

Galiya Abdilova – candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of «Bioengineering Systems», Shakarim University, e-mail: abdilova1979@bk.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6647-6314.

Редакцияға енуі 05.01.2026
Өңдеуден кейін түсуі 16.02.2026
Жариялауға қабылданды 17.02.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-34

МРНТИ: 65.59.29

CC BY 4.0
Check for updates

Я.М. Узаков[1], Р.Р. Имамдунов[1]*, Р.К. Байгабылов[1], А.С. Красников[1], Ч.К. Авылов[2]
[1]Алматинский технологический университет,
А05Н0Е2, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Толе би, 100
[2]ФГБОУ ВО «Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ)»,
125080, Российская Федерация, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 11
*e-mail: radikov202@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ПСИЛЛИУМА И ПОРОШКА БРУСНИКИ НА КАЧЕСТВЕННЫЕ И МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПАШТЕТА ИЗ ВЕРБЛЮЖАТИНЫ

Аннотация: *В условиях возрастающего спроса на функциональные мясные продукты актуальной задачей является создание паштета с функциональными компонентами на основе нетрадиционного мясного сырья. Целью исследования являлось обоснование рецептуры и технологии приготовления паштета из верблюжатины, обогащённого псиллиумом и порошком брусники, а также оценка влияние этих функциональных ингредиентов на химический состав и микробиологические показатели готового продукта. В ходе исследования опытный (псиллиум – 1,5%; порошок брусники – 1,5%) и контрольный образцы были произведены по единой технологической схеме с варкой и последующей стерилизацией. По результатам анализов было*

©Я.М. Узаков, Р.Р. Имамдунов, Р.К. Байгабылов, А.С. Красников, Ч.К. Авылов, 2026

установлено, что введение псиллиума и порошка брусники незначительно снижает содержание белка и жира, но повышает долю углеводов и концентрацию витамина С (с 0,1 до 0,99 мг/100 г) и витамина Е (с 0,2 до 1,12 мг/100 г). Опытный образец паштета также показал более низкие значения pH, перекисного и кислотного числа и более высокую влагосвязывающую способность. Показатель КМАФАнМ в опытном образце (2,1×10^2 КОЕ/г) был почти вдвое ниже контрольного (4,7×10^2 КОЕ/г) и существенно ниже нормы по НД (1×10^3 КОЕ/г). Анализ аминокислотного состава опытного образца показал высокую интегральная биологическая ценность готового продукта (118,71%). Полученные результаты согласуются с литературными данными о влиянии пищевых волокон и ягодных порошков на мясные системы и позволяют рекомендовать разработанный паштет из верблюжатины, обогащённого псиллиумом и порошком брусники, как перспективный объект для дальнейших исследований.

Ключевые слова: *паштет, функциональный мясной продукт, верблюжатина, псиллиум, брусника.*

Введение

Современная мясная индустрия находится в условиях двойного давления – с одной стороны, сохраняется высокий потребительский спрос на традиционные мясные продукты, с другой – усиливаются требования к их пищевой и биологической ценности, снижению рисков, связанных с избыточным потреблением насыщенных жиров, соли и консервантов [1]. Стратегии реформулирования включают частичную замену животного жира растительными компонентами, введение пищевых волокон и природных антиоксидантов, а также более рациональное использование субпродуктов [2]. Одновременно усиливается интерес к использованию нетрадиционного мясного сырья, в частности верблюжатины, которую в ряде работ рассматривают как перспективный источник высококачественного белка и функциональных компонентов. По данным современных обзоров, верблюжье мясо содержит в среднем около 78% влаги, 19-20% белка и порядка 3% жира, характеризуется низким уровнем внутримышечного жира и холестерина, повышенным содержанием железа и минералов, а также благоприятным соотношением полиненасыщенных и насыщенных жирных кислот, что позволяет рассматривать его как более «здоровую» альтернативу традиционным видам красного мяса, таким как говядина и баранина. Показано, что верблюжатина обладает высокой биологической ценностью белка и может использоваться при производстве широкого спектра переработанных изделий – от колбас и бургеров до консервов и паштетов, что делает её важным резервом для разработки функциональных мясных продуктов на основе нетрадиционного сырья [3-5]. На этом фоне паштеты занимают особое место: как готовый к употреблению, легко дозируемый и технологически «гибкий» продукт. Они позволяют вводить широкий спектр растительных ингредиентов без ухудшения, а при грамотной разработке рецептуры могут служить удобной матрицей для создания функциональных мясных изделий.

Псиллиум (шелуха семян подорожника) рассматривается как один из наиболее технологически и физиологически перспективных источников пищевых волокон. Его оболочка содержит 70-80% растворимой клетчатки, представленной главным образом арабиноксиланами и сопутствующими полисахаридами, способными образовывать вязкие гели с высокой водоудерживающей способностью. Клинические и экспериментальные исследования показывают, что регулярное потребление псиллиума способствует нормализации моторики кишечника, снижению уровня общего и ЛПНП-холестерина, сглаживанию постпрандиальной гликемии и улучшению чувства насыщения. В мясных системах псиллиум рассматривают как природный гидроколлоид, способный повышать влагосвязывающую способность, устойчивость эмульсии и выход готового изделия, а также частично замещать животный жир и крахмал без потери структурно-механических характеристик [6, 7].

Брусника (*Vaccinium vitis-idaea L.*) относится к ягодам с высокой концентрацией биологически активных веществ. Плодовая мякоть богата фенольными соединениями, включая антоцианы, проантоцианидины, хлорогеновые кислоты, флавонолы и катехины, которые обеспечивают выраженную антиоксидантную, противовоспалительную и антимикробную активность. Кроме того, брусника содержит значимые количества витаминов С и Е, органических кислот и природных сахаров (8,2 г/100 г), формирующих её функциональный потенциал как ингредиента пищевых продуктов [8, 9].

Цель настоящего исследования – обосновать рецептуру и технологию приготовления паштета из верблюжатины, обогащённого псиллиумом и порошком брусники, а также оценить влияние этих функциональных ингредиентов на химический состав и микробиологические показатели готового продукта.

Условия и методы исследования

Образцы паштета из верблюжатины, обогащённого псиллиумом и порошком брусники, были приготовлены на базе Учебно-научного центра по переработке мяса Алматинского технологического университета.

В качестве основного мясного сырья использовали верблюжатину и филе курицы. Порошок псиллиума и порошок брусники применяли как функциональные добавки – источники пищевых волокон и природных антиоксидантов.

Лабораторные испытания готовой продукции проводились в аккредитованной научно-исследовательской испытательной лаборатории «Пищевая безопасность» (аттестат аккредитации № KZ.T.02.E 1158).

Массовую долю белка образцов паштета определяли по ГОСТ 25011-2017 «Мясо и мясные продукты. Методы определения белка».

Массовую долю жира определяли по ГОСТ 23042-2015 «Мясо и мясные продукты. Методы определения жира».

Массовую долю углеводов определяли перманганатометрическим методом. Сущность метода состоит в окислении органических восстановителей пробы раствором перманганата калия в кислой среде и расчёте содержания углеводов по объёму израсходованного окислителя относительно стандартного раствора.

Содержание витамина С определяли по ГОСТ Р 55482-2013 «Мясо и мясные продукты. Метод определения содержания водорастворимых витаминов».

Содержание витамина Е определяли по ГОСТ 32307-2013 «Мясо и мясные продукты. Определение содержания жирорастворимых витаминов методом высокоэффективной жидкостной хроматографии».

Аминокислотный состав определяли методом ионообменной (или капиллярной) хроматографии по ГОСТ Р 55569-2013 «Корма, комбикорма, комбикормовое сырьё. Определение протеиногенных аминокислот методом капиллярного электрофореза», адаптированному для мясных систем.

Активную кислотность (pH) определяли потенциометрическим методом. Метод основан на измерении электродвижущей силы в системе стеклянный электрод – хлорсеребряный электрод и пересчёте показаний потенциометра в значения pH.

Перекисное число жира определяли по ГОСТ 34118-2017 «Мясо и мясные продукты. Метод определения перекисного числа».

Кислотное число жира определяли по ГОСТ Р 55480-2013 «Мясо и мясные продукты. Метод определения кислотного числа».

Массовую долю влаги определяли по ГОСТ 33319-2015 «Мясо и мясные продукты. Метод определения массовой доли влаги».

КМАФАнМ определяли по ГОСТ 21237-75 «Мясо. Методы бактериологического анализа».

Влагосвязывающую способность определяли методом прессования. Метод заключается в выдерживании навески продукта между фильтровальной бумагой под заданной нагрузкой и последующем расчёте количества связанной влаги по площади пятна свободной влаги.

Результаты исследований

Для приготовления образцов паштета замороженную верблюжатину и филе курицы предварительно размораживали при температуре 0-4°С, после чего проводили зачистку от соединительной ткани и видимых загрязнений и нарезали кусками массой 30-50 г. Говяжий жир-сырец топили до получения топлёного жира при температуре 95-100°С, отфильтровывали и охлаждали до 35-40°С. Репчатый лук очищали, измельчали и пассеровали на части топлёного жира при 120-130°С до светло-золотистого цвета. Верблюжатину и филе курицы заливали горячей водой в соотношении сырьё : вода 1:1,5 и варили при слабом кипении до кулинарной готовности (60-90 мин), периодически удаляя пену. Готовое сырьё охлаждали до 10-12°С .

Охлаждённое мясное сырьё и пассерованный лук дважды пропускали через мясорубку (CE 660F, la Minerva, Италия) с диаметром отверстий решётки 4,5 мм. Полученную массу направляли на тонкое измельчение и эмульгирование в куттер (название оборудования). На стадии куттерования последовательно вносили мясной бульон, гречневую муку, поваренную соль, измельчённые специи, псиллиум и порошок брусники. Куттерование вели до получения однородной пастообразной структуры, температура фарша по окончании процесса не превышала 15°С.

Готовый паштетный фарш фасовали в банки, тщательно уплотняя массу и удаляя воздушные включения. Тепловую обработку формованных изделий проводили в автоклаве (K30Neo, Talsa, Испания). Режим включал этап запекания при 160-170 °С в течение 30-40 мин с последующей выдержкой при 80–85 °С до достижения требуемой внутренней температуры. После тепловой обработки образцы охлаждали до 2±2°С и выдерживали при этой температуре не менее 12 часов для стабилизации структуры и затем направляли на анализы. Рецептура образцов паштета из верблюжатины показана в таблице 1.

Таблица 1 – Рецептура образцов паштета из верблюжатины, обогащённого псиллиумом и порошком брусники

Наименование сырья	Опытный образец	Контрольный образец
Основное сырье, кг		
Верблюжатина	60	60
Филе курицы	20	20
Жир говяжий,топленный	10	12
Лук репчатый	4	5
Гречневая мука	3	3
Псиллиум	1,5	-
Порошок из ягод брусники	1,5	-
Вторичные материалы, кг		
Соль поваренная пищевая	1,5	1,5
Перец черный молотый	0,12	0,12
Лавровый лист молотый	0,09	0,09
Вода (бульон)	20	15

Сравнение пищевой ценности опытного и контрольного образцов паштета (табл. 2) показывает, что введение порошка псиллиума и порошка брусники сопровождается снижением массовой доли белка и жира при небольшом росте массовой доли углеводов. Энергетическая ценность опытного образца составила 299,45 ккал/100 г, а у контрольного – 309,6 ккал/100 г.

Таблица 2 – Показатели пищевой ценности образцов паштета из верблюжатины

Наименование показателей	Опытный образец	Контрольный образец
Массовая доля белка, %	16,99±0,06	18,7±0,07
Массовая доля жира, %	24,09±0,08	24,8±0,08
Массовая доля углеводов, %	3,67±0,16	2,9±0,14
Витамин С, мг/100 г	0,99±0,015	0,1±0,015
Витамин Е, мг/100 г	1,12±0,03	0,2±0,03

Наиболее выраженные различия зарегистрированы по содержанию витаминов С и Е. Концентрация аскорбиновой кислоты в опытном образце достигает 0,99 мг/100 г, что почти в десять раз превышает уровень контрольного паштета – 0,1 мг/100 г, и указывает на формирование более высокого антиоксидантного потенциала продукта. Содержание витамина Е в образце с псиллиумом и порошком брусники также существенно выше – 1,12±0,03 мг/100, а в контрольном образце – 0,2 мг/100 г.

Как видно из хроматограммы контрольного образца паштета из верблюжатины (рис. 1), регистрируются четко разделённые пики аргинина, лизина, тирозина, фенилаланина, гистидина, лейцина+изолейцина, метионина, валина, пролина, треонина, серина, аланина и глицина. Наибольшую интенсивность имеют пики лейцина+изолейцина, аланина и глицина, что указывает на их доминирующий вклад в аминокислотный профиль продукта.

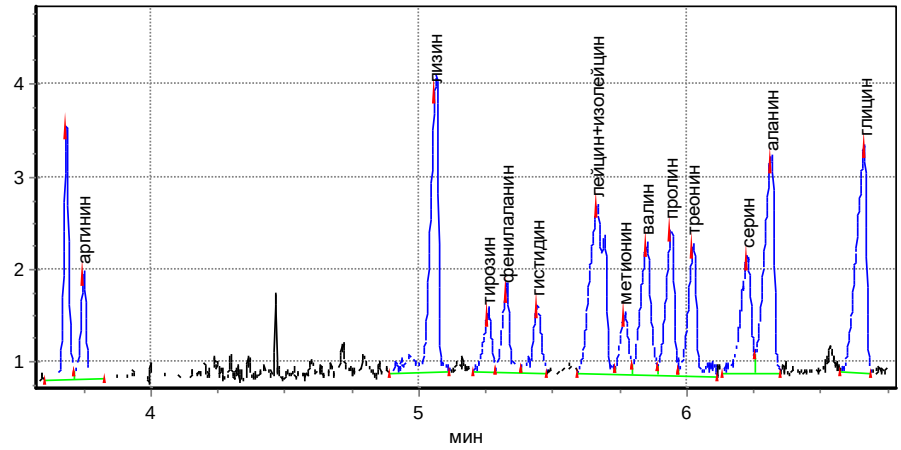


Рисунок 1 – Хроматограмма свободных аминокислот контрольного образца паштета

Хроматографический анализ аминокислотного состава опытного образца паштета (табл. 3) также показал присутствие широкого спектра как незаменимых, так и условно незаменимых и заменимых аминокислот. Наибольший вклад в аминокислотный профиль продукта вносят лизин, валин, лейцин+изолейцин, а также аланин и глицин. Массовая доля отдельных аминокислот в продукте варьирует в пределах от 0,532% (метионин) до 1,553% (лизин), что отражает выраженное преобладание базовых структурных и функциональных аминокислот. Существенное содержание пролина, глицина и аргинина указывает на значимую долю коллагенсодержащих фракций в белковом комплексе паштета, тогда как наличие гистидина, серина и треонина дополняет аминокислотный профиль компонентами, участвующими в регуляции обменных и антиоксидантных процессов.

Таблица 3 – Аминокислотный состав опытного образца паштета из верблюжатины

Компонент	Высота	Начало	Конец	Конц., мг/л	Масс. доля аминокислот в %,
аргинин	1.151	3.715	3.830	23.0	0.887±0.355
лизин	3.049	4.890	5.135	35.0	1.553±0.528
тирозин	0.640	5.205	5.288	18.0	0.565±0.200
фенилаланин	0.896	5.288	5.348	18.0	0.799±0.240
гистидин	1.271	5.383	5.483	21.0	0.650±0.333
лейцин + изолейцин	1.826	5.592	5.733	26.0	1.154±0.300
метионин	0.647	5.733	5.800	15.0	0.532±0.181
валин	1.416	5.803	5.892	22.0	1.109±0.444
пролин	1.580	5.892	5.972	22.0	0.976±0.254
треонин	1.148	5.972	6.133	26.0	0.976±0.390
серин	1.241	6.133	6.258	26.0	0.843±0.219
аланин	2.296	6.258	6.352	26.0	1.154±0.300
глицин	2.448	6.577	6.693	23.0	1.020±0.347

Результаты расчёта аминокислотного скора (табл. 4) демонстрируют высокую степень соответствия аминокислотного профиля паштета эталонному белку. Аминокислотный скор для лизина, треонина, валина и суммы тирозина с фенилаланином существенно превышают 100%, достигая 133,8-166,19%, что свидетельствует о явном избытке этих незаменимых аминокислот относительно физиологической потребности. Лимитирующей является пара лейцин+изолейцин со скором 61,75%, что определяет величину минимального рационо-адекватного скора и используется при расчёте ΔPAC и KPAC. Коэффициент различия аминокислотных скоров составил 86,03%, а интегральный показатель биологической ценности по аминокислотному составу достиг 118,71%, что позволяет отнести белок исследуемого паштета к высокоценным и указывает на его выраженный потенциал как источника полноценных белков.

Таблица 4 – Аминокислотный скор опытного образца паштета из верблюжатины

Аминокислота	Aj, г/100 г белка	Acj, г/100 г белка	Cj, %	ΔРАС, %	КРАС, %	БЦ, %	aj
Лизин	9,14	5,5	166,19	127,94	86,03	118,71	1
Тирозин + фенилаланин	8,03	6	133,8	95,55			0,81
Лейцин + изолейцин	6,79	11	61,75	23,5			0,37
Метионин	3,13	3	104,38	66,12			0,63
Валин	6,53	4,8	135,99	97,73			0,82
Треонин	5,74	4	143,61	105,36			0,86

Сопоставление показателей окислительной стабильности жира опытного и контрольного образцов паштета показывает, что включение функциональных добавок сопровождается выраженным улучшением этих характеристик (табл. 5). Значение pH снижается с 5,9 до 5,01, что соответствует уменьшению на 15,1%. Перекисное число уменьшается с 8,8 до 7,12 ммоль/кг (-19,1%), а кислотное число снижается с 1,43 до 1,25 мг КОН/г (-12,6%), что указывает на более низкую степень гидролиза липидов и лучшую сохранность жирового компонента в опытном образце по сравнению с контролем.

Таблица 5 – Физико-химические показатели образцов паштета из верблюжатины

Наименование показателей	Опытный образец	Контрольный образец
pH, ед.	5,01	5,9
Перекисное число жира, ммоль/кг	7,12±0,05	8,8±0,06
Кислотное число жира, мгКОН/г	1,25±0,02	1,43±0,03
Массовая доля влаги, %	67,8±0,05	65,8±0,05
ВУС %	83,2±0,01	77,0±0,01

Технологические показатели также демонстрируют положительное влияние растительных ингредиентов. Массовая доля влаги возрастает с 65,8 до 67,8%, что согласуется с высокой гидратационной способностью пищевых волокон и формированием более гидрофильной матрицы. Влагосвязывающая способность увеличивается с 77,0 до 83,2 и свидетельствует о формировании более устойчивой белково полисахаридной структуры, способной эффективно удерживать воду и стабилизировать консистенцию паштета при тепловой обработке и хранении.

Микробиологический анализ показал (табл. 6), что общее количество мезофильных аэробных и факультативно анаэробных микроорганизмов (КМАФАнМ) в обоих образцах не превышает установленную нормативную величину 1×10^3 КОЕ/г. При этом в опытном образце КМАФАнМ составляет $2,1\times10^2$ КОЕ/г, тогда как в контрольном образце значение достигает $4,7\times10^2$ КОЕ/г, что свидетельствует о приблизительно двукратном снижении микробной обсеменённости при использовании псиллиума и порошка брусники и указывает на дополнительный защитный эффект растительных функциональных добавок.

Таблица 6 – Микробиологические показатели образцов паштета из верблюжатины

Наименование показателей	Норма по НД	Опытный образец	Контрольный образец
КМАФАнМ, КОЕ/г	1×10^3	$2,1\times10^2$	$4,7\times10^2$

Обсуждение научных результатов

Изменения пищевой ценности опытного образца паштета обьясняется внесением низкобелковых растительных компонентов и роста доли гидратированной полисахаридной матрицы. Псиллиум, содержащий преимущественно пищевые волокна, связывает значительное количество воды и формирует гель, в котором массовая доля белка закономерно уменьшается при неизменной загрузке мясного сырья. Аналогичный эффект описан Noguerol A. и соавт., которые при увеличении доли псиллиума в растительных колбасах фиксировали дозозависимое снижение доли белка за счёт замещения его пищевыми волокнами [10], а в обзоре Mishra S. и соавт. показано уменьшение массовой доли белка в куриных котлетах при добавлении псиллиума на уровне 4-8%, что согласуется с

выявленной в нашем исследовании тенденцией [11]. Изменения содержания жира в продукте согласуется с работой Mus T. и соавт., где добавление на псиллиума в формулу мясного ланча улучшала структурно-текстурные показатели без статистически значимых изменений по суммарной массовой доле жира [12]. Обзор Ciobanu M. и соавт. также подчёркивает, что при умеренных дозах растительных волокон жировая составляющая классических мясных продуктов, как правило, сохраняется на уровне контроля [13].

Содержание витаминов С и Е в опытном образце существенно выше по сравнению с контролем, и такой прирост напрямую связан с внесением порошка брусники, который, согласно данным Dróżdż P. и соавт., относится к «superfruits» и содержит высокие концентрации аскорбиновой кислоты наряду с полифенолами и органическими кислотами [14]. Водорастворимый витамин С частично термолабилен, однако присутствие фенольных антиоксидантов и мягкий режим тепловой обработки способствуют его лучшей сохранности в системе паштета. В работах Kowalska K. и соавт. показано, что брусника и родственные ей виды Vaccinium богаты не только витамином С, но и витамином Е, а также комплексом полифенолов, обеспечивающих выраженные антиоксидантные свойства [15]. Обобщённый анализ Manessis G. и соавт. демонстрирует, что использование ягодных экстрактов, включая клюкву, в мясных системах снижает интенсивность липидной пероксидации и способствует лучшей сохранности жирорастворимых антиоксидантов, в том числе токоферолов, в процессе хранения [16]. Наблюдаемое у нас увеличение концентрации витамина Е по сравнению с контролем хорошо согласуется с такими данными и подтверждает возможность целенаправленного обогащения паштета антиоксидантными микронутриентами за счёт порошка брусники.

Добавление псиллиума и порошка брусники также сопровождалось снижением интенсивности первичного окисления липидов. Антоцианы и другие полифенолы брусники, а также аскорбиновая кислота и природные токоферолы функционируют как доноры водорода и хелаторы ионов переходных металлов, обрывают радикальные цепи окисления и стабилизируют ненасыщенные жирные кислоты. Гелеобразующий матрикс псиллиума дополнительно ограничивает диффузию кислорода и контакт липидов с каталитическими центрами. В работе Bayana B. и соавт. введение сухого экстракта жмыха брусники в мясной паштет приводило к замедлению накопления перекисей и росту общей антиоксидантной ёмкости продукта по сравнению с контролем [17]. Manea A. и соавт. при использовании порошков смородины и брусники в рецептурах салями зафиксировали дозозависимое подавление первичных и вторичных продуктов окисления жира, что проявлялось в более низких значениях показателей окисления в течение хранения [18].

Увеличения массовой доли влаги в опытном образце паштета, а также повышенная влагоудерживающая способность проудкта обьясняется тем фактом, что пищевые волокна псиллиума, обладающие развитой капиллярно-пористой структурой и большим числом гидрофильных групп, связывают значительные объёмы воды за счёт водородных связей и капиллярной сорбции. Часть свободной влаги переходит в более прочно удерживаемые формы, что уменьшает потери влаги при тепловой обработке и охлаждении. В обзорной работе Stanišić N. и соавт. показано, что различные типы пищевых волокон в мясных продуктах способны удерживать до 9,5 г воды на 1 г волокна и тем самым повышать выход и сочность готовых изделий [19]. Lee S. и соавт. в обзоре по стратегиям улучшения качества мясных продуктов подчёркивают, что растительные полисахариды и волокна рассматриваются как натуральная альтернатива фосфатам именно благодаря способности удерживать влагу и стабилизировать эмульсию [20]. Полученные нами значения согласуются с данными других исследований.

Заключение

Проведённые исследования показали, что обогащение паштета псиллиумом и порошком брусники приводит к комплексному улучшению его пищевой и функционально-технологической характеристики, по сравнению с контрольным образцом. На фоне незначительного снижения массовой доли белка и жира, отмечено увеличение содержания углеводов и выраженное обогащение микронутриентами антиоксидантной природы. Концентрация витамина С возросла с 0,1 до 0,99 мг/100 г, витамина Е с 0,2 до 1,12 мг/100 г. Аминокислотный состав паштета с функциональными компонентами характеризуется высоким аминокислотным скором по большинству незаменимых аминокислот и интегральной

биологической ценностью 118%, что подтверждает сохранение полноценности белка при введении растительных ингредиентов.

Функциональные добавки также обеспечили улучшение показателей окислительной стабильности и структуры продукта. Перекисное число жира снизилось с 8,8 до 7,12 ммоль/кг, кислотное число с 1,43 до 1,25 мг КОН/г; pH уменьшился с 5,9 до 5,01, что в совокупности свидетельствует о более устойчивом жировом компоненте и благоприятных условиях для замедления окислительных процессов. Массовая доля влаги увеличилась с 65,8 до 67,8%, влагосвязывающая способность с 77,0 до 83,2%, что указывает на формирование более развитой белково-полисахаридной матрицы и повышение сочности паштета. Показатель КМАФАнМ в опытном образце ($2{,}1\times10^2$ КОЕ/г) был почти вдвое ниже контрольного ($4{,}7\times10^2$ КОЕ/г) и существенно ниже нормы по НД (1×10^3 КОЕ/г), что отражает дополнительный защитный эффект растительных компонентов. Полученные результаты позволяют отнести разработанный паштет с псиллиумом и порошком брусники к перспективным функциональным мясным продуктам, объединяющим высокую пищевую ценность, улучшенную антиоксидантную защиту и удовлетворительные микробиологические показатели.

Список литературы

1. Optimization of the formulation of functional cooked sausage / M. Kaldarbekova et al // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2025. – Т. 5. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.341379.
2. Collagen Hydrolysate-Cranberry Mixture as a Functional Additive in Sausages / Y. Uzakov et al // Processes. – 2025. – Т. 13, № 10. – P. 3233. https://doi.org/10.3390/pr13103233.
3. Исследование влияния растительных компонентов на качественные показатели мясных продуктов / Ш.Ы. Кененбай и др. // Вестник Алматинского технологического университета. – 2025. – № 148(2). – С. 99-107. https://doi.org/10.48184/2304-568X-2025-2-99-107.
4. Study of the digestibility of camel meat proteins by enzymes of the gastrointestinal tract / S. Kenenbay et al. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2019. – Т. 315, № 2. – P. 022034. https://doi.org/10.1088/1755-1315/315/2/022034.
5. Suliman G.M. Camel meat as a future promising protein source / G.M. Suliman // Animal Frontiers. – 2023. – Т. 13, № 6. – P. 53-55. https://doi.org/10.1093/af/vfad065.
6. Belorio M. Psyllium: a useful functional ingredient in food systems / M. Belorio, M. Gómez // Critical reviews in food science and nutrition. – 2021. – Т. 62, № 2. – P. 527-538. https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1822276.
7. Psyllium (Plantago ovata Forsk): From evidence of health benefits to its food application / E.A.N. Franco et al // Trends in food science & technology. – 2020. – Т. 96. – P. 166-175. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.12.006.
8. Lingonberry (Vaccinium vitis-idaea L.) Fruit Phenolic Bioactivities – A Review of In Vitro and In Vivo Human Studies / P. Pärnänen et al // Microorganisms. – 2024. – Т. 12, № 9. – P. 1850. https://doi.org/10.3390/microorganisms12091850.
9. Debnath S.C. In vitro propagation strategies of medicinally important berry crop, lingonberry (Vaccinium vitis-idaea L.) / S.C. Debnath, U. Arigundam // Agronomy. – 2020. – Т. 10, № 5. – P. 744. https://doi.org/10.3390/agronomy10050744.
10. Noguerol A.T. The effect of psyllium (Plantago ovata Forsk) fibres on the mechanical and physicochemical characteristics of plant-based sausages / A.T. Noguerol, V. Larrea, M.J. Pagán // European Food Research and Technology. – 2022. – Т. 248, № 10. – P. 2483-2496. https://doi.org/10.1007/s00217-022-04063-2.
11. Synthesis, characterization and applications of polymethylmethacrylate grafted psyllium as flocculant / S. Mishra et al // Carbohydrate polymers. – 2014. – Т. 99. – P. 462-468. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.08.0.
12. The influence of psyllium husk utilized as a carbohydrate substitute on textural characteristics of chicken sausage and consumer preference / T. Elal Mus et al // Journal of Food Quality. – 2025. – Т. 2025, № 1. – P. 3061063. https://doi.org/10.1155/jfq/3061063.
13. Dietary Fibres in Processed Meat: A Review on Nutritional Enhancement, Technological Effects, Sensory Implications and Consumer Perception / M.M. Ciobanu et al // Foods. – 2025. – Т. 14, № 9. – P. 1459. https://doi.org/10.3390/foods14091459.

14. Evaluation of bioactive compounds, minerals and antioxidant activity of lingonberry (Vaccinium vitis-idaea L.) fruits / P. Dróżdż et al // Molecules. – 2017. – T. 23, № 1. – P. 53. https://doi.org/10.3390/molecules23010053.
15. Kowalska K. Lingonberry (Vaccinium vitis-idaea L.) fruit as a source of bioactive compounds with health-promoting effects – a review / K. Kowalska // International journal of molecular sciences. – 2021. – T. 22, № 10. – P. 5126. https://doi.org/10.3390/ijms22105126.
16. Plant-derived natural antioxidants in meat and meat products / G. Manessis et al // Antioxidants. – 2020. – T. 9, № 12. – P. 1215. https://doi.org/10.3390/antiox9121215.
17. Effects of lingonberry extract on the antioxidant capacity of meat paste / B. Bayana et al // Foods and Raw materials. – 2020. – T. 8, № 2. – P. 250-258. https://doi.org/10.21603/2308-4057-2020-2-250-258.
18. Effect of Fruit Powders as Natural Alternatives to Sodium Nitrite on Lipid Oxidation in Clean-Label Salami / A.I. Moraru Manea et al // Foods. – 2025. – T. 14, № 13. – P. 2262. https://doi.org/10.3390/foods14132262.
19. Integration of Dietary Fibre for Health Benefits, Improved Structure, and Nutritional Value of Meat Products and Plant-Based Meat Alternatives / N. Stanišić et al // Foods. – 2025. – T. 14, № 12. – P. 2090. https://doi.org/10.3390/foods14122090.
20. Recent strategies for improving the quality of meat products / S. Lee et al // Journal of Animal Science and Technology. – 2023. – T. 65, № 5. – P. 895. https://doi.org/10.5187/jast.2023.e94.

References

1. Optimization of the formulation of functional cooked sausage / M. Kaldarbekova et al // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2025. – T. 5. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.341379. (In English).
2. Collagen Hydrolysate-Cranberry Mixture as a Functional Additive in Sausages / Y. Uzakov et al // Processes. – 2025. – T. 13, № 10. – R. 3233. https://doi.org/10.3390/pr13103233. (In English).
3. Issledovanie vliyaniya rastitel'nykh komponentov na kachestvennye pokazateli myasnykh produktov / SH.Y. Kenenbai i dr. // Vestnik Almatinskogo tekhnologicheskogo universiteta. – 2025. – № 148(2). – S. 99-107. https://doi.org/10.48184/2304-568X-2025-2-99-107. (In Russian).
4. Study of the digestibility of camel meat proteins by enzymes of the gastrointestinal tract / S. Kenenbay et al. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2019. – T. 315, № 2. – R. 022034. https://doi.org/10.1088/1755-1315/315/2/022034. (In English).
5. Suliman G.M. Camel meat as a future promising protein source / G.M. Suliman // Animal Frontiers. – 2023. – T. 13, № 6. – R. 53-55. https://doi.org/10.1093/af/vfad065. (In English).
6. Belorio M. Psyllium: a useful functional ingredient in food systems / M. Belorio, M. Gómez // Critical reviews in food science and nutrition. – 2021. – T. 62, № 2. – R. 527-538. https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1822276. (In English).
7. Psyllium (Plantago ovata Forsk): From evidence of health benefits to its food application / E.A.N. Franco et al // Trends in food science & technology. – 2020. – T. 96. – R. 166-175. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.12.006. (In English).
8. Lingonberry (Vaccinium vitis-idaea L.) Fruit Phenolic Bioactivities – A Review of In Vitro and In Vivo Human Studies / P. Pärnänen et al // Microorganisms. – 2024. – T. 12, № 9. – R. 1850. https://doi.org/10.3390/microorganisms12091850. (In English).
9. Debnath S.C. In vitro propagation strategies of medicinally important berry crop, lingonberry (Vaccinium vitis-idaea L.) / S.C. Debnath, U. Arigundam // Agronomy. – 2020. – T. 10, № 5. – R. 744. https://doi.org/10.3390/agronomy10050744. (In English).
10. Noguerol A.T. The effect of psyllium (Plantago ovata Forsk) fibres on the mechanical and physicochemical characteristics of plant-based sausages / A.T. Noguerol, V. Larrea, M.J. Pagán // European Food Research and Technology. – 2022. – T. 248, № 10. – R. 2483-2496. https://doi.org/10.1007/s00217-022-04063-2. (In English).
11. Synthesis, characterization and applications of polymethylmethacrylate grafted psyllium as flocculant / S. Mishra et al // Carbohydrate polymers. – 2014. – T. 99. – R. 462-468. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.08.0. (In English).

12. The influence of psyllium husk utilized as a carbohydrate substitute on textural characteristics of chicken sausage and consumer preference / T. Elal Mus et al // Journal of Food Quality. – 2025. – Т. 2025, № 1. – R. 3061063. https://doi.org/10.1155/jfq/3061063. (In English).
13. Dietary Fibres in Processed Meat: A Review on Nutritional Enhancement, Technological Effects, Sensory Implications and Consumer Perception / M.M. Ciobanu et al // Foods. – 2025. – Т. 14, № 9. – R. 1459. https://doi.org/10.3390/foods14091459. (In English).
14. Evaluation of bioactive compounds, minerals and antioxidant activity of lingonberry (Vaccinium vitis-idaea L.) fruits / P. Dróżdż et al // Molecules. – 2017. – Т. 23, № 1. – R. 53. https://doi.org/10.3390/molecules23010053. (In English).
15. Kowalska K. Lingonberry (Vaccinium vitis-idaea L.) fruit as a source of bioactive compounds with health-promoting effects – a review / K. Kowalska // International journal of molecular sciences. – 2021. – Т. 22, № 10. – R. 5126. https://doi.org/10.3390/ijms22105126. (In English).
16. Plant-derived natural antioxidants in meat and meat products / G. Manessis et al // Antioxidants. – 2020. – Т. 9, № 12. – R. 1215. https://doi.org/10.3390/antiox9121215. (In English).
17. Effects of lingonberry extract on the antioxidant capacity of meat paste / B. Bayana et al // Foods and Raw materials. – 2020. – Т. 8, № 2. – R. 250-258. https://doi.org/10.21603/2308-4057-2020-2-250-258. (In English).
18. Effect of Fruit Powders as Natural Alternatives to Sodium Nitrite on Lipid Oxidation in Clean-Label Salami / A.I. Moraru Manea et al // Foods. – 2025. – Т. 14, № 13. – R. 2262. https://doi.org/10.3390/foods14132262. (In English).
19. Integration of Dietary Fibre for Health Benefits, Improved Structure, and Nutritional Value of Meat Products and Plant-Based Meat Alternatives / N. Stanišić et al // Foods. – 2025. – Т. 14, № 12. – R. 2090. https://doi.org/10.3390/foods14122090. (In English).
20. Recent strategies for improving the quality of meat products / S. Lee et al // Journal of Animal Science and Technology. – 2023. – Т. 65, № 5. – R. 895. https://doi.org/10.5187/jast.2023.e94. (In English).

Я.М. Узаков[1], Р.Р. Имамдунов[1]*, Р.К. Байгабылов[1], А.С. Красников[1], Ч.К. Авылов[2]
[1]Алматы технологиялық университеті,
A05H0E2, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Төле би көш., 100
[2]ФМБЖББҰ «Ресей биотехнологиялық университеті (РОСБИОТЕХ)»,
125080, Ресей Федерациясы, Мәскеу қ., Волоколамское шоссе көш., 11
*e-mail: radikov202@mail.ru

ПСИЛЛИУМ МЕН МҮКЖИДЕК ҰНТАҒЫНЫҢ ТҮЙЕ ЕТІНЕН ДАЙЫНДАЛҒАН ПАШТЕТТІҢ САПАЛЫҚ ЖӘНЕ МИКРОБИОЛОГИЯЛЫҚ КӨРСЕТКІШТЕРІНЕ ӘСЕРІ

Функционалды ет өнімдеріне деген сұраныстың артуы жағдайында дәстүрлі емес ет шикізаты негізінде функционалды компоненттері бар паштет әзірлеу өзекті міндеттердің бірі ретінде қарастырылады. Зерттеудің мақсаты псиллиум және мүкжидек ұнтағы арқылы байытылған түйе етінен паштет дайындау рецептурасын мен технологиясын негіздеу, сондай-ақ осы функционалды ингредиенттердің дайын өнімнің химиялық құрамы мен микробиологиялық көрсеткіштеріне әсерін бағалау болды. Зерттеу барысында тәжірибелік (псиллиум – 1,5%; мүкжидек ұнтағы – 1,5%) және бақылау үлгілері бірдей технологиялық схема бойынша, пісіру және кейінгі стерилизация кезеңдерін қамти отырып өндірілді. Талдау нәтижелері псиллиум мен мүкжидек ұнтағын енгізу ақуыз бен май мөлшерін сәл төмендетіп, көмірсулар үлесін, сондай-ақ С витаминінің (0,1-ден 0,99 мг/100 г дейін) және Е витаминінің (0,2-ден 1,12 мг/100 г дейін) концентрациясын арттыратынын көрсетті. Тәжірибелік паштет үлгісінде pH, пероксидтік және қышқылдық сандардың төмен мәндері және ылғал сақтау қабілетінің жоғары деңгейі тіркелді. Тәжірибелік үлгідегі КМАФАнМ көрсеткіші (2,1×10^2 КОЕ/г) бақылау үлгісіне қарағанда (4,7×10^2 КОЕ/г) шамамен екі есе төмен және НҚ бойынша нормадан (1×10^3 КОЕ/г) айтарлықтай төмен болды. Тәжірибелік үлгінің аминқышқылдық құрамын талдау дайын өнімнің интегралдық биологиялық құндылығының жоғары деңгейін (118,71%) көрсетті. Алынған нәтижелер тағамдық талшықтар мен жеміс-жидек ұнтақтарының ет жүйелеріне әсері жөніндегі әдеби деректермен үйлеседі және псиллиум мен мүкжидек ұнтағымен байытылған түйе етінен паштетті әрі қарайғы зерттеулер үшін перспективті объект ретінде ұсынуға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: *паштет, функционалды ет өнімі, түйе еті, псиллиум, мүкжидек.*

Ya.M. Uzakov[1], R.R. Imamdunov[1]*, R.K. Baigabylov[1], A.S. Krasnikov[1], Ch.K. Avylov[2]
[1]Almaty Technological University,
A05H0E2, Republic of Kazakhstan, Almaty, Tole bi str., 100
[2]FSBEI HE "Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH)",
125080, Russian Federation, Moscow, Volokolamskoe shosse str., 11
*e-mail: radikov202@mail.ru

EFFECT OF PSYLLIUM AND LINGONBERRY POWDER ON THE QUALITY AND MICROBIOLOGICAL CHARACTERISTICS OF CAMEL MEAT PÂTÉ

Against the background of increasing demand for functional meat products, the development of pâté with functional components based on unconventional meat raw material is a pressing task. The aim of this study was to substantiate the formulation and processing technology of camel meat pâté enriched with psyllium and lingonberry powder, as well as to assess the effect of these functional ingredients on the chemical composition and microbiological indicators of the finished product. In the course of the research, experimental (psyllium – 1,5%; lingonberry powder – 1,5%) and control samples were produced according to a unified technological scheme including cooking and subsequent sterilisation. According to the analytical results, the incorporation of psyllium and lingonberry powder slightly reduced the protein and fat content, but increased the proportion of carbohydrates and the concentrations of vitamin C (from 0,1 to 0,99 mg/100 g) and vitamin E (from 0,2 to 1,12 mg/100 g). The experimental pâté sample also exhibited lower pH values, peroxide value and acid value, and higher water-holding capacity. The count of mesophilic aerobic and facultative anaerobic microorganisms in the experimental sample (2,1×10² CFU/g) was almost twice as low as in the control (4,7×10² CFU/g) and substantially below the limit established by regulatory documentation (1×10³ CFU/g). Analysis of the amino acid composition of the experimental sample demonstrated a high integral biological value of the finished product (118,71%). The results obtained are consistent with literature data on the effect of dietary fibre and berry powders on meat systems and allow the developed camel meat pâté, enriched with psyllium and lingonberry powder, to be recommended as a promising object for further research.

***Key words:** pâté, functional meat product, camel meat, psyllium, lingonberry.*

Сведения об авторах

Ясин Маликович Узаков – академик НАЕН, д.т.н., профессор, Алматинский технологический университет, Республика Казахстан, г. Алматы; e-mail: uzakm@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-2878-7170.

Руслан Радикович Имамдунов* – магистрант, Алматинский технологический университет, г. Алматы, Казахстан; e-mail: radikov202@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-4003-5126.

Рамазан Кабдылканович Байгабылов – мастер-технолог Учебно-научного центра по переработке мяса, Алматинский технологический университет, Республика Казахстан, г. Алматы; e-mail: kazy2005@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8154-7742.

Александр Сергеевич Красников – магистрант, Алматинский технологический университет, г. Алматы, Казахстан; e-mail: krasnikovsasha98@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-7246-4396.

Чолпонкул Кыдырмышевич Авылов – академик Академии ПБ, доктор ветеринарных наук, профессор, Российский биотехнологический университет, Российская Федерация, г. Москва; e-mail: cavylov@bk.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5301-1040.

Авторлар туралы мәліметтер.

Ясин Маликович Узаков – ҚР ҰҒА академигі, техника ғылымдарының докторы, профессор, Алматы технологиялық университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қаласы; e-mail: uzakm@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-2878-7170.

Руслан Радикович Имамдунов* – магистрант, Алматы технологиялық университеті, Алматы қ., Қазақстан; e-mail: radikov202@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-4003-5126.

Рамазан Кабдылканович Байгабылов – мастер-технолог, Ет өңдеу оқу-ғылыми орталығы, Алматы технологиялық университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қаласы; e-mail: kazy2005@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8154-7742.

Александр Сергеевич Красников – магистрант, Алматы технологиялық университеті, Алматы қ., Қазақстан; e-mail: krasnikovsasha98@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-7246-4396.

Чолпонкул Кыдырмышевич Авылов – ПБ академиясының академигі, ветеринария ғылымдарының докторы, профессор, Российский биотехнологический университет, Ресей Федерациясы, Мәскеу қ.; e-mail: cavylov@bk.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5301-1040.

Information about the authors

Yasin Malikovich Uzakov – Academician of NAEN, Doctor of Technical Sciences, Professor, Almaty Technological University, Republic of Kazakhstan, Almaty; e-mail: uzakm@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-2878-7170.

Ruslan Radikovich Imamdunov* – Master's student, Almaty Technological University, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: radikov202@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-4003-5126.

Ramazan Kabdylkanovich Baigabylov – Master-Technologist, Educational and Scientific Center for Meat Processing, Almaty Technological University, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: kazy2005@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8154-7742.

Alexander Sergeevich Krasnikov – Master's student, Almaty Technological University, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: krasnikovsasha98@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-7246-4396.

Cholponkul Kydyrmyshevich Avylov – Academician of the PB Academy, Doctor of Veterinary Sciences, Professor, Russian Biotechnological University, Russian Federation, Moscow; e-mail: cavylov@bk.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5301-1040.

Поступила в редакцию 05.01.2026
Поступила после доработки 24.01.2026
Принята к публикации 26.01.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-35

CC BY 4.0
Check for updates

МРНТИ: 65.51.03

С.Г. Каманова, Г.Д. Акшораева, Б. Калемшарив, Г.Х. Оспанкулова*
Казахский агротехнический исследовательский университет им. С. Сейфуллина,
010000, Республика Казахстан, г. Астана, пр. Женіс, 62
*e-mail: bulashevag@gmail.com

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И ОРГАНОЛЕПТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАСТИТЕЛЬНЫХ НАПИТКОВ ИЗ ЗЕРНА НЕТРАДИЦИОННЫХ КУЛЬТУР

Аннотация: *В работе представлены результаты комплексного исследования физико-химических, органолептических и колориметрических характеристик растительных напитков, полученных из зерна овса, амаранта и тритикале, с целью оценки их технологической пригодности в качестве матрицы для производства ферментированных растительных продуктов. Определены основные показатели химического состава (белок, жир, углеводы, сухие вещества), реологические свойства (вязкость), кислотность (pH) и осмолярность напитков. Установлено, что овсяный напиток характеризуется наиболее сбалансированным профилем: повышенным содержанием водорастворимых белков, высокой вязкостью, оптимальной осмолярностью и стабильной pH-средой, что обусловлено присутствием β-глюканов, обеспечивающих коллоидную устойчивость и формирование однородной текстуры. Органолептическая оценка показала преимущество овсяного образца по ароматическим, вкусовым и структурным параметрам. Колориметрические измерения подтвердили его высокую светлоту и минимальное содержание окрашенных соединений. Амарантовый напиток проявил удовлетворительные сенсорные и структурные характеристики, обусловленные повышенным содержанием белка и липидов, тогда как напиток из тритикале продемонстрировал меньшую технологическую стабильность, но приемлемые вкусовые качества. Полученные данные свидетельствуют о технологической перспективности овсяного сырья для глубокой переработки и разработки ферментированных растительных продуктов функционального назначения, а также указывают на потенциал амаранта как альтернативного сырьевого компонента.*

Ключевые слова: *амарант, тритикале, овес, растительные напитки, физико-химические свойства, органолептика.*

Введение

Растительные продукты стремительно набирают популярность, и рынок развивается в ускоренном темпе. На эту тенденцию влияет целый ряд факторов: изменение привычек потребителей, рост интереса к альтернативным видам питания, а также повышенное внимание к устойчивым способам производства пищи, особенно белковых продуктов. Растительные аналоги молочной продукции становятся одной из таких альтернатив, удовлетворяя широкий спектр современных запросов.

©С.Г. Каманова, Г.Д. Акшораева, Б. Калемшарив, Г.Х. Оспанкулова, 2026

Рост потребительского интереса к альтернативам коровьему молоку обусловлен распространённостью непереносимости продуктов на его основе, включая лактозную недостаточность и аллергические реакции на белки коровьего молока. Наиболее широко применяемыми заменителями остаются соевые напитки. Однако у примерно 14% пациентов с аллергией на коровье молоко отмечается перекрёстная реактивность на сою [1]. Кроме того, во всем Западном мире концепции потребностей в питании расширяются от выживания и удовлетворения голода до использования пищи для укрепления здоровья и общего благополучия [2]. Интерес потребителей к здоровью и благополучию быстро растет во всем мире [3] и обусловлен ростом знаний о хронических заболеваниях и многочисленными жалобами на здоровье, которые в настоящее время связаны с различными доступными продуктами питания. Фактически, в настоящее время большинство людей потребляют заменители молока на растительной основе из предпочтения, а не по необходимости из-за аллергии [4]. Заменители молока на растительной основе часто воспринимаются как полезные, возможно, из-за связанных с ними благоприятных эффектов к здоровью, например, в отношении содержания витаминов, клетчатки или отсутствием холестерина [3].

Растительные аналоги молока представляют собой водные экстракты, полученные из масличных культур, злаков, псевдозлаков, семян и/или бобовых. Технологические этапы их производства во многом универсальны. Исходное сырьё предварительно замачивают в течение нескольких часов, после чего измельчают и экстрагируют водой. Полученную массу фильтруют для удаления нерастворимых частиц. На этом этапе могут добавляться дополнительные компоненты, такие как ароматизаторы, подсластители или стабилизаторы. Завершающие операции – стабилизация, гомогенизация и пастеризация – обеспечивают получение жидкого продукта, представляющего собой коллоидную суспензию или эмульсию [4].

Питательные свойства растительного молока будут зависеть от качества и типа используемого сырья, а также от типа выполняемой обработки [4]. Некоторые из этих экстрактов, например, из миндаля, риса и овса, содержат минимальное количество белка, кальция и железа по сравнению с коровьим молоком [5]. Таким образом, общим недостатком большинства растительных видов молока является низкое содержание белка. В исследовании Jeske et al. (2017a), половина проанализированных образцов показала менее 0,5% белок и только экстракт сои (2,6%) имели аналогичные значения по сравнению с коровьим молоком (3,7%) [6]. Однако важно подчеркнуть, что примерно у 14% пациентов с аллергией на коровье молоко также возникают реакции, связанные с потреблением сои [4]. Растительное молоко не содержит лактозы, а коровье молоко не содержит белка, но многие из этих заменителей основаны на аллергенных ингредиентах, таких как соя, миндаль, арахис и фасоль [6]. Таким образом, необходимо рассмотреть другие варианты, чтобы исключить аллергены и привлечь больше потребителей.

Объекты и методы исследований

Объекты исследования – зерно тритикале, овса голозерного и амаранта.

Общее содержание азота определяли по методу Кьельдаля. Содержание азота пересчитывали в белок с использованием коэффициента 5,75 согласно Fujihara et al. [7]. Содержание жира измеряли по методу Сокслета. Зольность определяли в муфельной печи путем прокаливания (4 ч, 600 °С), предварительно прогретой в тиглях (1 ч, 100°С). Влажность определяли их сушкой в сушильном шкафу при 103 °С до достижения постоянной массы. Содержание сухих веществ определяли на рефрактометре RUDOLPH J57.

Органолептическая оценка – по показателям: внешний вид, цвет, запах, вкус по 5-ти бальной шкале в соответствии с ГОСТ 8756.1-70 [8]. Измерения цветности (параметры L*, a*, b*) проводили спектрофотометром 3NH YS6010 в режиме трансмиссии/рефлектометрии d/0, с источником освещения D65 и апертурой X mm; данные усредняли по трем повторениям.

Вязкость определяли на реометре Brookfield используя метод ротационной вискозиметрии, основанный на измерении крутящего момента, необходимого для вращения шпинделя, погруженного в образец при определенной скорости и температуре. Измерения проводились в трёх повторах для каждого варианта обработки, результаты выражали в мПа·с.

Осмолярность (mOsm/kg) определяли на приборе осмометр Astori OsmoTouch 1.

Результаты исследований

Для научного обоснования качества, безопасности, функциональности и технологической пригодности определены физико-химические свойства образцов напитков

на растительной основе, полученные из зерна амаранта, овса и тритикале (табл. 1). Анализ данных позволяет оценить питательную ценность, структуру и функционально-технические характеристики исследуемых образцов.

Таблица 1 – Физико-химические свойства напитков на растительной основе

Наименование напитка	Белок, %	Жир, %	Углеводы, %	Сухие вещества, %	pH	Вязкость, мПас	Осмоляр-ность, mOsm/kg
Амарантовый	0,77±0,03	0,45±0,03	11,8±0,03	5,3±0,01	6,05±0,02	8,97±0,13	316±0,17
Овсяный	1,66±0,12	0,31±0,06	10,9±0,05	6,4±0,02	6,02±0,04	26,79±0,12	324±0,16
Тритикалевый	0,71±0,06	0,09±0,04	13,3±0,03	5,3±0,01	5,94±0,01	13,7±0,09	381±0,14

Содержание белка в напитках варьировало от 0,71% (тритикале) до 1,66% (овес). Наибольшая концентрация белка в овсяном напитке объясняется более высокой степенью экстракции водорастворимых белковых фракций, преимущественно альбуминов и глобулинов, характерных для овса. Напитки из зерна тритикале и амаранта преобладают менее растворимые проламины и глютелины, что снижает переход белковых веществ в водную фазу.

Содержание жира варьировало в пределах 0,09-0,45% и зависела от исходного содержания липидов в зерне и эффективности экстракции. Наибольшее содержание жира отмечено в амарантовом напитке (0,45%), что связано с высоким содержанием ненасыщенных жирных кислот и более высокой дисперсностью в водной среде.

Количество углеводов составило от 10,9 до 13,3% максимальное значение отмечено в напитке из зерна тритикале. Это отражает более высокое содержание крахмала и растворимых сахаров в исходном зерне данной культуры. Содержание сухих веществ составило 5,3-6,4%, что свидетельствует о низкой концентрации сухого остатка и объясняет жидкую консистенцию полученных напитков. Наиболее высокие показатели характерны для овсяного образца, что коррелирует с повышенной вязкостью (26,79 мПас) с лучшими эмульгирующимися свойствами овсяных β-глюканов, обеспечивающих стабильность суспензии, что подтверждено исследованиями [9].

Показатель pH находился в диапазоне 5,94-6,05, что соответствует слабокислой реакции среды, благоприятной для последующей ферментации заквасочными культурами молочнокислых бактерий. Осмолярность напитков варьировала от 316 до 318 mOsm/kg. Повышенные значения для напитка из зерна тритикале могут быть связаны с повышенной концентрацией растворимых углеводов и минеральные веществ, что указывает на потенциально более выраженные осмотические свойства и потенциально влияет на микробиологическую активность заквасочных культур [10].

Таким образом можно сделать вывод о том, что овсяный напиток характеризуется более сбалансированными физико-химическими показателями: высоким содержанием белка, умеренной вязкостью, оптимальной осмолярностью, что делает его перспективной основой для производства ферментированных растительных продуктов (йогуртов).

Для определения потребительских свойств напитков на растительной основе была проведена органолептическая оценка по четырем основным показателям: аромат, цветность, вкус и консистенция. Оценка проводилась по девятибалльной шкале, где 9 баллов соответствует «отлично», 1 балл – «неудовлетворительно». Результаты представлены на рисунке 1.

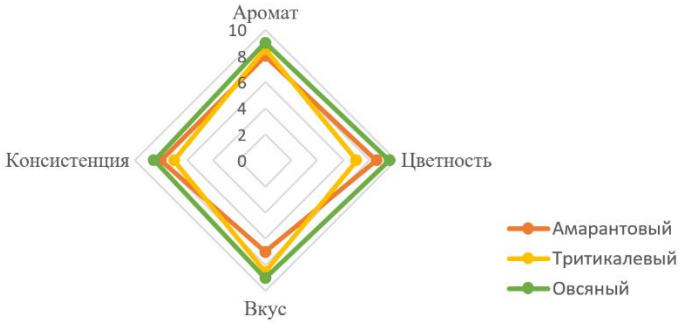


Рисунок 1 – Органолептическая оценка напитков на растительной основе

На основании полученных данных установлено, что наилучшими органолептическими характеристиками обладает овсяный напиток, который получил наивысшие баллы по всем показателям (аромат – 9,0; цветность – 9,5; вкус – 9,0; консистенция – 8,5). Это можно объяснить высоким содержанием растворимых бета-глюканов в овсе, способствующих формированию мягкой текстуры и сбалансированного вкуса, а также выраженным «сливочным» ароматом, характерным для овсяного сырья.

Амарантовый напиток также показал высокие результаты (7,0-8,5 баллов). Он характеризуется приятным ореховым ароматом и устойчивой консистенцией, что объясняется высоким содержанием белка (до 14-15%) и жиров (около 8%), формирующих кремовую структуру продукта.

Тритикалевый напиток получил схожие оценки, но слегка уступает по цветности (7,0 баллов), что может быть связано с менее выраженной пигментацией и специфическим злаковым оттенком вкуса. Тем не менее, высокий балл по вкусу (8,5) подтверждает его перспективность для ферментированных растительных продуктов.

Сравнительный анализ данных органолептической оценки показал, что наиболее сбалансированные свойства определены у овсяного и амарантового напитков, что делает их оптимальными матрицами для дальнейшего обогащения пробиотическими культурами и разработки функциональных кисломолочных растительных продуктов.

Цвет является одним из ключевых показателей потребительской привлекательности пищевых продуктов, результаты его оценки по системе CIELAB (L*, a*, b*) для исследуемых образцов представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Колориметрические характеристики растительных напитков

Напиток	L*	a*	b*	ΔE (разница с эталоном)
Овсянной	97,32±0,15	2,24±0,21	20,52±0,12	99,39±0,12
Амарантовый	79,66±0,26	4,66±0,32	25,32±0,10	83,63±0,15
Тритикалевый	69,40±0,13	4,43±0,28	19,05±0,18	72,02±0,16

В результате проведенного эксперимента овсяный напиток имеет наибольшую светлоту (97,32) практически белый оттенок, характерный для однородной эмульсии с низким содержанием пигментов. Амарантовый и тритикалевый напитки имеют более низкие значения L*, что указывает на более темный, кремовый или бежево-коричневый оттенок.

Все напитки имеют положительные значения (2,24-4,66), значит, наблюдается слабо выраженный красноватый оттенок. Амарантовый и тритикалевый напитки имеют наибольшее значение a* 4,66 и 4,43 соответственно возможно это связано с высоким содержанием фенольных соединений и пигментов в зерне данных культур. Все напитки имеют положительное значение b*, что говорит о желтоватом оттенке, типичном для злаковых напитков.

Анализ колориметрических характеристик показал, что овсяный напиток характеризуется наибольшей светлотой, что указывает на однородную дисперсию и минимальное присутствие окрашенных соединений. Амарантовый и тритикалевый напитки имеют более низкие значения светлоты и повышенные показатели a* и b*, что связано с присутствием натуральных пигментов, белков и продуктов термической обработки, влияющих на цветовую гамму.

Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что технологические свойства исследуемых образцов в значительной степени определяются биохимическим составом исходного зернового сырья и его способностью к экстракции водорастворимых макромолекул. Овсяный напиток демонстрирует наиболее оптимальный профиль: повышенное содержание белка (1,66 %), умеренную вязкость (26,79 мПа·с), сбалансированную осмолярность и стабильную pH-среду. Эти параметры отражают высокую экстрагируемость овсяных альбуминов и глобулинов, а также структурообразующую роль β-глюканов, обеспечивающих вязкость, коллоидную устойчивость и благоприятные реологические характеристики.

Анализ органолептических свойств подтверждает преимущество овсяного образца по всем ключевым сенсорным критериям. Мягкий вкус, выраженный сливочный аромат и однородная текстура коррелируют с высоким уровнем растворимых пищевых волокон и стабильностью коллоидной системы. Амарантовый напиток также характеризуется удовлетворительными сенсорными характеристиками, включая ореховый аромат и

кремообразную консистенцию, что обусловлено присутствием липидов и белков с высокой эмульгирующей способностью. Напиток из зерна тритикале, несмотря на более нейтральный цветовой профиль и злаковый привкус, демонстрирует перспективные показатели вкуса и может служить альтернативным сырьевым субстратом для ферментируемых продуктов.

Колориметрический анализ подтверждает различия в пигментном составе зернового сырья: овсяный напиток имеет наивысшую светлоту (L* = 97,32), что отражает минимальное содержание окрашенных соединений и высокую степень дисперсности. Более низкие показатели L* для амарантового и тритикалевого образцов связаны с присутствием фенольных соединений, натуральных пигментов и продуктов термических превращений, что в совокупности влияет на цветовую стабильность напитков.

С учётом полученных данных можно заключить, что овсяный напиток является наиболее технологически перспективной матрицей для разработки ферментированных растительных продуктов, включая аналоги йогуртов. Его стабильные реологические свойства, высокая коллоидная устойчивость, благоприятный сенсорный профиль и оптимальная кислотность создают предпосылки для эффективного роста и метаболической активности молочнокислых микроорганизмов. Амарантовый напиток также может служить качественной основой для функциональных продуктов с повышенной пищевой ценностью, тогда как тритикалевый образец требует дальнейшей оптимизации технологических параметров для улучшения его сенсорных и структурно-функциональных характеристик.

Таким образом, результаты исследования подтверждают целесообразность использования овса и амаранта как наиболее подходящего зернового сырья для глубокой переработки с целью получения высококачественных растительных напитков и ферментированных функциональных продуктов нового поколения.

Список литературы

1. Soy allergy in infants and children with IgE-associated cow’s milk allergy / R.S. Zeiger et al // The Journal of pediatrics. – 1999. – Т. 134, № 5. – P. 614-622.
2. Probiotic dairy products as functional foods / D. Granato et al //Comprehensive reviews in food science and food safety. – 2010. – Т. 9, № 5. – P. 455-470.
3. CRISPR/Cas9-mediated viral interference in plants / Z. Ali et al // Genome biology. – 2015. – Т. 16, № 1. – P. 238.
4. Jeske S. Evaluation of physicochemical and glycaemic properties of commercial plant-based milk substitutes / S. Jeske, E. Zannini, E.K. Arendt // Plant Foods for Human Nutrition. – 2017. – Т. 72, № 1. – P. 26-33.
5. Foods for special dietary needs: Non-dairy plant-based milk substitutes and fermented dairy-type products / O.E. Mäkinen et al // Critical reviews in food science and nutrition. – 2016. – Т. 56, № 3. – P. 339-349.
6. Jeske S. Past, present and future: The strength of plant-based dairy substitutes based on gluten-free raw materials / S. Jeske, E. Zannini, E.K. Arendt // Food research international. – 2018. – Т. 110. – P. 42-51.
7. Nitrogen-to-protein conversion factors for some cereal products in Japan / S. Fujihara et al // Journal of food science. – 2008. – Т. 73, № 3. – P. C204-C209.
8. ГОСТ 8756.1-70 Продукты пищевые консервированные. Методы определения органолептических показателей, соотношения составных частей и массы нетто. – Введ. 01.01.2019. – М.: Стандартинформ, 2019. – 11 с.
9. Structural and rheological properties of β-glucans in oat-based beverages / X. Guan et al // Carbohydrate Polymers. – 2020. – № 229. – P. 115547.
10. FAO/WHO. Food-based dietary guidelines and nutrient reference values. Rome: Food and Agriculture Organization. 2019.

References

1. Soy allergy in infants and children with IgE-associated cow’s milk allergy / R.S. Zeiger et al // The Journal of pediatrics. – 1999. – Т. 134, № 5. – R. 614-622. (In English).
2. Probiotic dairy products as functional foods / D. Granato et al //Comprehensive reviews in food science and food safety. – 2010. – Т. 9, № 5. – R. 455-470. (In English).
3. CRISPR/Cas9-mediated viral interference in plants / Z. Ali et al // Genome biology. – 2015. – Т. 16, № 1. – R. 238. (In English).

4. Jeske S. Evaluation of physicochemical and glycaemic properties of commercial plant-based milk substitutes / S. Jeske, E. Zannini, E.K. Arendt // Plant Foods for Human Nutrition. – 2017. – T. 72, № 1. – R. 26-33. (In English).
5. Foods for special dietary needs: Non-dairy plant-based milk substitutes and fermented dairy-type products / O.E. Mäkinen et al // Critical reviews in food science and nutrition. – 2016. – T. 56, № 3. – R. 339-349. (In English).
6. Jeske S. Past, present and future: The strength of plant-based dairy substitutes based on gluten-free raw materials / S. Jeske, E. Zannini, E.K. Arendt // Food research international. – 2018. – T. 110. – R. 42-51. (In English).
7. Nitrogen-to-protein conversion factors for some cereal products in Japan / S. Fujihara et al // Journal of food science. – 2008. – T. 73, № 3. – R. C204-C209. (In English).
8. GOST 8756.1-70 Produkty pishchevye konservirovannye. Metody opredeleniya organolepticheskikh pokazatelei, sootnosheniya sostavnykh chastei i massy netto. – Vved. 01.01.2019. – M.: Standartinform, 2019. – 11 s. (In Russian).
9. Structural and rheological properties of β-glucans in oat-based beverages / X. Guan et al // Carbohydrate Polymers. – 2020. – № 229. – R. 115547. (In English).
10. FAO/WHO. Food-based dietary guidelines and nutrient reference values. Rome: Food and Agriculture Organization. 2019. (In English).

Информация о финансировании: *Работа выполнена в рамках программно-целевого финансирования Министерства сельского хозяйства Республики Казахстан BR22883587 «Совершенствование и разработка наукоемких технологий глубокой переработки сельскохозяйственного сырья для укрепления продовольственной безопасности РК».*

С.Г. Каманова, Г.Д. Акшораева, Б. Калемшарив, Г.Х. Оспанкулова*
С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті,
010000, Қазақстан Республикасы, Астана қаласы, Жеңіс даңғылы, 62
*e-mail: bulashevag@gmail.com

ДӘСТҮРЛІ ЕМЕС ДӘНДЕРДЕН АЛЫНҒАН ӨСІМДІК НЕГІЗІНДЕГІ СУСЫНДАРДЫҢ ФИЗИКОХИМИЯЛЫҚ ЖӘНЕ ОРГАНОЛЕПТИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІ

Бұл мақалада сұлы, амарант және тритикале дәндерінен алынған өсімдік тектес сусындардың физика-химиялық, органолептикалық және колориметриялық сипаттамаларын кешенді зерттеу нәтижелері ұсынылған, олардың ашытылған өсімдік өнімдерін өндіруге арналған матрица ретіндегі технологиялық жарамдылығын бағалау мақсатында. Сусындардың негізгі химиялық құрамының параметрлері (ақуыз, май, көмірсулар және құрғақ зат), реологиялық қасиеттері (тұтқырлық), қышқылдығы (pH) және осмолярлығы анықталды. Сұлы сусынының ең теңдестірілген профилі анықталды: суда еритін ақуыз мөлшерінің жоғарылауы, жоғары тұтқырлық, оңтайлы осмолярлық және тұрақты pH, бұл коллоидты тұрақтылықты және біркелкі құрылымның қалыптасуын қамтамасыз ететін β-глюкандардың болуына байланысты. Органолептикалық бағалау сұлы сусынының хош иісі, дәмі және құрылымдық қасиеттері бойынша артықшылығын көрсетті. Колориметриялық өлшеулер оның жоғары жеңілдігін және боялған қосылыстардың минималды құрамын растады. Амарантты сусын ақуыз бен липидтердің мөлшерінің жоғарылауына байланысты қанағаттанарлық сенсорлық және құрылымдық сипаттамаларын көрсетті, ал тритикале сусыны технологиялық тұрақтылығы төмен, бірақ қолайлы дәм көрсетті. Алынған деректер сұлы шикізатының озық өңдеу және функционалдық мақсаттар үшін ашытылған өсімдік өнімдерін әзірлеу үшін технологиялық әлеуетін көрсетеді, сондай-ақ амаранттың балама шикізат компоненті ретіндегі әлеуетін көрсетеді.

Түйін сөздер: *амарант, тритикале, сұлы, өсімдік тектес сусындар, физика-химиялық қасиеттері, органолептикалық қасиеттері.*

S. Kamanova, G. Akshoraeva, B. Kalemshariv, G. Ospankulova*
S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University,
010000, Republic of Kazakhstan, Astana, Zhenis Ave. 62
*e-mail: bulashevag@gmail.com

PHYSICOCHEMICAL AND ORGANOLEPTIC PROPERTIES OF PLANT-BASED DRINKS FROM NON-TRADITIONAL CROPS

This paper presents the results of a comprehensive study of the physicochemical, organoleptic, and colorimetric characteristics of plant-based beverages obtained from oat, amaranth, and triticale grains, with the aim of assessing their technological suitability as a matrix for the production of fermented plant products. The key chemical composition parameters (protein, fat, carbohydrates, and dry matter), rheological properties (viscosity), acidity (pH), and osmolarity of the beverages were determined. The oat beverage was found to have the most balanced profile: increased water-soluble protein content, high viscosity, optimal osmolarity, and a stable pH, owing to the presence of β-glucans, which ensure colloidal stability and the formation of a uniform texture. Organoleptic evaluation revealed the superiority of the oat beverage in terms of aroma, flavor, and structural properties. Colorimetric measurements confirmed its high lightness and minimal content of colored compounds. The amaranth beverage demonstrated satisfactory sensory and structural characteristics due to its increased protein and lipid content, while the triticale beverage demonstrated lower technological stability but acceptable flavor. The obtained data demonstrate the technological potential of oat raw materials for advanced processing and the development of fermented plant products for functional purposes, and also point to the potential of amaranth as an alternative raw material component.

Key words: *amaranth, triticale, oats, plant-based beverages, physicochemical properties, organoleptic properties.*

Сведения об авторах

Светлана Георгиевна Каманова – PhD докторант институт «Инжиниринга и пищевых технологий», Казахский агротехнический исследовательский университет имени Сакена Сейфуллина, Республика Казахстан; e-mail: kamanovasveta@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9534-2721.

Гаухар Дюсенгалиевна Акшораева – PhD докторант институт «Инжиниринга и пищевых технологий», Казахский агротехнический исследовательский университет имени Сакена Сейфуллина, Республика Казахстан; e-mail: gaukhar_01.88@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4758-7059.

Бекжан Калемшарив – технолог институт «Инжиниринга и пищевых технологий», Казахский агротехнический исследовательский университет имени Сакена Сейфуллина, Республика Казахстан; e-mail: b.kalemshariv@kazatu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-00028036-9718.

Гульназым Хамитовна Оспанкулова* – к.б.н., профессор институт «Инжиниринга и пищевых технологий», Казахский агротехнический исследовательский университет имени Сакена Сейфуллина, Республика Казахстан; e-mail: bulashevag@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6043-4658.

Авторлар туралы мәліметтер

Светлана Георгиевна Каманова – PhD докторанты, Инжиниринг және азық-түлік технологиялары институты, Сәкен Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: kamanovasveta@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9534-2721.

Гаухар Дюсенгалиевна Акшораева – PhD докторанты, Инжиниринг және азық-түлік технологиялары институты Сәкен Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: gaukhar_01.88@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4758-7059.

Бекжан Калемшарив – Инжиниринг және азық-түлік технологиялары институты технологы, Сәкен Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: b.kalemshariv@kazatu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-00028036-9718.

Гульназым Хамитовна Оспанкулова* – б.ғ.к., профессор, Инжиниринг және азық-түлік технологиялары институты Сәкен Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: bulashevag@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6043-4658.

Information about the authors

Svetlana Kamanova – PhD candidate, Institute of Food Technology and Engineering, Saken Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Republic of Kazakhstan; e-mail: kamanovasveta@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9534-2721.

Gaukhar Akshoraeva – PhD candidate, Institute of Food Technology and Engineering, Saken Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Republic of Kazakhstan; e-mail: gaukhar_01.88@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4758-7059.

Bekzhan Kalemshariv – Technologist, Institute of Food Technology and Engineering; Saken Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Republic of Kazakhstan; e-mail: b.kalemshariv@kazatu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8036-9718.

Gulnazym Ospankulova* – PhD, Professor, Institute of Food Technology and Engineering; Saken Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Republic of Kazakhstan; e-mail: bulashevag@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6043-4658.

Поступила в редакцию 16.01.2026
Поступила после доработки 25.01.2026
Принята к публикации 27.01.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-36

МРНТИ: 65.51.29

BY 4.0
Check for updates

А.К. Кекибаева[*], С.Ш. Асрандина[2], С.Д. Атабаева[2], Г.И. Байгазиева[1], А.К. Ныгыметова[1]
[1]Алматы технологиялық университеті
050012, Қазақстан Республикасы, Алматы қ, Толе би көш, 100
[2]Экология және биоресурстар тұрақтылығы ҒЗИ,
әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті
500040, Қазақстан Республикасы, Алматы қ, Әл-Фараби даңғылы, 71
*e-mail: kekibaevaa@gmail.com

ИЗОТОНИКАЛЫҚ СУСЫНДАР ӨНДІРІСІ ТЕХНОЛОГИЯСЫНДА СТЕВИЯ СЫҒЫНДЫСЫН ҚОЛДАНУ

Аңдатпа: *Мақалада изотоникалық сусындар өндірісінде стевия (Stevia rebaudiana Bertoni) сығындысын қолданудың келешегі қарастырылған. Негізгі назар стевияның жоғары сапалы сулы-спиртті сығындысын алудың технологиялық схемасын әзірлеуге және изотоникалық әрі органолептикалық сипаттамаларын сақтай отырып, энергетикалық құндылығын төмендету мақсатында оны сусындар рецептурасына енгізуге аударылған. Құрғақ заттардың минималды мөлшерінде қарқынды тәттілікті қамтамасыз ететін стевиолгликозидтерді тиімді экстракциялау үшін сулы-спиртті экстрагенттің құрамы есептеліп, оңтайландырылды. Толық электролиттік профилін (Na^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}) және физиологиялық изотоникалылығын сақтай отырып, қант шәрбаты стевия сығындысымен алмастырылған сусындардың эталондық және тәжірибелік үлгілері әзірленді. Мөлдірлік, дәм, тәттілік, қышқылдық, осмолярлық және сақтау тұрақтылығы көрсеткіштерін қамтитын сусындарға органолептикалық және физика-химиялық бағалау жүргізілді. Нәтижелер тәжірибелік үлгінің калориясы төмен екенін, үйлесімді дәмге ие және эталондық сусынмен салыстырмалы тұрақтылығын көрсетті.*

Зерттеу нәтижелері стевия сығындысын қолдану көмірсу алмасуын бақылайтын адамдарды қоса алғанда, тұтынушылардың мақсатты аудиториясын кеңейтуге және функционалды төмен калориялы изотоникалық сусындарды жасауға мүмкіндік беретінін дәлелдейді. Әзірленген рецептуралар мен технологиялар өнімнің қауіпсіздігін, физиологиялық пайдасы мен тұтынушылық тартымдылығын ұштастыра отырып, өнеркәсіптік өндіріске енгізу үшін ұсынылады.

Түйін сөздер: *стевия сығындысы, изотоникалық сусындар, стевиолгликозидтер, сулы-спиртті экстракция, төмен калориялы өнімдер, электролиттік профиль.*

Кіріспе

Салауатты өмір салтына, ұтымды тамақтануға және алиментарлы-тәуелді аурулардың алдын алуға деген жаһандық қызығушылықтың артуы жағдайында функционалды сусындардың, соның ішінде изотониктердің рецептураларын әзірлеу мен жетілдіру ерекше өзектілікке ие болып отыр. Изотоникалық сусындар спорттық және профилактикалық тамақтану құрылымында маңызды орын алады, өйткені олар физикалық жүктеме кезінде жоғалған суды, электролиттерді және энергияны тез арада қалпына келтіруге арналған. Дәстүрлі түрде мұндай сусындардың құрамында қажетті осмолярлық пен энергетикалық құндылықты қамтамасыз ететін көмірсулар (сахароза, глюкоза, фруктоза) кеңінен қолданылады. Дегенмен, қантты шамадан тыс тұтыну семіздік, 2-типті қант диабеті және жүрек-қан тамырлары ауруларының даму қаупін арттыратын фактор ретінде қарастырылады, бұл физиологиялық тұрғыдан негізделген баламалы тәттілендіргіштерді іздеуді ынталандырады [1, 2].

Соңғы жылдары тамақ өнеркәсібінде өсімдік тектес табиғи төмен калориялы тәттілендіргіштерге, соның ішінде стевия сығындысына (Stevia rebaudiana Bertoni) ерекше көңіл бөлінуде. Стевия – Asteraceae тұқымдасына жататын көпжылдық шөптесін өсімдік, оның жапырақтарында қарқынды тәтті дәм беретін ерекше дитерпенді гликозидтер – стевиолгликозидтер бар. Бұл топтың негізгі өкілдері – стевиозид пен ребаудиозид А сахарозадан 200-300 есе тәтті болғанымен, энергетикалық құндылығы төмен және қандағы глюкоза деңгейінің күрт жоғарылауын тудырмайды [3, 4].

©А.К. Кекибаева, С.Ш. Асрандина, С.Д. Атабаева, Г.И. Байгазиева, А.К. Ныгыметова, 2026

Стевияға деген ғылыми қызығушылық оның жоғары тәттілік қабілетімен ғана емес, сонымен қатар қолайлы физиологиялық әсерімен де байланысты. Клиникалық зерттеулерге сәйкес, стевиолгликозидтер жоғары қауіпсіздікпен сипатталады, мутагендік және канцерогендік әсері жоқ, сондықтан олар көмірсу алмасуы бұзылған адамдардың диетасына енгізілуі мүмкін [5].

Спорттық және функционалды сусындар нарығының дамуы олардың сапасына қойылатын талаптардың күрделенуімен қатар жүреді. Қазіргі заманғы изотоникалық сусындар су-электролиттік теңгерімді тиімді толтырып қана қоймай, төмен калориялылықпен, компоненттердің жоғары биожетімділігімен және қолайлы органолептикалық сипаттамалармен ерекшеленуі тиіс. Осыған байланысты, дәстүрлі қантты стевия сығындысымен алмастыру – сусынның дәмдік тартымдылығын сақтай отырып, оның энергетикалық құндылығын төмендетудің перспективалы бағыты болып табылады [6].

Тамақтану физиологиясы тұрғысынан стевияны изотоникалық сусындарда қолдану осы өнімнің мақсатты аудиториясын кеңейтуге жаңа мүмкіндіктер ашады. Мұндай сусындарды спортшыларға ғана емес, дене салмағының жоғарылауы, инсулинге төзімділік және липидтер алмасуының бұзылуы бар адамдарға да ұсынуға болады. Бірқатар зерттеулер стевия компоненттерінің потенциалды гипергликемиялық және антиоксиданттық әсерін көрсетеді, бұл оған негізделген сусындардың функционалдық құндылығын одан әрі арттырады [7, 8].

Қазақстан мен Орталық Азия елдерінде метаболикалық бұзылулар жиілігінің артуы және белсенді өмір салтының танымалдылығы табиғи құрамы бар төмен калориялы функционалды өнімдерге деген тұрақты сұранысты қалыптастырады [9]. Сондықтан изотоникалық сусындардың формуласында стевия сығындысын қолдануды ғылыми негіздеу тамақ ғылымы үшін өзекті міндет болып табылады.

Зерттеудің мақсаты – стевия сығындысын алу технологиясын негіздеу және оны изотоникалық сусындар өндірісінде қолдану мүмкіндіктерін зерттеу.

Қойылған мақсатқа жету үшін келесі міндеттер анықталды: стевия сығындысын алу үшін оңтайлы сулы-спиртті экстрагент құрамын таңдау; стевия сығындысы негізіндегі изотоникалық сусынның рецептурасын есептеу және әзірлеу; алынған үлгілердің органолептикалық және физика-химиялық көрсеткіштерін бағалау.

Зерттеу нысандары мен әдістері

Бұл жұмыстың зерттеу нысандары ретінде өсімдік шикізаты, стевия сығындылары және оларды қолдана отырып әзірленген изотоникалық сусындардың дайын үлгілері алынды. Шикізат ретінде әл-Фараби атындағы ҚазҰУ «Экология және биоресурстардың тұрақтылығы» ҒЗИ-де селекциялық жолмен алынған кептірілген стевия жапырақтары (*Stevia rebaudiana Bertoni*) пайдаланылды. Стевия жапырақтары жоғары тәттілендіру қабілеті бар және төмен энергетикалық құндылыққа ие стевиолгликозидтердің негізгі көзі болып табылады.

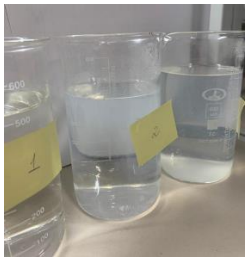
Зерттеудің модельдік нысандары ретінде этил спиртінің әртүрлі концентрациядағы сулы-спиртті экстрагенттерін қолдану арқылы алынған стевия сығындылары қарастырылды. Сығындылар құрғақ заттардың массалық үлесі, тәтті дәмнің қарқындылығы және органолептикалық сипаттамалары бойынша сараланды, бұл экстрагент құрамының биологиялық белсенді заттарды алу тиімділігіне әсерін бағалауға мүмкіндік берді. Қосымша зерттеу нысандары ретінде құрамында электролиттер, органикалық қышқылдар және стевия сығындысының әртүрлі концентрациялары бар изотоникалық сусындардың тәжірибелік үлгілері (прототиптері) алынды. Салыстырмалы талдау үшін дәстүрлі қант шәрбаты негізіндегі бақылау үлгілері пайдаланылды. 1-суретте зерттеудің негізгі нысандарының құрылымдық схемасы көрсетілген.



Стевия жапырағы



Стевия экстракты



Сусындар үлгісі

Сурет 1 – Зерттеудің негізгі нысандары

Зерттеулер Алматы технологиялық университетінің ғылыми зертханаларының базасында физика-химиялық, органолептикалық және есептеу-аналитикалық талдаудың стандартталған әдістерінің кешенін пайдалана отырып жүргізілді. Стевия сығындысын алу үшін оңтайлы экстрагент құрамын таңдау этил спиртінің концентрациясын вариациялау әдісімен жүзеге асырылды. Экстракция процесі шикізат пен экстрагенттің белгіленген қатынасында, температуралық режим мен процестің ұзақтығын қатаң бақылаумен жүргізілді. Алынған сығындылар сүзіліп, құрғақ заттардың шығымы мен органолептикалық көрсеткіштері бойынша талданды. Экстракцияның тиімділігі сығындының мөлдірлігі мен тәттілік қарқындылығы бойынша бағаланды. Сығындылар мен сусындардың физика-химиялық көрсеткіштері келесі стандартты әдістермен анықталды: құрғақ заттардың массалық үлесі – рефрактометриялық әдіс (ГОСТ ISO 2173-2013); белсенді қышқылдық (pH) – потенциометриялық әдіс (ГОСТ 26188-2016); салыстырмалы тығыздық – пикнометриялық әдіс (ГОСТ 12787-2021). Сығындылардағы этил спиртінің мөлшері спиртометриялық талдаудың жалпы қабылданған әдістемесі (ГОСТ 3639-79) бойынша бақыланды. Изотоникалық сусындардың рецептурасын есептеу Кеден одағының «Тамақ өнімдерінің қауіпсіздігі туралы» (КО ТР 021/2011) техникалық регламентінің талаптарын ескере отырып жүргізілді [10]. Стевия сығындысының дозасы қант шәрбаты бар бақылау үлгісіне қатысты баламалы тәттілікті қамтамасыз ету принципі бойынша тәжірибелік жолмен анықталды. Изотоникалық сусындардың тәжірибелік үлгілерін органолептикалық бағалау дегустациялық әдіспен (ГОСТ 6687.5-86) жүзеге асырылды. Бұл ретте дәм, хош иіс, түс, мөлдірлік және бөгде дәмнің болуы сияқты көрсеткіштер сараланды. Дегустация нәтижелері сипаттамалық және балдық шкалалар бойынша өңделді.

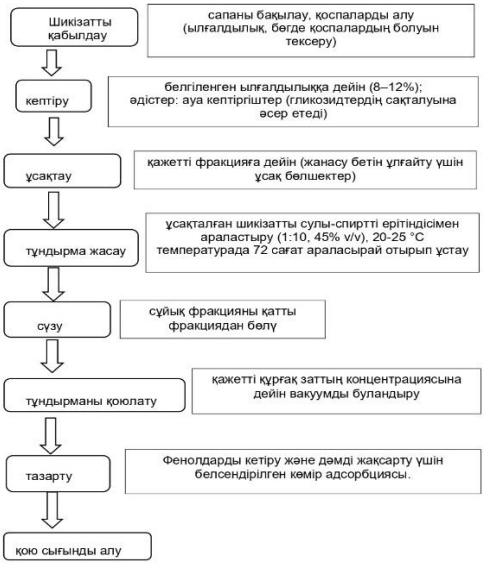
Зерттеу нәтижелері

Зерттеудің бірінші кезеңінде стевия жапырақтарынан стевиолгликозидтерді тиімді экстракциялау мақсатында сулы-спиртті ерітіндінің оңтайлы концентрациясы есептелді. Экстракциялау үшін 45% көлемдік үлестегі (v/v) этанол ерітіндісі таңдалды. Бұл концентрация полярлы және орташа полярлы компоненттердің толық алынуын қамтамасыз ететін «әмбебап» еріткіш ретінде анықталды. Стевия сығындысын алудың технологиялық нұсқасы 2-суретте көрсетілген.

Тұнбаны алу үшін су-спирт қоспасын есептеу келесідей жүргізілді: 100 г құрғақ стевия үшін: V_ ерітіндісі = 100 г × 10 мл/г = 1000 мл (1,0 л) еріткіш. Этанолдың қажетті концентрациясы 45% (v/v), яғни 100 мл дайын ерітіндіге 45 мл абсолютті этанол. 1000 мл дайын ерітінді үшін сізге таза этанол қажет (100%):

V_ethanol_pure = 1000 мл × 0.45 = 450 мл таза этанол (100% ABV).

Тұнба мен одан кейінгі сығындыны алу реттілігі 2-диаграммада көрсетілген.



Сурет 2 – Стевия сығындысын алудың технологиялық нұсқасы

Зерттеудің келесі кезеңінде алынған сығындының органолептикалық және физика-химиялық көрсеткіштері зерттелді (1-кесте).

Кесте 1 – Су-спирт әдісімен алынған стевия сығындысының сапа көрсеткіштері

Көрсеткіштер	Өлшем бірлігі	Мөлшері	Сипаттамалары / Ескертпесі
Органолептикалық көрсеткіштері			
Сыртқы түрі мен түсі:	–	мөлдір сұйықтық	шөгіндісіз мөлдір, ашық-қоңыр сұйықтық
Түсі	–	ашық-қоңыр	өсімдік сығындыларына тән
Иісі	–	әлсіз, тән	бөгде спиртсіз және көгерген иістерсіз
Дәмі	–	айқын тәтті	бөгде ащы немесе металл дәмі жоқ
Физика-химиялық көрсеткіштері			
Құрғақ заттардың массалық үлесі	%	2,5 ± 0,2	тиімді экстракция
Белсенді қышқыл (pH)	pH	5,6 ± 0,1	аздап қышқыл орта, технологиялық тұрақты
Этил спиртінің концентрацияға дейінгі көлемдік үлесі	% (v/v)	44,5 ± 0,5	есептелген концентрацияға сәйкес келеді
Салыстырмалы тығыздық (20 °C)	г/см³	0,94 ± 0,01	сулы-спиртті сығындыларына тән
Суда ерігіштік	–	бүтін	лайлылық пен тұнба жоқ
Сақтау тұрақтылығы (7 күн., 20 °C)	–	тұрақты	түсі мен дәмі өзгермейді

Әрі қарай, әзірленген сусындар сапасының органолептикалық және негізгі физика-химиялық көрсеткіштері зерттеліп, 2-суретте және 2-кестеде келтірілген.

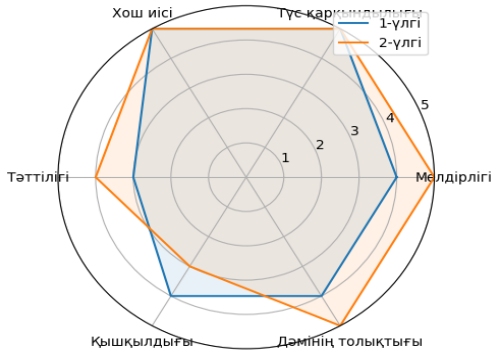
Кесте 2 – Сусындардың физика-химиялық көрсеткіштері

Көрсеткіштер	Өлшем бірлігі	Анықта-малық Үлгі (1)	Тәжірибелік үлгі (2)	Рецептураның сипаттамасы және әсері
Құрғақ заттардың массалық үлесі	%	6,2 ± 0,2	2,8 ± 0,2	1-үлгіде қант шәрбатының болуына байланысты; 2-үлгіде қантты стевия сығындысымен алмастыру арқылы төмендетілді
Энергетикалық құндылық	ккал/100 мл	24± 1	5± 0,2	Стевияны қолданған кезде калорияның айтарлықтай төмендеуі
Белсенді қышқылдық (pH)	pH	3,6 ± 0,1	3,7 ± 0,1	Лимон қышқылының ерітіндісіне байланысты
Көмірсулардың массалық концентрация-сы	г/100 мл	6,0 ± 0,2	0,2 ± 0,05	Үлгідегі көмірсулар іс жүзінде жоқ
Тәттілендіру қабілеті	шартты бірл.	жоғары	жоғары	2-үлгіде стевия сығындысы арқылы қол жеткізіледі

Физика-химиялық талдау нәтижелері келесі артықшылықтарды көрсетті: – Калориялықты төмендету: тәжірибелік үлгінің энергетикалық құндылығы 100 мл-ге 5 ккал-ды құрады, бұл анықтамалық үлгімен (24 ккал) салыстырғанда шамамен 5 есе төмен. Көмірсулар мөлшері: қантты алмастыру нәтижесінде көмірсулар концентрациясы 6,0 г/100 мл-ден 0,2 г/100 мл-ге дейін азайды. Бұл өнімді гликемиялық жүктемесі нөлге жуық сусындар қатарына жатқызуға мүмкіндік береді, бұл өнімнің диеталық бағытын айқындайды.

Профилограмма нәтижелері көрсеткендей, стевия сығындысы мен лимон қышқылының арасында дәмдік синергия байқалады. Стевияға тән кейбір өсімдік ноталары қышқыл ортада (pH 3,6-3,7) бейтараптанып, сусынның дәмін неғұрлым балғын және үйлесімді етеді.

Физика-химиялық талдау нәтижелері (2-кесте) келесі артықшылықтарды көрсетті: Калориялықты төмендету: тәжірибелік үлгінің энергетикалық құндылығы 100 мл-ге 5 ккал-ды құрады, бұл анықтамалық үлгімен (24 ккал) салыстырғанда шамамен 5 есе төмен. Көмірсулар мөлшері: қантты алмастыру нәтижесінде көмірсулар концентрациясы 6,0 г/100 мл-ден 0,2 г/100 мл-ге дейін азайды. Органолептика: профилограмма (3-сурет) бойынша тәжірибелік үлгі мөлдірлік, тәттілік және дәмнің толықтығы бойынша жоғары ұпайларға ие болды.



Сурет 3 – Әзірленген сусындардың профилограммасы

Ғылыми нәтижелерді талқылау

Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, изотоникалық сусындар рецептурасындағы сахарозаны стевия сығындысымен алмастыру өнімнің функционалдық бағытын түбегейлі өзгертеді. Тәжірибелік үлгідегі көмірсулар мөлшерінің 0,2 г/100 мл-ге дейін төмендеуі оны гликемиялық жүктемесі нөлге жуық өнімдер қатарына жатқызуға мүмкіндік береді. Бұл спортшылар үшін ғана емес, сонымен қатар қант диабетімен ауыратын немесе калорияны қатаң бақылайтын адамдар үшін де өте маңызды көрсеткіш.

Стевия сығындысы мен лимон қышқылының арасындағы дәмдік синергия нәтижесінде сусынның органолептикалық бейнесі жақсарды. Стевияға тән кейбір өсімдік ноталары қышқыл ортада бейтараптанып, сусынға балғындық береді. Бұл ретте электролиттік профильдің (Na^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}) сақталуы өнімнің негізгі міндеті – су-тұз теңгерімін қалпына келтіру функциясын толық қамтамасыз етеді.

Өсімдік сығындыларын өндіру параметрлер мен есептеулерді дәл таңдауды қажет етеді, өйткені биологиялық белсенді заттарды алу тиімділігі еріткіштің қасиеттеріне және шикізатты өңдеу жағдайларына тікелей байланысты. Стевияны қайта өңдеу технологиясында тұнбаны алу маңызды қадам болып табылады, оның сапалық сипаттамалары өнімді шоғырландыру мен тазартудың келесі кезеңдерін анықтайды.

Су-спирт қоспасын дұрыс есептеу экстракцияның оңтайлы жағдайларын қамтамасыз етуге, мақсатты қосылыстардың шығымдылығын арттыруға және технологиялық процестің тұрақтылығын қамтамасыз етуге мүмкіндік береді. Бұл жұмыста мұндай есептеу тәртібі және оны стевия жапырақтарынан тұнба алу үшін 45% су-спирт қоспасын дайындау кезінде қолдану қарастырылады, сонымен қатар негізгі технологиялық операциялардың реттілігі қысқаша сипатталған.

Ғылыми шолулар мен тәжірибелік зерттеулерге сүйене отырып, үш негізгі параметрлер таңдалады: еріткіштегі спирт концентрациясы «қатты фаза: еріткіш» қатынасы (S:L немесе қатты:сұйық), температура/экстракция уақыты. Стевиогликозидтерді алу үшін этанолдың оңтайлы %-ы әртүрлі: жеке жұмыстар максималды шамамен 35%-да (белгілі бір температурада), басқалары 59-70%-да (температура мен әдіске байланысты) белгіленеді. Сондықтан 45% көлемді таңдау (v/v) полярлы және орташа полярлы компоненттердің экстракциясын біріктіретін және қажетсіз заттардың шығарылуын азайтатын "әмбебап" концентрация болып табылды.

2-суреттегі қарастырылған технологиялық нұсқа стевиолгликозидтерді алу процесі өсімдік шикізатын өңдеудің көп сатылы және технологиялық жағынан күрделі түрлеріне жататынын көрсетеді.

1-кестеде келтірілген мәліметтерге сәйкес, алынған стевия сығындысы тұрақты органолептикалық және физикалық-химиялық көрсеткіштермен сипатталады, бұл су-спирт қоспасын және таңдалған экстракция режимдерін есептеудің дұрыстығын растайды. Алынған сығынды көрінетін механикалық қоспалар мен шөгінділерсіз ашық қоңыр түсті мөлдір сұйықтық болды. Иісі – стевияның өсімдік шикізатына тән, бөгде және өткір спирт ноталары жоқ. Дәмі – айқын тәтті, таза, бөгде дәмі жоқ, өсімдік тектес су-спирт сығындыларына тән. Ащы немесе металл дәмі рұқсат етілген сенсорлық шектен аспады.

Сығындыдағы құрғақ заттардың массалық үлесі стевия тұнбалары мен сығындыларына тән шектерде болды, бұл стевиолгликозидтер мен ілеспе суда еритін қосылыстардың тиімді алынуын көрсетеді. Сығындының белсенді қышқылдығы (pH)

сусындарда кейінірек қолдануға қолайлы және сақтау тұрақтылығын қамтамасыз ететін сәл қышқыл ортаға сәйкес келді.

Дайын сығындыдағы этил спиртінің көлемдік үлесі есептік мәнге сәйкес келді және берілген концентрациядан аспады, бұл жүргізілген есептеу мен су-спирт қоспасын дайындау әдістемесінің дұрыстығын растайды. Сығындының тығыздығы осы құрғақ заттардың құрамымен су-спирт ерітінділеріне тән шектерде болды. Сығынды суда жоғары ерігіштікке ие болды, бұл изотоникалық сусындардың рецептурасына енгізілген кезде маңызды технологиялық көрсеткіш болып табылады. Сығынды сумен сұйылтылған кезде бұлыңғырлық немесе тұнба байқалмады, бұл алынған жүйенің тұрақтылығын көрсетеді.

Сығынды изотоникалық сусындардың рецептурасын есептеу кезінде оны аз мөлшерде қолдануға мүмкіндік беретін жеткілікті тәттілендіру қабілетімен сипатталды. Бұл дайын өнімнің органолептикалық сипаттамаларын бұзбай оның энергетикалық құндылығының төмендеуін қамтамасыз етеді.

Зерттеудің мақсатына сәйкес нормативтік құжаттарда белгіленген минералды тұздары бар сусындардың прототиптерінің 2 рецептурасы әзірленді. Алғашқы үлгіде қант шәрбаты құрамында сусынның тағамдық құндылығын, оның тығыздығын арттыруға және сусынның дәстүрлі дәмін жасауға мүмкіндік береді. Екінші үлгі сусынның құрамында қант алмастырғыш болып табылатын және сусынның калориясын төмендететін стевия сығындысын қолдану арқылы жасалады. Өндірістің бұл бағыты қазіргі уақытта өзекті болып табылады, өйткені дұрыс тамақтану тамақтану құрамындағы қантты азайтуға бағытталған. Ұсынылған мәліметтерден көріп отырғанымыздай, стевия сығындысы қант шәрбатын тұтынуды іс жүзінде 2 есе азайтуға мүмкіндік береді, бұл сонымен қатар өндірістегі экономикалық маңызды аспект болып табылады.

2-суретте көрсетілген органолептикалық сапа көрсеткіштерін зерттеу бойынша 2-үлгі көрсеткіштер бойынша жоғары мәндерге ие: мөлдірлік, тәттілік, дәмнің толықтығы, бұл неғұрлым үйлесімді және бай дәм профилін көрсетеді. 1-үлгі неғұрлым айқын қышқылдықпен, біршама аз тәттілікпен сипатталады, бұл стевия сығындысы мен қышқыл компонентінің мөлшеріне байланысты болуы мүмкін. Түс пен хош иістің қарқындылығы бойынша екі үлгі де максималды ұпай жинады, бұл сусындардың визуалды және хош иісті сипаттамаларының тұрақтылығын көрсетеді.

2-кестеде келтірілген изотоникалық сусындардың физика-химиялық көрсеткіштері рецепт құрамының дайын өнімнің қасиеттеріне әсерін көрсетеді және эталондық және прототиптік үлгілерді салыстырмалы бағалауға мүмкіндік береді. Үлгілер арасындағы негізгі айырмашылықтар қант сиропын электролиттік құрамын сақтай отырып, тәжірибелі сусынның стевия сығындысымен алмастыруға байланысты.

Эталондық үлгідегі құрғақ заттардың массалық үлесі 6,2% құрайды, бұл қант шәрбатының болуымен байланысты, ол тәттілікті ғана емес, сонымен қатар еріген заттардың жалпы құрамына айтарлықтай үлес қосады. Тәжірибелік үлгіде бұл көрсеткіш 2,8%-ға дейін төмендейді, өйткені стевия сығындысы минималды мөлшерде енгізіледі және құрғақ заттардың концентрациясына әсер етпейді. Бұл айырмашылық сусындардың энергетикалық құндылығына тікелей әсер етеді: анықтамалық үлгіде ол 100 мл-ге 24-26 ккал құрайды, ал тәжірибелік үлгіде – 100 мл-ге 4-6 ккал-дан аспайды, бұл төмен калориялы изотоникалық сусындар жасау үшін стевияны қолданудың орындылығын растайды.

Екі үлгінің де белсенді қышқылдығы (pH) 3,6-3,7 диапазонында, бұл лимон қышқылы ерітіндісінің қосылуына байланысты және изотоникалық сусындар үшін оңтайлы. Бұл pH деңгейі өнімнің микробиологиялық тұрақтылығына және сергітетін дәмнің қалыптасуына ықпал етеді, ал қант шәрбатын стевия сығындысымен алмастыру сусынның қышқылдығына айтарлықтай әсер етпейді.

Анықтамалық үлгідегі көмірсулардың массалық концентрациясы қант сиропын енгізу арқылы 6,0 г/100 мл-ге жетеді. 2 үлгіде бұл көрсеткіш 0,2 г/100 мл-ге дейін төмендеді, бұл қанттың болмауына және стевия сығындысын тәттілендіргіш ретінде қолдануға байланысты. Бұл сусынның мақсатты аудиториясын, соның ішінде көмірсулардың тұтынылуын бақылайтын адамдарды айтарлықтай кеңейтуге мүмкіндік береді.

Осылайша, кестеде келтірілген физика-химиялық көрсеткіштер қант шәрбатын стевия сығындысымен алмастыру функционалдық және технологиялық сипаттамаларын сақтай

отырып, энергетикалық құндылығы мен көмірсулар мөлшері төмен изотоникалық сусын алуға мүмкіндік беретінін растайды.

Қорытынды

1. Изотоникалық сусындар өндірісі үшін стевия жапырақтарынан жоғары сапалы сығынды алудың оңтайлы технологиялық схемасы мен сулы-спиртті экстракциялау режимі (45% этанол) ғылыми негізделді.

2. Стевия сығындысын қолдану сусынның изотоникалық және органолептикалық қасиеттерін сақтай отырып, оның энергетикалық құндылығын 5 есеге жуық (24 ккал-дан 5 ккал-ға дейін), ал көмірсулар мөлшерін 30 есеге (6,0 г-нан 0,2 г/100 мл-ге дейін) төмендетуге мүмкіндік беретіні дәлелденді.

3. Әзірленген төмен калориялы изотоникалық сусынның рецептурасы мен технологиясы өнімнің физиологиялық пайдасын, қауіпсіздігін және жоғары тұтынушылық тартымдылығын ұштастыруға мүмкіндік береді.

4. Зерттеу нәтижелері стевия сығындысын функционалдық сусындар өндірісіне енгізудің жоғары перспективасын растайды, бұл спортшылар мен көмірсулар алмасуын бақылайтын тұлғалар үшін өнімдер нарығын кеңейтуге жағдай жасайды.

Әдебиеттер тізімі

1. Popkin B.M. Sweetening of the global diet, particularly beverages: patterns, trends, and policy responses / B.M. Popkin, C. Hawkes // The Lancet Diabetes & Endocrinology. – 2016. – Vol. 4, № 2. – P. 174-186.
2. Malik V.S. Sugar-sweetened beverages and cardiometabolic health / V.S. Malik, F.B. Hu // Journal of the American College of Cardiology. – 2019. – Vol. 73, № 12. – P. 1619-1634.
3. Синявина Н.Г. Стевия (Stevia rebaudiana Bertoni): биологические особенности и факторы, влияющие на рост растений и накопление сладких гликозидов / Н.Г. Синявина, А.А. Кочетов, К.В. Егорова // Ученые записки Казанского университета. Серия: Естественные науки. – 2022. – № 1. – С. 46-61.
4. Кочетов А.А. Стевия (Stevia rebaudiana Bertoni): биохимический состав, терапевтические свойства и использование в пищевой промышленности (обзор) / А.А. Кочетов, Н.Г. Синявина // Химия растительного сырья. – 2021. – № 2. – С. 5-16.
5. Stevioside and Rebaudioside A – Predominant ent-Kaurene Diterpene Glycosides of Therapeutic Potential: a review / E. Gupta et al // Czech Journal of Food Sciences. – 2016. – Vol. 34, № 4. – P. 281-299.
6. Маметов З.Т. Разработка рецептуры тонизирующего напитка на основе математической обработки данных / З.Т. Маметов, А.К. Кекибаева // Вестник Алматинского технологического университета. – 2025. – № 148(2). – P. 73-81.
7. Ruiz-Ruiz J.C. Biological activity of Stevia rebaudiana Bertoni and their relationship to health / J.C. Ruiz-Ruiz, Y.B. Moguel-Ordoñez, M.R. Segura-Campos // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. – 2017. – Vol. 57, № 12. – P. 2680-2690.
8. Lemus-Mondaca R. Stevia rebaudiana Bertoni, source of a high-potency natural sweetener: A comprehensive review on the biochemical, nutritional and functional aspects / R. Lemus-Mondaca, A. Vega-Gálvez, L. Zura-Bravo // Food Chemistry. – 2012. – Vol. 132, № 3. – P. 1121-1132.
9. Исаева Н.А. Қант алмастырғыш – стевия [Stevia rebaudiana Bertoni (L.)] қосылған суық қара шай өндірісі / Н.А. Исаева, Г.И. Байгазиева // Academic Scientific Journal of Chemistry. – 2021. – № 3. – С. 32-38.
10. Технический регламент Таможенного союза (ТР ТС) 021/2011 «О безопасности пищевой продукции» // Справочно-правовая база ТС. – 2011. – 23.12. – № 877. – Режим доступа: http://docs.cntd.ru/document/420261198 (дата обращения: 01.01.2026).

References

1. Popkin B.M. Sweetening of the global diet, particularly beverages: patterns, trends, and policy responses / B.M. Popkin, C. Hawkes // The Lancet Diabetes & Endocrinology. – 2016. – Vol. 4, № 2. – R. 174-186. (In English).
2. Malik V.S. Sugar-sweetened beverages and cardiometabolic health / V.S. Malik, F.B. Hu // Journal of the American College of Cardiology. – 2019. – Vol. 73, № 12. – R. 1619-1634. (In English).
3. Sinyavina N.G. Steviya (Stevia rebaudiana Bertoni): biologicheskie osobennosti i faktory, vliyayushchie na rost rastenii i nakoplenie sladkikh glikozidov / N.G. Sinyavina, A.A. Kochetov, K.V.

Egorova // Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Seriya: Estestvennye nauki. – 2022. – № 1. – S. 46-61. (In Russian).
4. Kochetov A.A. Steviya (Stevia rebaudiana Bertoni): biokhimicheskii sostav, terapevticheskie svoistva i ispol'zovanie v pishchevoi promyshlennosti (obzor) / A.A. Kochetov, N.G. Sinyavina // Khimiya rastitel'nogo syr'ya. – 2021. – № 2. – S. 5-16. (In Russian).
5. Stevioside and Rebaudioside A – Predominant ent-Kaurene Diterpene Glycosides of Therapeutic Potential: a review / E. Gupta et al // Czech Journal of Food Sciences. – 2016. – Vol. 34, № 4. – R. 281-299. (In English).
6. Mametov Z.T. Razrabotka retseptury toniziruyushchego napitka na osnove matematicheskoi obrabotki dannykh / Z.T. Mametov, A.K. Kekibaeva // Vestnik Almatinskogo tekhnologicheskogo universiteta. – 2025. – № 148(2). – R. 73-81. (In Russian).
7. Ruiz-Ruiz J.C. Biological activity of Stevia rebaudiana Bertoni and their relationship to health / J.C. Ruiz-Ruiz, Y.B. Moguel-Ordoñez, M.R. Segura-Campos // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. – 2017. – Vol. 57, № 12. – R. 2680-2690. (In English).
8. Lemus-Mondaca R. Stevia rebaudiana Bertoni, source of a high-potency natural sweetener: A comprehensive review on the biochemical, nutritional and functional aspects / R. Lemus-Mondaca, A. Vega-Gálvez, L. Zura-Bravo // Food Chemistry. – 2012. – Vol. 132, № 3. – R. 1121-1132. (In English).
9. Isaeva N.A. Қant almastyrғysh – steviya [Stevia rebaudiana Bertoni (L.)] қosylғan suyқ қara shai өndirisi / N.A. Isaeva, G.I. Baigazieva // Academic Scientific Journal of Chemistry. – 2021. – № 3. – S. 32-38. (In Kazakh).
10. Tekhnicheskii reglament Tamozhennogo soyuza (TR TS) 021/2011 «O bezopasnosti pishchevoi produktsii» // Spravochno-pravovaya baza TS. – 2011. – 23.12. – № 877. – Rezhim dostupa: http://docs.cntd.ru/document/420261198 (data obrashcheniya: 01.01.2026). (In Russian).

Қаржыландыру туралы ақпарат

Зерттеулер ҚР ҰҚМ қаржыландыратын ИРН № AP26199175 «Функционалдық қасиеттері жақсартылған мамандандырылған сусындарды дайындау үшін стевияның селекциялық линияларын зерттеу» ғылыми жобасы шеңберінде жүргізілді.

А.К. Кекибаева[1*], С.Ш. Асрандина[2], С.Д. Атабаева[2], Г.И. Байгазиева[1], А.К. Ныгыметова[1]
[1]Алматинский технологический университет
050012, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Толе би, д. 100
[2]НИИ Устойчивости экологии и биоресурсов,
Казахский национальный университет имени аль-Фараби
500040, Республика Казахстан, г. Алматы, пр. аль-Фараби, 71
*e-mail: kekibaevaa@gmail.com

ПРИМЕНЕНИЕ ЭКСТРАКТА СТЕВИИ В ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ИЗОТОНИЧЕСКИХ НАПИТКОВ

В статье рассмотрены перспективы применения экстракта стевии (Stevia rebaudiana Bertoni) в производстве изотонических напитков. Основное внимание уделено разработке технологической схемы получения высококачественного водно-спиртового экстракта стевии и его внедрению в рецептуру напитков с целью снижения энергетической ценности при сохранении изотонических и органолептических характеристик. Проведен расчет и оптимизация состава водно-спиртового экстрагента для эффективного извлечения стевиолгликозидов, обеспечивающих интенсивную сладость при минимальном содержании сухих веществ.

Разработаны эталонный и опытный образцы напитков, в которых сахарный сироп заменен экстрактом стевии, при этом сохранен полный электролитный профиль (Na^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}) и физиологическая изотоничность. Проведены органолептическая и физико-химическая оценка напитков, включающая показатели прозрачности, вкуса, сладости, кислотности, осмолярности и стабильности при хранении. Полученные результаты показали, что опытный образец обладает сниженной калорийностью, гармоничным вкусом и стабильностью, сопоставимой с эталонным напитком.

Исследование подтверждает, что применение экстракта стевии позволяет создавать функциональные низкокалорийные изотонические напитки, расширяя целевую аудиторию потребителей, включая лиц, контролирующих углеводный обмен. Разработанные рецептуры и

технологии могут быть рекомендованы для внедрения в промышленное производство, что обеспечивает сочетание безопасности, физиологической пользы и потребительской привлекательности продукта.

Ключевые слова: *экстракт стевии, изотонические напитки, стевиолгликозиды, водно-спиртовая экстракция, низкокалорийные продукты, электролитный профиль.*

A.K. Kekibaeva[1]*, S.Sh. Asrandina[2], S.D. Atabayeva[2], G.I. Baigazieva[1], A.K. Nygymetova[1]
[1]Almaty Technological University
100 Tole bi St., Almaty 050012, Republic of Kazakhstan
[2]Research Institute of Ecological Sustainability and Bioresources
Al-Farabi Kazakh National University
71 Al-Farabi Ave., Almaty 050040, Republic of Kazakhstan
*e-mail: kekibaevaa@gmail.com

APPLICATION OF STEVIA EXTRACT IN THE PRODUCTION TECHNOLOGY OF ISOTONIC BEVERAGES

The article examines the prospects of using stevia extract (Stevia rebaudiana Bertoni) in the production of isotonic beverages. The main focus is on the development of a technological scheme for obtaining a high-quality hydro-alcoholic stevia extract and its integration into the beverage formulation to reduce energy value while maintaining isotonic and organoleptic characteristics. The composition of the hydro-alcoholic extractant was calculated and optimized for the efficient extraction of steviol glycosides, which provide intense sweetness with a minimum content of dry substances. Reference and experimental beverage samples were developed, in which sugar syrup was replaced with stevia extract, while maintaining the full electrolyte profile (Na^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}) and physiological isotonicity. Organoleptic and physicochemical evaluations of the beverages were conducted, including indicators of clarity, taste, sweetness, acidity, osmolarity, and storage stability. The results obtained showed that the experimental sample possesses reduced calorie content, a harmonious taste, and stability comparable to the reference beverage. The study confirms that the use of stevia extract enables the creation of functional low-calorie isotonic beverages, expanding the target consumer audience to include individuals monitoring carbohydrate metabolism. The developed formulations and technologies can be recommended for industrial implementation, ensuring a combination of safety, physiological benefits, and consumer appeal.

Key words: *stevia extract, isotonic beverages, steviol glycosides, hydro-alcoholic extraction, low-calorie products, electrolyte profile.*

Авторлар туралы мәліметтер

Анара Канбековна Кекибаева* – PhD, Алматы технологиялық университетінің «Астық өнімдері және қайта өңдеу өндірістерінің технологиясы» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Қазақстан Республикасы; e-mail: kekibaevaa@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3639-1341.

Салтанат Шынтаевна Асрандина – Биотехнология кафедрасының профессоры, Биология және биотехнология факультеті, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Қазақстан Республикасы; e-mail: asaltanat@yandex.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1354-582X.

Сауле Джумагалиевна Атабаева – Биотехнология кафедрасының профессоры, Биология және биотехнология факультеті, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Қазақстан Республикасы; e-mail: sauleat@yandex.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4704-6909.

Гульгайша Ильясовна Байгазиева – б.ғ.к., Алматы технологиялық университетінің «Астық өнімдері және қайта өңдеу өндірістерінің технологиясы» кафедрасының профессоры, Қазақстан Республикасы; e-mail: gulgaisha.atu@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9163-4767.

Айдана Ныгыметова – Алматы технологиялық университетінің 4 курс студенті; e-mail: aidana.zoha@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-9753-4675.

Сведения об авторах

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.

Салтанат Шынтаевна Асрандина – профессор кафедры «Биотехнология», факультет Биологии и биотехнологии, Казахский Национальный университет имени Аль-Фараби, Республика Казахстан; e-mail: asaltanat@yandex.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1354-582X.

Сауле Джумагалиевна Атабаева – профессор кафедры «Биотехнология», факультет Биологии и биотехнологии, Казахский Национальный университет имени Аль-Фараби,Республика Казахстан; e-mail: sauleat@yandex.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4704-6909.

Гульгайша Ильясовна Байгазиева – кандидат биологических наук, профессор кафедры «Технология хлебопродуктов и перерабатывающих производств», Алматинский технологический

университет, Республика Казахстан; e-mail: gulgaisha.atu@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9163-4767.

Айдана Ныгыметова – студентка 4 курса Алматинского технологического университета; e-mail: aidana.zoha@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-9753-4675.

Information about the authors

Anara Kanbekovna 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.

Saltanat Shyntaevna Asrandina – Professor of the Department of Biotechnology, Faculty of Biology and Biotechnology, Al-Farabi Kazakh National University, Republic of Kazakhstan; e-mail: asaltanat@yandex.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1354-582X.

Saule Dzhumagalievna Atabaeva – Professor of the Department of Biotechnology, Faculty of Biology and Biotechnology, Al-Farabi Kazakh National University, Republic of Kazakhstan; e-mail: sauleat@yandex.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4704-6909.

Gulgaisha Ilyasovna Baigazieva – Candidate of Biological Sciences, Professor of the Department of «Technology of Grain Products and Processing Industries», Almaty Technological University, Republic of Kazakhstan; e-mail: gulgaisha.atu@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9163-4767.

Aidana Nygymetova – 4th-year student of Almaty Technological University; e-mail: aidana.zoha@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-9753-4675.

Редакцияға енуі 06.01.2026
Өңдеуден кейін түсуі 27.01.2026
Жариялауға қабылданды 30.01.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-37

ҒТАХР: 65.59.03

CC BY 4.0
Check for updates

А.К. Суйчинов[1], Ж.С. Есимбеков[1], Д.К. Дукенбаев[1,2]*

[1]«Қазақ қайта өңдеу және тамақ өнеркәсібі ғылыми-зерттеу институты» ЖШС Семей филиалы,
071410, Қазақстан Республикасы, Семей қаласы, Байтұрсынов көшесі, 29
[2]Шәкәрім университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қаласы, Глинки көшесі, 20 А
*e-mail: da_mir.1991@mail.ru

УЛЬТРАДЫБЫСТЫҚ ӨҢДЕУДІҢ СИЫР ҚАРЫНЫНЫҢ ҚҰРЫЛЫМДЫҚ-МЕХАНИКАЛЫҚ ЖӘНЕ ФУНКЦИОНАЛДЫҚ ҚАСИЕТТЕРІНЕ ӘСЕРІ

Аңдатпа: *Мақалада ультрадыбыстық өңдеудің сиыр қарынының құрылымдық-механикалық және функционалдық қасиеттеріне әсерін зерттеу нәтижелері келтірілген. Сонымен қатар, ет өңдеу өнеркәсібінде екінші реттік ет шикізатын ұтымды пайдалану және өнім ассортиментін кеңейту тұрғысынан оның қолданылуының өзектілігі қарастырылған. Табиғи ресурстарды ұтымды пайдалану мен өндірістің қоршаған ортаға әсерін азайтудың өзекті жолы – қалдықсыз өндіріс жүйесіне көшу. Осы мақсатта ультрадыбыстың әртүрлі ортада (сүт сарысуы, лимон және сірке қышқылы ерітінділері, тұз ерітіндісі (NaCl) сиыр қарнының сапалық көрсеткіштеріне әсерін анықтау бойынша эксперименттік зерттеулер жүргізілді. Зерттеу нәтижелері орта таңдауының өнімнің су байланыстыру қабілетіне және ылғал ұстау қабілетіне, pH мәніне, органолептикалық көрсеткіштері, түсіне және салмақ жоғалтуына елеулі әсер ететінін көрсетті. Айқындалғандай, лимон қышқылы өнімнің ылғал ұстау қабілетін тұрақтандырса да, масса жоғалуының жоғары болуымен қатар жүреді; сірке қышқылы су байланыстыру қабілетінің күрт төмендеуіне әкеледі; ал тұз ерітіндісі (NaCl) ылғал байланыстыруға оң әсер ететінімен, ортаның сілтіленуіне себеп болады. Ең жұмсақ әсерді сүт сарысуы көрсетті, ол шикізаттың негізгі қасиеттерінің сақталуын қамтамасыз етті. Алынған деректер ультрадыбысты субөнімдердің технологиялық құндылығын арттыру және ет өңдеуде ресурстарды үнемдейтін технологияларды дамыту үшін қолданудың перспективті екенін көрсетті.*

Түйін сөздер: *сиыр қарыны, субөнімдер, ультрадыбыстық өңдеу, су байланыстыру қабілеті, ылғал ұстау қабілеті, органолептикалық қасиеттер, ет өңдеу өнеркәсібі.*

©А.К. Суйчинов, Ж.С. Есимбеков, Д.К. Дукенбаев, 2026

Кіріспе

Ет өңдеу өнеркәсібінің қарқынды дамып келе жатқан және перспективті бағыттарының бірі – екінші реттік ет және басқа да тағамдық шикізатты пайдалана отырып, жаңа рецептуралар мен технологияларды әзірлеу болып табылады. Бұл шикізатта жеткілікті мөлшерде ақуыздар, майлар, витаминдер және микроэлементтер бар. Екінші реттік ет шикізатын өндіріс процесіне енгізу экологиялық мәселелерді шешуге, азық-түлік өнімдерінің ассортиментін кеңейтуге және олардың сапасын жақсартуға ықпал етеді.

Табиғи шикізат ресурстарын ұтымды пайдалану және өндірістің антропогендік әсерін азайту мәселелерін шешудің өзекті бағыты – қалдықсыз өндіріс циклдеріне көшу болып табылады. Шикізатты кешенді пайдалану арқылы іс жүзінде барлық қосалқы өнімдерді тиімді өңдеу мүмкіндігі туады, бұл ғылыми зерттеулермен расталып, кәсіпорындардағы тәжірибеде дәлелденген [1].

Ет өңдеу өнеркәсібінде мал және ауыл шаруашылығы жануарларын өңдеу барысында қосалқы шикізаттың айтарлықтай көлемі пайда болады, алайда оның тағамдық мақсатта пайдалану әлеуеті толық жүзеге асырылмай отыр. Қасаптау кезінде алынатын қосалқы өнімдер арасында ең құнды ақуыз көзі – субөнімдер болып табылады. Олардың жоғары тағамдық құндылығына қарамастан, субөнімдерді ұтымды өңдеу мәселелері әлі толық зерттелмеген. Екінші категориялы жоғары ақуызды субөнімдер қатарына қарын жатады, оның ақуыз мөлшері (100 грамм өнімге 17,1 г, оның 10,5 г-ы коллаген) екінші сортты сиыр етінің ақуыз мөлшерімен бірдей. Сонымен қатар, қарындағы байланыстырғыш тін ақуызының үлесі сәйкес көрсеткіштен 4,2 есе артық, ал тұз ерітіндісінде ерітінді болатын ақуыз мөлшері тек 0,8% құрайды. Амин қышқылдарының құрамына қарай қарынды, бірінші сортты сиыр етімен салыстырғанда төмендеу болса да, оның құрамында 30% дейін алмастырылмайтын амин қышқылдары бар [2].

Субөнімдерді ұтымды пайдалану бойынша ең перспективті бағыт – оларды жоғары сапалы және экономикалық тиімді ет өнімдеріне айналдыру болып табылады. Бұған тартылған еттен жасалған жартылай фабрикаттар, сондай-ақ пісірілген, түтінделген және жартылай түтінделген шұжықтар жатады. Осы өнім түрлері сақтау мерзімінің ұзақтығымен және тұтынушылар арасында жоғары сұраныспен ерекшеленеді.

Талдау көрсеткендей, екінші категориялы субөнімдер, әсіресе қарын, қазіргі таңда негізінен төмен бағалы сегменттегі шұжық өнімдерін (III сортты ливер шұжығы) өндіруде қолданылады, олар төмен тиімділік пен шектеулі тұтынушылық сұраныспен сипатталады. Сонымен қатар, қарын желатин, студень және қан шұжықтарын өндіруде пайдаланылады, алайда олардың өндіріс көлемі аз; бұл шикізаттан паштет өнімдері іс жүзінде шығарылмайды. Дегенмен, субөнімдерді өнеркәсіптік қайта өңдеу, тіпті төмен рентабельділік жағдайында (2-4%), оларды шикі күйінде сатудан тиімдірек екені атап өтіледі [2].

Дүниежүзілік ғылыми қауымдастықтың тамақ өнеркәсібі саласындағы зерттеулері ресурстарды үнемдейтін технологияларды құру және қолдануға бағытталған, бұл өндіріс процесінің технологиялық тиімділігін арттыруға және тамақ өнімдерінің сапасын жақсартуға негізделген. Осы бағытта ультрадыбыстық өңдеуді қолдану ерекше қызығушылық тудырады. [4].

Ультрадыбыс – бұл жылдам, әмбебап және экологиялық таза технология болып табылады, ол тамақ өнімдерін өңдеу саласында өнім сапасын жақсарту және қауіпсіздігін қамтамасыз ету үшін кеңінен қолданылады. Сонымен қатар, бұл өңдеу әдісі технологиялық процестерді жеделдету және ет шикізатының сапасын анықтау әдістерін жетілдіру потенциалын иеленеді. Осыған байланысты ультрадыбыстың биологиялық объектілерге әсер ету механизмдерін терең зерттеп, олардың өңдеу үшін оңтайлы режимдерін анықтауға бағытталған ғылыми зерттеулер жүргізу қажет [5, 6].

Ет өңдеу өнеркәсібінде ультрадыбыстық өңдеу негізінен сапа көрсеткіштерін бақылау, микроорганизмдерді инактивациялау, сондай-ақ етті өңдеу технологиялық процестерін жетілдіру және жеделдету мақсатында қолданылады. Ультрадыбыстың оң әсері байланыстырғыш тіндердің және бұлшықет талшықтарының ішінара бұзылуымен байланысты, бұл ет ферменттерінің әсерін күшейтіп, массалық алмасу процестерін жандандыру арқылы тіндердегі биохимиялық процестердің қарқынды дамуына қолайлы жағдай жасайды [7].

Ультрадыбыс – тамақ өнімдерін өңдеуде экологиялық қауіпсіз технология ретінде қарастырылады және ол жоғары жиілікті төмен интенстивтілікті өрісте (100 кГц – 1 МГц, <1

Вт/см²) бұзбайтын сапа бақылау үшін, сондай-ақ төмен жиілікті жоғары интенстивтілікті өрісте (20–100 кГц, >1 Вт/см²) ақуыз молекулаларын модификациялау үшін кеңінен қолданылады [8]. Соңғы режим кавитация, механикалық ығысу және турбуленттік арқылы механикалық, химиялық және термиялық әсерлер тудыруы мүмкін, бұл процесс жергілікті және қысқа мерзімді қысым мен температураның көтерілуімен жүреді [9]. Мұндай әсер ақуыз молекулаларының сутегі байланыстарына, гидрофобтық өзара әрекеттесулерге және конформациясына әсер етеді. Кавитация мен механикалық тербелістердің ықпалында ақуыз молекулалары арасындағы ковалентті емес байланыстар бұзылады, бұл турбуленттік пен микроағындардың әсерінен олардың құрылымдық қайта құрылуына және функционалдық қасиеттерінің өзгеруіне әкеледі [10].

Зерттеудің мақсаты

Жұмыстың мақсаты — сиыр қарнының құрылымдық-механикалық және функционалдық қасиеттеріне ультрадыбыстық өңдеудің әсерін зерттеу

Зерттеу материалдары мен әдістері

Зерттеу объектісі ретінде 2 кг сиыр қарны қолданылды. Шикізатты беттік кірі мен шырынын кетіру үшін ағынды су астында жуып, кейін біркелкі өңдеуді қамтамасыз ету мақсатында шамамен 5×5 см өлшеміндегі бөліктерге кесілді.

Эксперимент жүргізу үшін дайындалған қарын төрт бірдей бөлікке бөлініп, әрқайсысының салмағы 500 г құрады. Үлгілер өңдеу түріне сәйкес белгіленген жеке ыдыстарға орналастырылды: сүт сарысуы (үлгі № 1), 0,5% лимон қышқылы ерітіндісі (үлгі № 2), 1% сірке қышқылы ерітіндісі (үлгі № 3), 2% тұз ерітіндісі (NaCl) (үлгі № 4).

Ерітінділер шикізат пен ортаның 1:3 қатынасында дайындалды. Үлгілер үшін келесі құрамдар қолданылды: сүт сарысуы – +20 ± 2°C температурада 1,5 л; 0,5% лимон қышқылы ерітіндісі – 1,5 л суға 7,5 г лимон қышқылы; 1% сірке қышқылы ерітіндісі – 1,5 л суға 70% концентрациялы сірке қышқылынан 15 мл; 2% тұз ерітіндісі (NaCl) – 1,5 л суға 30 г тұз.

Ультрадыбыстық өңдеу зертханалық ваннада 60 кГц жиілікте және әрбір үлгіге 60 минуттық әсер ету ұзақтығымен жүргізілді. Ерітінділердің температурасы қажет болған жағдайда сыртқы салқындату арқылы 25-30°C деңгейінде ұсталды.

Үлгілерді алу динамикалық режимде жүзеге асырылды: өңдеу басталғанға дейін (0 мин), сондай-ақ өңдеу басталғаннан кейін 15, 30, 45 және 60 минуттарда.

Үлгілерде келесі көрсеткіштер анықталды:

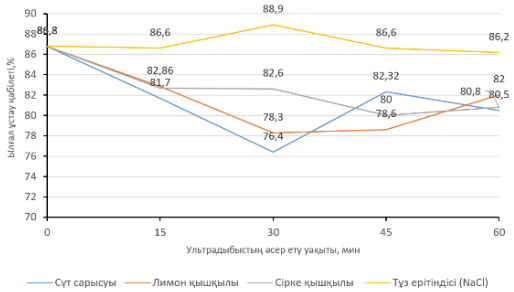
- су байланыстыру қабілеті (СБҚ) – 10 г үлгіні тұрақты қысыммен сүзгілер арасында сығу кезінде бөлінген ылғал мөлшері бойынша анықталады**;**
- Ылғал ұстау қабілеті (ВУС) – центрифугалау әдісі арқылы, қалған ылғал мөлшерін анықтау арқылы өлшенеді**;**
- pH – электронды pH-метрді қолдана отырып, су экстрактысы бойынша анықталады (10 г қарын + 100 мл дистилденген су)**;**
- Иісті органолептикалық бағалау – 5 балдық шкала бойынша (1 – бөтен иістің болмауы, 5 – айқын қарын иісі)**;**
- түстік сипаттамалары – колориметр арқылы анықталды**;**
- салмақ жоғалтуы – әр уақыт нүктесіндегі өңдеуге дейінгі және өңдеуден кейінгі массаның айырмасы бойынша анықталды**.**

Өңдеу аяқталғаннан кейін (60 минут өткен соң) үлгілер ерітінділерден алынып, салқын сумен шайылды және соңғы массасын, органолептикалық және физика-химиялық көрсеткіштерін анықтау үшін тексерістен өткізілді.

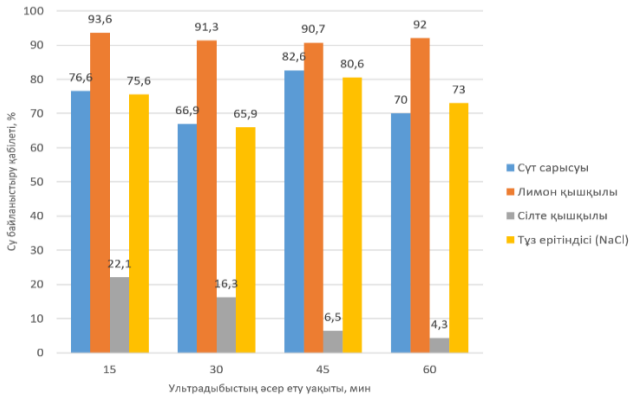
Зерттеу нәтижелері және оларды талдау

Эксперимент барысында әртүрлі орталардың (сүт сарысуы, лимон қышқылы, сірке қышқылы және тұз ерітіндісі (NaCl) сиыр қарнының сапалық көрсеткіштеріне өңдеу процесіндегі әсері бағаланды. Зерттелетін орталар ультрадыбыстық өңдеудің pH деңгейі, иондық күші және химиялық белсенділігі бойынша ерекшеленетін жағдайлардағы әсерін бағалау қажеттілігіне байланысты таңдалды, бұл сиыр қарынының құрылымы мен сапалық көрсеткіштеріне физикалық және химиялық факторлардың әсерін анықтауға мүмкіндік береді.

1. Ылғалды ұстау қабілетінің (1-сурет) және су байланыстыру қабілетінің өзгерісі (2-сурет).



Сурет 1 – Ультрадыбыстық өңдеу ұзақтығының ылғалды ұстау қабілетіне әсері



Сурет 2 – Ультрадыбыстық өңдеу ұзақтығының су байланыстыру қабілетіне әсері

Зерттеу барысында сүт сарысуында су байланыстыру қабілетінің (СБҚ) 86,8 %-дан 60-шы минутта 70,0%-ға төмендегені анықталды, ал ылғалды ұстау қабілеті (ЫҰҚ) салыстырмалы түрде жоғары деңгейде сақталды (80-82%). Лимон қышқылында СБҚ көрсеткіштері 90-93% аралығында өзгеріп отырды, ал ЫҰҚ шамамен 78-82% деңгейінде болып, қышқыл ортада тұрақтандыру әсерінің бар екенін көрсетті. Сірке қышқылында СБҚ күрт төмендеді: 15-ші минутта көрсеткіш 22,1%, ал 60-шы минутта тек 4,3% болды, сол уақытта ЫҰҚ 80-83% аралығында сақталды. Тұз ерітіндісінде СБҚ және ЫҰҚ жоғары деңгейде қалды (тиісінше 66,9-82,6% және 86-89%), бұл тұздың ылғалды ұстауға оң әсерін көрсетеді.

2. pH көрсеткіші (1-кесте).

Сүт сарысуында pH мәні 7,64-тен 6,74-ке дейін төмендеп, орташа деңгейде қышқылдануды көрсетті; лимон қышқылында бұл көрсеткіш 60-шы минутқа қарай айтарлықтай төмендеп, 4,99-ға жетті, ал сірке қышқылында pH біртіндеп 7,64-тен 5,92-ге дейін төмендеді. Тұз ерітіндісінде керісінше, орта сілтіленіп, pH мәні 9,41-9,82 аралығында болды, бұл ортаны басқалардан түбегейлі ерекшелендірді.

Кесте 1 – Ультрадыбыстық өңдеудің pH көрсеткішіне әсері

Өңдеу ортасы	Ультрадыбыстың әсер ету уақыты, мин				
	0	15	30	45	60
Сүт сарысуы	7,64	7,31	7,15	7,10	6,74
Лимон қышқылы	7,64	7,18	6,46	6,47	4,99
Сілте қышқылы	7,64	7,18	6,85	7,05	5,92
Тұз ерітіндісі (NaCl)	7,64	9,41	9,82	9,07	9,64

3. Органолептикалық көрсеткіштер (иіс пен түс) және масса жоғалуы (2-кесте).

Сүт сарысуында сиыр қарнының иісі біртіндеп 5-тен 2 баллға төмендеді, ал лимон және сірке қышқылдарында алғашқы 30 минут ішінде 4-5 балл деңгейінде сақталды; тұз ерітіндісінде иіс аздап төмендеді, бірақ 60-шы минутта 3 баллға жетті. Түстік параметрлер (L*, a*, b*) үлгілердің жалпы жарықтануын (L* мәнінің өсуі) және реңдердің өзгеруін көрсетті: сүт сарысуы мен қышқылдарда түс ашық әрі сары түске жақындаса, тұз ерітіндісінде қараю байқалып, жасылшыл реңдерге ауысу болды. Ең көп салмақ жоғалту лимон қышқылында тіркелді (13,62 %-ға дейін), бұл қышқыл орта күшті әсерімен байланысты; сірке қышқылында да жоғалту айтарлықтай болды (11,03%), ал сарысу мен тұз ерітіндісінде салмақ жоғалту орташа деңгейде болып, 4,34-12,75% аралығында болды.

Кесте 2 – Ультрадыбыстық өңдеудің органолептикалық көрсеткіштерге (иіс пен түс) және салмақ жоғалтуға әсері

Өңдеу ортасы	Уақыт, мин	Иіс (балл)	L*	a*	b*	Салмақ жоғалту, %
Сүт сарысуы	0	5	68,14	-1,71	8,12	4,34
	15	5	76,10	-0,32	8,08	
	30	3	76,30	0,28	7,75	
	45	2	77,32	0,69	7,78	
	60	2	79,86	-0,05	7,67	
Лимон қышқылы	0	5	68,14	-1,71	8,12	6,46
	15	4	80,29	-0,16	10,03	
	30	4	81,37	-0,26	9,41	
	45	4	78,53	0,35	13,62	
	60	4	80,83	-1,00	10,39	
Сілте қышқылы	0	5	68,14	-1,71	8,12	5,32
	15	5	77,47	-2,18	7,68	
	30	5	79,28	-1,35	7,39	
	45	4	80,93	-1,62	7,13	
	60	2	80,69	-1,41	11,03,	
Тұз ерітіндісі (NaCl)	0	5	68,14	-1,71	8,12	3,89
	15	4	71,99	-3,55	10,10	
	30	5	71,60	-2,89	8,15	
	45	4	74,10	-3,28	12,75	
	60	3	72,27	-4,16	11,02	

Қорытынды

Жүргізілген зерттеулер сиыр қарынын әртүрлі орталарда ультрадыбыстық өңдеу оның функционалдық және органолептикалық қасиеттеріне әртүрлі әсер ететінін көрсетті. Сүт сарысуында су байланыстыру қабілеті 86,8%-дан 70,0%-ға дейін төмендеді, алайда ылғалды ұстау қабілеті жоғары деңгейде (80-82%) сақталды, pH көрсеткіші 7,64-тен 6,74-ке дейін төмендеді және иістің қарқындылығы 5 баллдан 2 баллға дейін айқын азайды, бұл ретте салмақ жоғалту орташа деңгейде (4,34-12,75%) болды.

0,5%-дық лимон қышқылы ерітіндісінде су байланыстыру қабілеті 90-93% деңгейінде, ал ылғалды ұстау қабілеті 78-82% деңгейінде сақталды, алайда pH көрсеткіші 4,99-ға дейін төмендеп, салмақ жоғалту ең жоғары мәндерге – 13,62%-ға дейін жетті, өңдеудің алғашқы 30 минутында иіс 4-5 балл деңгейінде сақталды.

Ең қолайсыз өзгерістер 1%-дық сірке қышқылы ерітіндісінде анықталды, мұнда су байланыстыру қабілеті 15 минуттан кейін 22,1%-ға дейін, ал 60-минутта 4,3%-ға дейін төмендеді, pH көрсеткіші 5,92 болды және салмақ жоғалту 11,03 %-ға дейін жетті.

2%-дық тұзды ерітіндіде су байланыстыру қабілеті (66,9-82,6%) және ылғалды ұстау қабілетінің (86-89%) жоғары көрсеткіштері сақталды, алайда ортаның сілтіленуі pH 9,41-9,82 дейін байқалды және иістің төмендеуі болды (3 баллға дейін).

Осылайша, сиыр қарынын ультрадыбыстық өңдеу үшін технологиялық тұрғыдан ең тиімді орталар сүт сарысуы мен тұзды ерітінді болып табылады, олар функционалдық қасиеттердің сақталуын және салмақ жоғалту орташа деңгейде болған жағдайда органолептикалық көрсеткіштердің жақсаруын қамтамасыз етеді.

Әдебиеттер тізімі

1. Проблемы безотходного производства в мясной отрасли / Н.Ф. Небурчилова и др. // Мясная индустрия. – 2014. – № 3. – С. 7-11.

2. Лузан В.Н. Рациональное использование говяжьего рубца в технологии высококачественных мясных продуктов / В.Н. Лузан, Е.С. Гарифулина // Вестник Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления. – 2010. – № 4. – С. 75-79.

3. Leong T.S.H. Ultrasonic food processing / T.S.H. Leong, G.J.O. Martin, M. Ashokkumar // In: Proctor A. (ed.), Alternatives to Conventional Food Processing. – 2018. – P. 316-354. https://doi.org/10.1039/9781782626596-00316. EDN: https://www.elibrary.ru/vdpobk.

4. Зарубежный опыт и перспективы использования ультразвуковой обработки в пищевой промышленности / Разинькова В.Г. и др. // Инновационное развитие аграрно-пищевых технологий: материалы междунар. науч.-практ. конф. (Волгоград,17–18 июня 2021 г.). Волгоград: Сфера, 2021. – С. 228-233. EDN: https://www.elibrary.ru/fflupz.
5. Бурак Л.Ч. Ограничения и возможности современных технологий обеспечению микробиологической безопасности пищевых продуктов / Л.Ч. Бурак // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 2024. – № 23(396). – С. 6-13. https://doi.org/10.26297/0579-3009.2024.2-3.1.
6. Бурак Л.Ч. Влияние ультразвука на процесс замораживания и качество замороженных фруктов и овощей / Л.Ч. Бурак, А.Н. Сапач, М.И. Писарик // Вестник Международной академии холода. – 2024. – № 1. – С. 71-78. https://doi.org/10.17586/1606-4313-2024- 23-1-71-78.
7. The effect of high intensity ultrasonic pre-treatment on the properties of soybean protein isolate gel induced by calcium sulfate / H. Hu et al // Food Hydrocolliods. – 2013. – № 32(2). – P. 303-311. https://doi.org/ 10.1016/j.foodhyd.2013.01.016.
8. Rojas M.L. The ultrasound technology for modifying enzyme activity / M.L. Rojas, H.T. Júlia, D.A. Pedro Esteves // Scientia Horticulturae. – 2016. – № 7(2). – P. 145-150. https://doi.org/ 10.17268/sci.agropecu.2016.02.07.
9. The effect of ultrasonic treatment on the structural, physical and emulsifying properties of animal and vegetable proteins / J. O'Sullivan et al // Food Hydrocolliods. – 2016. – № 53. – P. 141-154. https://doi.org/10.1016/j. foodhyd.2015.02.009.
10. Effects of different ultrasound power on physicochemical property and functional performance of chicken actomyosin / Y. Zou et al // International Journal of Biological Macromolecules. – 2018. – № 113. – P. 640-647. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.02.039.

References

1. Problemy bezotkhodnogo proizvodstva v myasnoi otrasli / N.F. Neburchilova i dr. // Myasnaya industriya. – 2014. – № 3. – S. 7-11. (In Russian).
2. Luzan V.N. Ratsional'noe ispol'zovanie govyazh'ego rubtsa v tekhnologii vysokokachestvennykh myasnykh produktov / V.N. Luzan, E.S. Garifulina // Vestnik Vostochno-Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta tekhnologii i upravleniya. – 2010. – № 4. – S. 75-79. (In Russian).
3. Leong T.S.H. Ultrasonic food processing / T.S.H. Leong, G.J.O. Martin, M. Ashokkumar // In: Proctor A. (ed.), Alternatives to Conventional Food Processing. – 2018. – P. 316-354. https://doi.org/10.1039/9781782626596-00316. EDN: https://www.elibrary.ru/vdpobk. (In English).
4. Zarubezhnyi opyt i perspektivy ispol'zovaniya ul'trazvukovoi obrabotki v pishchevoi promyshlennosti / Razin'kova V.G. i dr. // Innovatsionnoe razvitie agrarno-pishchevykh tekhnologii: materialy mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (Volgograd,17–18 iyunya 2021 g.). Volgograd: Sfera, 2021. – S. 228-233. EDN: https://www.elibrary.ru/fflupz. (In Russian).
5. Burak L.CH. Ogranicheniya i vozmozhnosti sovremennykh tekhnologiĭ obespecheniyu mikrobiologicheskoĭ bezopasnosti pishchevykh produktov / L.CH. Burak // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniĭ. Pishchevaya tekhnologiya. – 2024. – № 23(396). – S. 6-13. https://doi.org/10.26297/0579-3009.2024.2-3.1. (In Russian).
6. Burak L.CH. Vliyanie ul'trazvuka na protsess zamorazhivaniya i kachestvo zamorozhennykh fruktov i ovoshcheĭ / L.CH. Burak, A.N. Sapach, M.I. Pisarik // Vestnik Mezhdunarodnoĭ akademii kholoda. – 2024. – № 1. – S. 71-78. https://doi.org/10.17586/1606-4313-2024- 23-1-71-78. (In Russian).
7. The effect of high intensity ultrasonic pre-treatment on the properties of soybean protein isolate gel induced by calcium sulfate / H. Hu et al // Food Hydrocolliods. – 2013. – № 32(2). – R. 303-311. https://doi.org/ 10.1016/j.foodhyd.2013.01.016. (In English).
8. Rojas M.L. The ultrasound technology for modifying enzyme activity / M.L. Rojas, H.T. Júlia, D.A. Pedro Esteves // Scientia Horticulturae. – 2016. – № 7(2). – R. 145-150. https://doi.org/ 10.17268/sci.agropecu.2016.02.07. (In English).
9. The effect of ultrasonic treatment on the structural, physical and emulsifying properties of animal and vegetable proteins / J. O'Sullivan et al // Food Hydrocolliods. – 2016. – № 53. – R. 141-154. https://doi.org/10.1016/j. foodhyd.2015.02.009. (In English).
10. Effects of different ultrasound power on physicochemical property and functional performance of chicken actomyosin / Y. Zou et al // International Journal of Biological Macromolecules. – 2018. – № 113. – R. 640-647. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.02.039. (In English).

Бұл зерттеу ҚР Ауыл шаруашылығы министрлігі BR24892775 «Шығарылатын өнімнің жоғары сапасы мен қауіпсіздігін қамтамасыз ететін азық-түлік өнімдерін өндіру үшін ауыл шаруашылығы шикізатын кешенді және терең өңдеу технологиясын әзірлеу» жобасы шеңберінде орындалды.

А.К. Суйчинов[1], Ж.С. Есимбеков[1], Д.К. Дукенбаев[1,2]*
[1]Семипалатинский филиал ТОО «Казахский научно-исследовательский институт переработки и пищевой промышленности»,
071410, Республика Казахстан, город Семей, улица Байтурсынова, 29
[2]Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, город Семей, улица Глинки, 20 А
*e-mail: da_mir.1991@mail.ru

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИЕ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ГОВЯЖЬЕГО РУБЦА

В статье представлены результаты исследований по изучению влияния ультразвуковой обработки на структурно-механические и функциональные свойства говяжьего рубца. Рассмотрена актуальность использования вторичного мясного сырья в мясоперерабатывающей промышленности с точки зрения рационального использования и расширения ассортимента продукции. Проведены экспериментальные исследования действия ультразвука в различных средах (молочная сыворотка, растворы лимонной и уксусной кислот, солевой раствор (NaCl)) на качественные показатели рубца. Установлено, что выбор среды оказывает существенное влияние на водосвязывающую и влагоудерживающую способности, pH, органолептические характеристики, цвет и потери массы продукта. Выявлено, что лимонная кислота обеспечивает стабилизацию влагоудерживающей способности, но сопровождается высокими потерями массы; уксусная кислота приводит к резкому снижению водосвязывающей способности; солевой раствор (NaCl) оказывает положительное влияние на влагосвязывание, но вызывает ощелачивание среды. Наиболее мягкое действие показала молочная сыворотка, обеспечивая сохранение основных свойств сырья. Полученные данные свидетельствуют о перспективности применения ультразвука для повышения технологической ценности субпродуктов и разработки ресурсосберегающих технологий мясопереработки.

Ключевые слова: *говяжий рубец, субпродукты, ультразвуковая обработка, водосвязывающая способность, влагоудерживающая способность, органолептические свойства, мясоперерабатывающая промышленность.*

A. Suychinov[1], Zh. Yessimbekov[1], D. Dukenbaev[1,2]*
Semey Branch of JSC «Kazakh Scientific Research Institute of Processing and Food Industry»,
071410, Republic of Kazakhstan, Semey, 29 Baitursynova Street,
[2]Shakarym University,
071412, Republic of Kazakhstan, Semey city, Glinka street, 20 A
*e-mail: da_mir.1991@mail.ru

EFFECT OF ULTRASONIC TREATMENT ON THE STRUCTURAL, MECHANICAL, AND FUNCTIONAL PROPERTIES OF BOVINE RUMEN

The article presents the results of a study on the effect of ultrasonic treatment on the structural, mechanical, and functional properties of bovine rumen. The relevance of using secondary meat raw materials in the meat processing industry is considered in terms of rational utilization and expansion of the product range. Experimental studies were carried out to evaluate the influence of ultrasound in different media (whey, citric acid solution, acetic acid solution, and saline solution (NaCl)) on the quality indicators of rumen. It was found that the choice of medium has a significant effect on water-binding and water-holding capacities, pH, organoleptic characteristics, color, and product mass loss. Citric acid ensured the stabilization of water-holding capacity but was accompanied by high mass losses; acetic acid caused a sharp decrease in water-binding capacity; saline solution had a positive effect on water retention but led to medium alkalization. The mildest effect was observed with whey, which preserved the basic properties of the raw material. The findings indicate the prospects of using ultrasound to improve the technological value of by-products and to develop resource-saving technologies in meat processing.

Key words: *bovine rumen, by-products, ultrasonic treatment, water-binding capacity, water-holding capacity, organoleptic properties, meat processing industry.*

Авторлар туралы мәліметтер

Ануарбек Казезович Суйчинов – PhD., қауымдастырылған профессор; «Қазақ өңдеу және тамақ өнеркәсібі ғылыми-зерттеу институты» ЖШС-нің Семей филиалы, Қазақстан Республикасы; e-mail: asuychinov@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000–0003–4862–3293.

Жанибек Серикбекович Есимбеков – PhD., қауымдастырылған профессор; «Қазақ өңдеу және тамақ өнеркәсібі ғылыми-зерттеу институты» ЖШС-нің Семей филиалы, Қазақстан Республикасы; e-mail: ezhanibek@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000–0002–8556–9954.

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.

Сведения об авторах

Ануарбек Казезович Суйчинов – PhD., ассоциированный профессор; Семейский филиал ТОО «Казахский научно-исследовательский институт перерабатывающей и пищевой промышленности», Республика Казахстан; e-mail: asuychinov@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000–0003–4862–3293.

Жанибек Серикбекович Есимбеков – PhD., ассоциированный профессор; Семейский филиал ТОО «Казахский научно-исследовательский институт перерабатывающей и пищевой промышленности», Республика Казахстан; e-mail: ezhanibek@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000–0002–8556–9954.

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.

Information about the authors

Anuarbek Suychinov – PhD, Associate Professor; Semey Branch of JSC «Kazakh Scientific Research Institute of Processing and Food Industry», Republic of Kazakhstan; e-mail: asuychinov@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000–0003–4862–3293.

Zhanibek Yessimbekov – PhD, Associate Professor; Semey Branch of JSC «Kazakh Scientific Research Institute of Processing and Food Industry», Republic of Kazakhstan; e-mail: ezhanibek@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000–0002–8556–9954.

Damir 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.

Редакцияға енуі 05.01.2026
Өңдеуден кейін түсуі 27.01.2026
Жариялауға қабылданды 28.01.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-38

МРНТИ: 62.09.37

CC BY 4.0
Check for updates

М.Ф. Садыкова*, Ш.А. Абжанова
Алматинский технологический университет,
050061, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Фурката, 348/4
*e-mail: madina.sadykova0209@mail.ru

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА НАЦИОНАЛЬНОЙ МЯСНОЙ ПРОДУКЦИИ ЖАЯ ИЗ КОНИНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОДНОГО ЭКСТРАКТА БРУСНИКИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВЕННЫХ И ОРГАНОЛЕПТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Аннотация: *В статье представлены результаты исследования, направленного на совершенствование технологии производства жая из конины с использованием водного экстракта брусники в качестве природного источника биологически активных соединений. Было установлено, что при приготовлении водного экстракта брусники наилучшие результаты обеспечивает из взятых для изучения 5, 10, 15 концентраций, 10%-ый. При этом наблюдается повышенное извлечение фенольных компонентов и антоцианов в экстракт брусники. Выяснено, что внесение 10%-го экстракта на этапе посола в количестве 5% от массы продукта в мясную продукцию жая*

©М.Ф. Садыкова, Ш.А. Абжанова, 2026

способствует снижению интенсивности окислительных процессов, повышению антиоксидантной активности и стабилизации естественной окраски жая. Проведённые сравнительные опыты, между традиционным способом получения жая и комбинированным способом, где использовался конвективный метод высушивания, показали, что комбинированный режим обработки является более технологически рациональным и удобным в применении, поскольку обеспечивает снижение значений тиобарбитуровой кислоты (ТБК-числа) и перекисного числа при одновременном формировании более высоких органолептических характеристик готового продукта. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что применение водного экстракта брусники является обоснованным и эффективным подходом к повышению качественных и органолептических показателей национальной мясной продукции жая, из конины.

Ключевые слова: *жая; экстракт брусники; фенольные соединения; посол; вяление; антиоксидантная активность.*

Введение

Национальные мясные продукты из конины занимают важное место в рационе населения Казахстана и представляют значительную культурную и гастрономическую ценность [1]. К числу наиболее характерных традиционных изделий из конины относится жая – сыровяленый мясной продукт, вырабатываемый из продольных мышц спинной части туши и отличающийся специфическими технологическими приёмами обработки и созревания. Качество жая во многом определяется совокупностью показателей, среди которых ключевое значение имеют содержание остаточной влаги, степень обезвоживания, активность воды, особенности консистенции, цветовые характеристики, показатели безопасности и сенсорная выразительность продукта. Однако процесс длительного вяления сопровождается такими рисками, как окисление липидов, потемнение окраски, развитие микробиальной порчи, неравномерная дегидратация и ухудшение текстуры [2]. Для улучшения указанных аспектов рекомендуется совершенствования технологических режимов получения национальных мясных продуктов, в частности и продукции жая.

При этом, в современной научной практике всё большее внимание уделяется растительным экстрактам, которые привлекают интерес как натуральные носители антиоксидантных и антимикробных компонентов. [3]. Известно, что ягоды рода Vaccinium, включая бруснику, богаты фенольными кислотами, антоцианами, фенольными кислотами, флавонолами и органическими кислотами, что делает их перспективными ингредиентами для улучшения функциональных свойств мясной продукции. Водный экстракт брусники способен оказывать антиоксидантное, антимикробное и стабилизирующее действие, влияя на цветообразование, устойчивость к окислению, диффузию посолочных компонентов и микробиологическую безопасность [4-5].

На основании указанного в данной статье представлены результаты по совершенствование технологии производства национальной мясной продукции жая, из конины, с использованием водного экстракта брусники для повышения биохимических и органолептических показателей.

Целью исследования является научно обоснованная отработка технологического режима приготовления жая с использованием водного экстракта брусники для улучшения биохимических и органолептических показателей готового продукта.

Материалы и методы

Объектом исследования являлась жая из конины промышленного изготовления, реализуемая в торговой сети. Образцы подбирали без видимых дефектов, с равномерной степенью вяления и характерными органолептическими свойствами. Посолочная смесь включала поваренную соль в количестве 3±0.5% и сахар-песок 0.5±0.1% от массы мяса [6]. В качестве функциональной добавки применяли водный экстракт брусники, полученный по оптимизированной технологической схеме. Сырьём для экстракта служила свежемороженая брусника, приобретённая на рынке г. Алматы и относящаяся к районированным сортовым формам, адаптированным к условиям Казахстана.

Определяли содержание следующих показателей:

– массовая доля белка, согласно ГОСТ 25011-2017 [7]

– массовая доля жира, ГОСТ 23042-2015 [8]

– массовая доля влаги, ГОСТ 9793-2016 [9]

– соль, ГОСТ 15113.7-77 [10]

– окислительная стабильность: ТБК (TBARS), согласно ГОСТ Р 55479-2013 [11]
– пероксидное число ГОСТ 26593-2015 [12]
– антиоксиданты водорастворимые, ГОСТ Р 54037-2010 [13]
– КМАФАнМ ГОСТ 10444.15-94 [14]
– БГКП (коли-формы) ГОСТ 31747-2012 [15]
– органолептическая оценка ГОСТ 9959-2015 [16].

Результаты исследований и их обсуждение

Технология получения экстракта была разработана с учётом необходимости максимального извлечения фенольных соединений, антоцианов и органических кислот, ответственных за антиоксидантный и цветостабилизирующий эффект. Последовательность операций включала:

1. Размороженное сырьё высушивали в дегидраторе при 50±1 °С в течение 30±1 ч до достижения влажности 10-12%.
2. Высушенные ягоды измельчали до порошкообразного состояния с размером частиц около 0,8 мм.
3. Изучали варианты концентрации 5%, 10% и 15%; оптимальной признана 10% благодаря балансу выхода фенольных веществ и отсутствию технологических затруднений при фильтрации.
4. Гидромодуль составлял 1:10 (порошок: деминерализованная вода).
5. Экстракцию проводили на водяной бане при температуре 60±1 °С в течение 60±5 мин.
6. Экстракт охлаждали до 22±1°С и фильтровали через двухслойный марлевый фильтр.
7. Готовый экстракт хранили при +4°С.

Технологическая схема изготовления водного экстракта брусники показана на рисунке 1.



Рисунок 1 – Технологическая схема изготовления экстракта брусники

Данная схема обеспечивала получение стабильного раствора с высоким содержанием биологически активных веществ, минимальной потерей фенольных компонентов и хорошей технологичностью при дальнейшем использовании

При получении водного экстракта брусники были исследованы концентрации 5%, 10% и 15%.

Установлено, что при концентрации 5 % содержание твёрдой фазы в растворе является низким, вследствие чего в экстракт переходит ограниченное количество фенольных соединений и антоцианов. Это приводит к снижению антиоксидантной активности и функциональной ценности экстракта.

Наиболее оптимальные показатели получены при концентрации 10%. В данном случае обеспечивается сбалансированное извлечение биологически активных веществ, достаточная растворимость фенольных компонентов и стабильная консистенция экстракта. Процесс фильтрации протекает без существенных технологических затруднений, а содержание активных соединений значительно выше по сравнению с вариантом 5%.

При увеличении концентрации до 15% наблюдается рост доли нерастворимого остатка, повышение вязкости системы и ухудшение фильтруемости. Это сопровождается

увеличением продолжительности экстрагирования и образованием значительного осадка растительных частиц, что снижает технологическую эффективность процесса.

По итогам проведённого сравнительного анализа, концентрация 10% является наиболее оптимальной для получения экстракта брусники, которая обеспечила наилучшее сочетание выхода биологически активных веществ, стабильности раствора и удобства технологической обработки.

На этапе подготовки мясного сырья водный экстракт брусники наносили на поверхность продукта перед внесением соли и сахара, что обеспечивало предварительное увлажнение, ускоряло растворение посолочных компонентов и способствовало более равномерному распределению экстракта. Были исследованы варианты дозировки 2,5%, 5% и 7,5% от массы продукта.

Было установлено, что при уровне 2,5% проникновение биологически активных веществ (антоцианов, фенольных соединений и органических кислот) в мышечную ткань было недостаточным, что обусловило слабую выраженность антиоксидантных свойств и незначительное влияние на процессы формирования окраски продукта.

Наиболее рациональным оказался вариант с концентрацией 5%, при котором обеспечивались равномерное распределение фенольных соединений в толще мышечной ткани, выраженный антиоксидантный эффект, стабилизация окраски за счёт антоцианов, отсутствие избыточной поверхностной влаги и удобство последующей технологической обработки.

При увеличении концентрации до 7,5% отмечалась повышенная увлажнённость поверхности сырья, приводящая к локальному росту активности воды, снижению эффективности процесса вяления, риску развития поверхностной микрофлоры и неравномерной диффузии экстракта.

Сопоставление исследованных вариантов показало, что использование экстракта брусники в количестве 5% от массы мяса обеспечивает оптимальное сочетание антиоксидантной активности, равномерности распределения биологически активных соединений и технологической стабильности готового продукта.

Изменение показателей качества жая при внесении водного экстракта брусники в разных концентрациях и при различных методах обработки отражено в таблицах 1 и 2.

После нанесения экстракта мясо обрабатывали посолочной смесью и герметично выдерживали при +4°С в течение 36±2 часов для равномерной диффузии ингредиентов и стабилизации окраски.

Исследование включало два технологических подхода – традиционный и комбинированный ускоренный режимы.

В традиционном варианте жая сушили при температуре 22±1°С в течение 5-7 суток, что обеспечивало постепенную дегидратацию, формирование вкуса и потери массы на 25-35%. Такой способ является классическим, но длительным.

Комбинированный режим включал три этапа. Сначала проводили короткую фазу выравнивания влажности при 22±1°С 12 часов, после чего осуществляли интенсивное обезвоживание при 55±1°С, 48 часов. После интенсивного этапа жая подвергали холодной стабилизации при 4°С в течение суток, что способствовало выравниванию влагосодержания по толщине и стабилизации структуры [17].

Готовое изделие вакуумировали и хранили при температуре +4°С до 30 суток. Контроль влажности (≤75%) и отсутствие поверхностной микрофлоры являлись обязательными параметрами качества [18-20].

Изменение показателей качества жая при внесении водного экстракта брусники в разных концентрациях и при различных методах обработки отражено в таблицах 1 и 2.

Представленные данные свидетельствуют о том, что при традиционном методе обработки добавление водного экстракта брусники оказывает сдерживающее влияние на развитие окислительных процессов, что проявляется в снижении значений показателей липидного окисления. При этом выраженность антиоксидантного эффекта и стабильность микробиологических показателей ограничены технологическими особенностями традиционной схемы обработки.

Таблица 1 – Физико-химические, микробиологические и антиоксидантные показатели жая при традиционном методе обработки с добавлением водного экстракта брусники

№	Наименование показателей, единицы измерений	Образец № 1 – контроль	Образец № 2 – 2,5%	Образец № 3 – 5%	Образец № 4 – 7,5%
1	Влага, %	48,2 ±0,3	47,1 ± 0,2	46,0 ± 0,2	46,8 ± 0,2
2	Белок, %	32,4 ±0,2	32,9 ± 0,2	33,6 ± 0,2	33,2 ± 0,2
3	Жир, %	17,1 ±0,1	16,9 ± 0,1	16,5 ± 0,1	16,4 ± 0,1
4	Соль, %	3,2±0,05	3,1 ± 0,05	3,0 ± 0,05	3,0 ± 0,05
5	ТБК (TBARS), мг МА/кг	0,62±0,02	0,48 ± 0,02	0,33 ± 0,01	0,41 ± 0,02
6	пероксидное число, ммоль/кг	2,8 ± 0,1	2,2 ± 0,1	1,5 ± 0,05	1,9 ± 0,1
7	Антиоксиданты водорастворимые, мг ГЭ/г	0,18 ± 0,02	0,52 ± 0,03	0,85 ± 0,04	1,02 ± 0,05
8	КМАФАнМ	$2,7\times10^3 \pm 0,3\times10^3$	$1,9\times10^3 \pm 0,2\times10^3$	$1,2\times10^3 \pm 0,1\times10^3$	$1,5\times10^3 \pm 0,2\times10^3$
9	БГКП (коли-формы)	не обнаружено	не обнаружено	не обнаружено	не обнаружено

Таблица 2 – Физико-химические, микробиологические и антиоксидантные показатели жая при использовании комбинированного метода обработки с добавлением водного экстракта брусники

Наименование показателей, единицы измерений	Образец № 1 – контроль	Образец № 2 – 2,5%	Образец № 3 – 5%	Образец № 4 – 7,5%
Влага, %	46,5 ± 0,3	45,3 ± 0,2	44,0 ± 0,2	44,8 ± 0,2
Белок, %	33,1 ± 0,2	33,7 ± 0,2	34,4 ± 0,2	34,0 ± 0,2
Жир, %	17,0 ± 0,1	16,8 ± 0,1	16,3 ± 0,1	16,2 ± 0,1
Соль, %	3,2 ± 0,05	3,1 ± 0,05	3,0 ± 0,05	3,0 ± 0,05
ТБК (TBARS), мг МА/кг	0,55 ± 0,02	0,41 ± 0,02	0,27 ± 0,01	0,35 ± 0,02
Пероксидное число, ммоль/кг	2,5 ± 0,1	1,9 ± 0,1	1,2 ± 0,05	1,6 ± 0,1
Антиоксиданты водорастворимые, мг ГЭ/г	0,22 ± 0,02	0,58 ± 0,03	0,95 ± 0,04	1,12 ± 0,05
КМАФАнМ	$2,1\times10^3 \pm 0,2\times10^3$	$1,5\times10^3 \pm 0,2\times10^3$	$0,9\times10^3 \pm 0,1\times10^3$	$1,2\times10^3 \pm 0,1\times10$
БГКП (коли-формы)	не обнаружено	не обнаружено	не обнаружено	не обнаружено

При использовании комбинированного метода обработки отмечается более выраженное улучшение физико-химических и антиоксидантных характеристик жая по сравнению с традиционной технологией. Снижение интенсивности окислительных процессов и улучшение микробиологических показателей указывают на повышение стабильности продукта, что подтверждает эффективность сочетания технологических приёмов с применением водного экстракта брусники.

Сопоставительный анализ данных таблиц 1 и 2 показывает, что комбинированный метод обработки обеспечивает более благоприятные условия для сохранения качества жая, выражающиеся в повышенной антиоксидантной активности и замедлении процессов окислительной порчи по сравнению с традиционным методом.

Дополнительно была проведена органолептическая оценка жая с добавлением водного экстракта брусники при различных концентрациях и технологических режимах обработки. Результаты дегустационной оценки в балльном выражении представлены в таблице 3. Для наглядного сопоставления органолептических характеристик образцов, полученных по традиционному и комбинированному методам обработки, данные таблицы визуализированы в виде диаграмм, приведённых на рисунках 2 и 3.

Таблица 3 – Органолептические показатели жая при традиционном и комбинированном методах обработки

Наименование показателя	Традиционный метод	Комбинированный метод
Внешний вид	Поверхность сухая, без дефектов	Равномерная, без избыточной влаги
Консистенция	Плотная	Плотная, более эластичная
Цвет	Характерный	Более равномерный и интенсивный
Запах и вкус	Свойственные продукту	Гармоничные, без посторонних оттенков

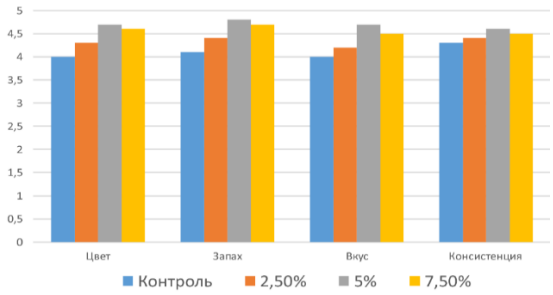


Рисунок 2 – Органолептическая характеристика жая при различных концентрациях водного экстракта брусники, полученной по традиционному методу обработки

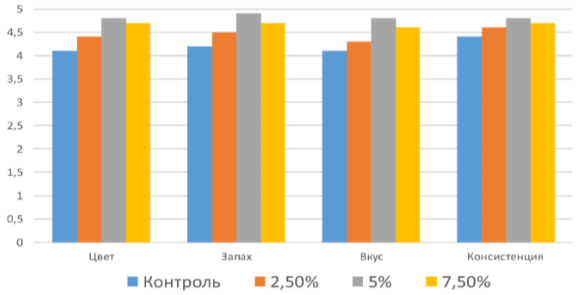


Рисунок 3 – Органолептическая характеристика жая при различных концентрациях водного экстракта брусники, полученной с применением комбинированного метода обработки

Анализ органолептических показателей показал, что жая, полученная при комбинированном методе обработки, характеризуется более гармоничными вкусо-ароматическими свойствами, равномерной окраской и улучшенной текстурой по сравнению с образцами, изготовленными по традиционной технологии. Применение водного экстракта брусники способствовало формированию более стабильных потребительских характеристик без появления посторонних запахов и привкусов. Полученные данные согласуются с результатами физико-химических и антиоксидантных исследований и подтверждают целесообразность использования комбинированного метода обработки.

Заключение

В ходе проведённого исследования была разработана и научно обоснована технология производства жая с использованием водного экстракта брусники, направленная на повышение антиоксидантной стабильности, улучшение показателей качества и сохранение высоких органолептических характеристик продукта. Установлено, что оптимальной концентрацией водного экстракта брусники при его получении является 10%, обеспечивающая эффективное извлечение биологически активных соединений при сохранении стабильности раствора и технологической удобства применения.

Показано, что внесение экстракта брусники на этапе посола в количестве 5% от массы продукта является наиболее рациональным, так как обеспечивает выраженный антиоксидантный эффект, стабилизацию окраски, снижение интенсивности окислительных процессов и отсутствие негативного влияния на процессы вяления. При меньшей дозировке функциональный эффект выражен слабо, тогда как увеличение концентрации до 7,5% сопровождается повышением поверхностной увлажнённости и ухудшением технологических параметров.

Сравнительный анализ традиционного и комбинированного методов обработки жая показал преимущество комбинированного режима, выражающееся в более низких значениях ТБК-числа и пероксидного числа, повышенном содержании водорастворимых антиоксидантов и снижении микробиологической обсемененности. Органолептическая оценка подтвердила улучшение вкуса, аромата, цвета и консистенции продукции, полученной с применением комбинированного метода.

Следовательно, использование водного экстракта брусники в сочетании с комбинированным режимом обработки может рассматриваться как эффективный и технологически целесообразный способ повышения качества и функциональной ценности жая, что расширяет возможности модернизации традиционных технологий производства национальных мясных продуктов из конины.

Список литературы

1. Темербаева М.В. Особенности технологии казахской национальной кухни / М.В. Темербаева, С.Т. Абимульдина, А.А. Темербаева // Качество продукции, технологий и образования: материалы XIV Международной научно-практической конференции. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2019. – С. 169-173.
2. Ученые записки Казанской государственной академии ветеринарной медицины им. Н.Э. Баумана / О.И. Солтан и др., 2023. – С. 251-254.
3. Пути повышения сохранности природных антиоксидантов в мясных изделиях / Б.А. Баженова и др. // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. – 2020. – С. 84-93.
4. Величко Н.А. Перспективы использования ягодного сырья в рецептурах тушёного мяса из оленины / Н.А. Величко, Л.П. Шароглазова // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – 2024. – С. 186-191.
5. Nutritional and physicochemical properties of wild lingonberry (Vaccinium vitis-idaea L.): effects of geographic origin / D. Urbonavičienė et al // Molecules. – 2023. – Vol. 28, № 12.
6. Дагбаева Т.Ц. Использование конины в производстве вяленого мяса / Т.Ц. Дагбаева, О.Г. Тыхенова, Е.Г. Семенова // Инновационное развитие АПК Байкальского региона, 2021. – С. 361-365.
7. ГОСТ 25011-2017. Мясо и мясные продукты. Методы определения белка. – Введ. 2018 07-01. – М.: Стандартинформ, 2018. – 14 с.
8. ГОСТ 23042-2015. Мясо и мясные продукты. Методы определения жира. – Введ. 2017-01. – М.: Стандартинформ, 2017. – 9 с.
9. ГОСТ 9793-2016. Мясо и мясные продукты. Методы определения влаги. – Введ. 2018-01 01. – М.:Стандартинформ, 2018. – 6 с.
10. ГОСТ 15113.7-77. Методы определения поваренной соли. – М.: Стандартинформ, 1977. – 36 с.
11. ГОСТ Р 55479-2013. Мясо и мясные продукты. Метод определения амино-аммиачного азота. – Введ. 2013-06 . – М. Стандартинформ, 2018. – 12 с.
12. ГОСТ 34118-2017. Мясо и мясные продукты. Метод определения перекисного числа. – Введ. 2018-07. – М.: Стандартинформ, 2018. – 20 с.
13. ГОСТ Р 54037–2010. Продукты пищевые. Определение содержания водорастворимых антиоксидантов амперометрическим методом в овощах, фруктах, продуктах их переработки, алкогольных и безалкогольных напитках. – М.: Стандартинформ, 2011. – 16 с.
14. ГОСТ 10444.15-94. Продукты пищевые. Методы определения количества мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов. – М.: Стандартинформ, 2010. – 313 с.
15. ГОСТ 31747-2012. Продукты пищевые. Методы выявления и определения количества бактерий группы кишечных палочек (колиформных бактерий). – М.: Стандартинформ, 2013. – 16 с.
16. ГОСТ 9959-2015. Мясо и мясные продукты. Общие условия проведения органолептической оценки. – Введ. 2017-01-01. – М.: Стандартинформ, 2018. – 24 с.
17. Drying dynamics of meat highlighting areas of relevance to dry-aging of beef / S. Álvarez et al // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. – 2021. – Vol. 20, № 6. – P. 5375-5400.
18. Development of semi-dried goat meat jerky using tenderizers considering the preferences of the elderly / Shine Htet Aung et al // Journal of Animal Science and Technology. – 2024. – Vol. 66, № 4. – P. 807-833.
19. Aykın Dinçer E. Dried meat products obtained by different methods from past to present / E. Aykın Dinçer // Food Reviews International. – 2023. – Vol. 39, № 5. – P. 2457-2476.
20. A comprehensive review of drying meat products and the associated effects and changes / A. Mediani et al // Frontiers in Nutrition. – 2022. – Vol. 9:1057366.

References

1. Temerbaeva M.V. Osobennosti tekhnologii kazakhskoi natsional'noi kukhni / M.V. Temerbaeva, S.T. Abimul'dina, A.A. Temerbaeva // Kachestvo produktsii, tekhnologii i obrazovaniya: materialy XIV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. – Magnitogorsk: Magnitogorskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet im. G.I. Nosova, 2019. – S. 169-173. (In Russian).

2. Uchenye zapiski Kazanskoi gosudarstvennoi akademii veterinarnoi meditsiny im. N.EH. Baumana / O.I. Soltan i dr., 2023. – S. 251-254. (In Russian).
3. Puti povysheniya sokhrannosti prirodnykh antioksidantov v myasnykh izdeliyakh / B.A. Bazhenova i dr. // Izvestiya vuzov. Prikladnaya khimiya i biotekhnologiya. – 2020. – S. 84-93. (In Russian).
4. Velichko N.A. Perspektivy ispol'zovaniya yagodnogo syr'ya v retsepturakh tushenogo myasa iz oleniny / N.A. Velichko, L.P. Sharoglazova // Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2024. – S. 186-191. (In Russian).
5. Nutritional and physicochemical properties of wild lingonberry (Vaccinium vitis-idaea L.): effects of geographic origin / D. Urbonavičienė et al // Molecules. – 2023. – Vol. 28, № 12. (In English).
6. Dagbaeva T.TS. Ispol'zovanie koniny v proizvodstve vyalenogo myasa / T.TS. Dagbaeva, O.G. Tykhenova, E.G. Semenova // Innovatsionnoe razvitie APK Baikal'skogo regiona, 2021. – S. 361-365. (In Russian).
7. GOST 25011-2017. Myaso i myasnye produkty. Metody opredeleniya belka. – Vved. 2018 07-01. – M.: Standartinform, 2018. – 14 s. (In Russian).
8. GOST 23042-2015. Myaso i myasnye produkty. Metody opredeleniya zhira. – Vved. 2017-01. – M.: Standartinform, 2017. – 9 s. (In Russian).
9. GOST 9793-2016. Myaso i myasnye produkty. Metody opredeleniya vlagi. – Vved. 2018-01 01. – M.: Standartinform, 2018. – 6 s. (In Russian).
10. GOST 15113.7-77. Metody opredeleniya povarennoi soli. – M.: Standartinform, 1977. – 36 s. (In Russian).
11. GOST R 55479-2013. Myaso i myasnye produkty. Metod opredeleniya amino-ammiachnogo azota. – Vved. 2013-06. – M. Standartinform, 2018. – 12 s. (In Russian).
12. GOST 34118-2017. Myaso i myasnye produkty. Metod opredeleniya perekisnogo chisla. – Vved. 2018-07. – M.: Standartinform, 2018. – 20 s. (In Russian).
13. GOST R 54037–2010. Produkty pishchevye. Opredelenie soderzhaniya vodorastvorimykh antioksidantov amperometricheskim metodom v ovoshchakh, fruktakh, produktakh ikh pererabotki, alkogol'nykh i bezalkogol'nykh napitkakh. – M.: Standartinform, 2011. – 16 s. (In Russian).
14. GOST 10444.15-94. Produkty pishchevye. Metody opredeleniya kolichestva mezofil'nykh aehrobnykh i fakul'tativno-anaehrobnykh mikroorganizmov. – M.: Standartinform, 2010. – 313 s. (In Russian).
15. GOST 31747-2012. Produkty pishchevye. Metody vyyavleniya i opredeleniya kolichestva bakterii gruppy kishechnykh palochek (koliformnykh bakterii). – M.: Standartinform, 2013. – 16 s. (In Russian).
16. GOST 9959-2015. Myaso i myasnye produkty. Obshchie usloviya provedeniya organolepticheskoi otsenki. – Vved. 2017-01-01. – M.: Standartinform, 2018. – 24 s. (In Russian).
17. Drying dynamics of meat highlighting areas of relevance to dry-aging of beef / S. Álvarez et al // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. – 2021. – Vol. 20, № 6. – P. 5375-5400. (In English).
18. Development of semi-dried goat meat jerky using tenderizers considering the preferences of the elderly / Shine Htet Aung et al // Journal of Animal Science and Technology. – 2024. – Vol. 66, № 4. – P. 807-833. (In English).
19. Aykın Dinçer E. Dried meat products obtained by different methods from past to present / E. Aykın Dinçer // Food Reviews International. – 2023. – Vol. 39, № 5. – P. 2457-2476. (In English).
20. A comprehensive review of drying meat products and the associated effects and changes / A. Mediani et al // Frontiers in Nutrition. – 2022. – Vol. 9:1057366. (In English).

М.Ф. Садыкова*, Ш.А. Абжанова
Алматы технологиялық университеті,
050061, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Фуркат к-сі, 348/4
*e-mail: madina.sadykova0209@mail.ru

ЖАЯ ҰЛТТЫҚ ЕТ ӨНІМІН ЖЫЛҚЫ ЕТІНЕН ӨНДІРУ ТЕХНОЛОГИЯСЫН ЖЕТІЛДІРУ САПАЛЫҚ ЖӘНЕ ОРГАНОЛЕПТИКАЛЫҚ КӨРСЕТКІШТЕРДІ АРТТЫРУ МАҚСАТЫНДА МҮКЖИДЕКТІҢ СУ ЭКСТРАКТЫН ҚОЛДАНУ

Мақалада биологиялық белсенді қосылыстардың табиғи көзі ретінде мүкжидектің су экстрактын қолдану арқылы жылқы етінен жая өндіру технологиясын жетілдіруге бағытталған зерттеу нәтижелері ұсынылған. Мүкжидектің су экстрактын дайындау кезінде зерттеуге алынған 5, 10, 15% концентрациялардың ішінде ең оңтайлы нәтиже 10 %-дық концентрацияда алынатыны анықталды. Бұл ретте мүкжидек экстрактына фенолдық компоненттер мен антоциандардың бөлініп шығу деңгейінің жоғарылауы байқалды. Тұздау кезеңінде жая ет өніміне өнім массасының 5 %-ы мөлшерінде 10 %-дық экстрактты енгізу тотығу үдерістерінің қарқындылығын төмендетуге, антиоксиданттық белсенділікті арттыруға және жаяның табиғи түсін тұрақтандыруға ықпал ететіні анықталды. Жая өндірудің дәстүрлі тәсілі мен конвективті кептіру әдісі қолданылған аралас тәсілді салыстырмалы түрде зерттеу нәтижелері аралас өңдеу режимінің технологиялық тұрғыдан неғұрлым ұтымды әрі қолдануға қолайлы екенін көрсетті, себебі ол тиобарбитур қышқылының көрсеткішін (ТБК-санын) және пероксид санын төмендетумен қатар, дайын өнімнің органолептикалық қасиеттерінің жоғары деңгейде қалыптасуын қамтамасыз етеді. Алынған эксперименттік деректер мүкжидектің су экстрактын қолдану жылқы етінен дайындалатын ұлттық ет өнімі – жаяның сапалық және органолептикалық көрсеткіштерін арттырудың негізделген әрі тиімді тәсілі екенін дәлелдейді.

***Түйін сөздер:** жая; мүкжидек экстракты; фенолдық қосылыстар; тұздау; кептіру (вяление); антиоксиданттық белсенділік.*

M.F. Sadykova*, S.A. Abzhanova
Almaty Technological University,
050061, Republic of Kazakhstan, Almaty, Furkat str., 348/4
*e-mail: madina.sadykova0209@mail.ru

IMPROVEMENT OF THE PRODUCTION TECHNOLOGY OF THE NATIONAL MEAT PRODUCT ZHAYA MADE FROM HORSE MEAT USING AN AQUEOUS LINGONBERRY EXTRACT TO ENHANCE QUALITY AND ORGANOLEPTIC CHARACTERISTICS

The article presents the results of a study aimed at improving the production technology of zhaya made from horse meat using an aqueous lingonberry extract as a natural source of biologically active compounds. It was found that during the preparation of the aqueous lingonberry extract, the best results among the studied concentrations of 5, 10, and 15% were obtained at a 10% concentration. At this concentration, an increased extraction of phenolic components and anthocyanins into the lingonberry extract was observed. It was determined that the addition of a 10% extract at the salting stage in an amount of 5.0% of the product mass to zhaya meat products contributes to a reduction in the intensity of oxidative processes, an increase in antioxidant activity, and stabilization of the natural color of zhaya. Comparative experiments between the traditional method of zhaya production and a combined method using convective drying demonstrated that the combined processing regime is more technologically rational and convenient for application, as it ensures a reduction in thiobarbituric acid values (TBA value) and peroxide value while simultaneously forming higher organoleptic characteristics of the finished product. The obtained experimental data indicate that the use of an aqueous lingonberry extract is a justified and effective approach to improving the quality and organoleptic characteristics of the national meat product zhaya made from horse meat.

***Key words:** zhaya; lingonberry extract; phenolic compounds; salting; curing (drying); antioxidant activity.*

Сведения об авторах

Мадина Фархатовна Садыкова* – магистрант 2 курса кафедры «Пищевая биотехнология», Алматинский технологический университет, г. Алматы, Казахстан; e-mail: madina.sadykova0209@mail.ru.

Шолпан Аманкелдиевна Абжанова – кандидат технических наук, асс. профессор кафедры «Пищевая биотехнология», Алматинский технологический университет, г. Алматы, Казахстан; e-mail: sholpan-ab@mail.ru.

Авторлар туралы мәліметтер

Мадина Фархатқызы Садыкова* – «Тамақ биотехнологиясы» кафедрасының 2 курс магистранты, Алматы технологиялық университеті, Алматы, Қазақстан; e-mail: madina.sadykova0209@mail.ru.

Шолпан Аманкелдықызы Абжанова – техника ғылымдарының кандидаты, «Тағамдық биотехнология» кафедрасының асс. профессоры, Алматы технологиялық университеті, Алматы, Қазақстан; e-mail: sholpan-ab@mail.ru.

Information about the authors

Madina Farkhatovna Sadykova – 2nd year Master's student of the Department of Food Biotechnology, Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: madina.sadykova0209@mail.ru.

Sholpan Amankeldievna Abzhanova – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Food Biotechnology, Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: sholpan-ab@mail.ru.

Поступила в редакцию 05.01.2026
Принята к публикации 09.02.2025

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-39

МРНТИ: 65.59.29

CC BY 4.0
Check for updates

Г.Н. Нұрымхан, Н.Р. Муслимова*
Шәкәрім университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинка көш., 20 А
*e-mail: muslimova.n.r@mail.ru

ЕТ ШИКІЗАТЫНАН АЛЫНҒАН ЖАРТЫЛАЙ ФАБРИКАТТЫҢ ТАҒАМДЫҚ ҚАСИЕТІ МЕН САҚТАЛУ МЕРЗІМІНЕ РАДИАЦИЯЛЫҚ ӨҢДЕУДІҢ ӘСЕРІ

Аңдатпа: *Бұл мақалада радиациялық өңделген ет шикізатынан алынған жартылай фабрикаттың тағамдық қасиеттері мен сақтау мерзіміне әсері қарастырылады. Жартылай фабрикат өнімдерінің қауіпсіздігін қамтамасыз ету және сақтау мерзімін ұзарту қазіргі заманғы тамақ өнеркәсібі үшін маңызды мәселе. Тоңазыту, мұздату немесе химиялық қоспаларды пайдалану сияқты дәстүрлі сақтау әдістерінің белгілі бір шектеулері бар: олар жеткілікті микробиологиялық тұрақтылықты қамтамасыз етпейді немесе өнімнің органолептикалық қасиеттеріне кері әсер етуі ықтимал. Зерттеу барысында ет шикізатының микробиологиялық қауіпсіздігін арттыру және сапасын сақтаудың тиімді әдіс ретінде етті радиациялық өңдеуді қолданудың заманауи тәсілдері қолданылады. Радаияциялық өңдеудің ет жартылай фабрикатының микробиологиялық параметріне, физика-химиялық қасиетіне, тағамдық және биологиялық құндылығына ерекше назар аударылады. Радиациялық өңдеу ет шикізатында патогендік және шартты патогендік микрофлораның мөлшерін айтарлықтай азайтатыны, микробиологиялық бұзылуды және тотығу өзгерістерін баяулататыны, осылайша дәстүрлі технологиялармен салыстырғанда шикізаттың және дайын өнімнің сақтау мерзімін ұзартатынын көрсетеді. Радиациялық өңдеудің оңтайлы дозасын таңдау еттің сапалық көрсеткішін қамтамасыз етеді. Алынған деректер ет өнімдерінің қауіпсіздігін, тұрақты сапасын және сақтау мерзімін ұзартуды қамтамасыз ету үшін тамақ өнеркәсібінде радиациялық өңделген ет шикізатынан жартылай фабрикат өндіру технологиясын енгізудің орындылығын растайды.*

Түйін сөздер: *радиациялық өңдеу, оңтайлы өңдеу мөлшері, жартылай фабрикат, сақтау мерзімі, тағамдық қауіпсіздік.*

Кіріспе. Ет және ет өнімдерінің сапалық көрсеткіштерін ұзақ уақыт сақтау көптеген факторларға, соның ішінде физика-химиялық қасиеттеріне, микроорганизмдердің белсенділігіне және сенсорлық сипаттамалардың өзгеруіне байланысты болып келеді. Соңғы уақытта еттің тамақтық қауіпсіздігін жақсартудың инновациялық және тиімді әдісі ретінде радиациялық өңдеуге көбірек көңіл бөлінуде. Иондаушы сәулелену патогендік және шартты түрде патогендік микрофлора деңгейін айтарлықтай төмендетуі, өнімнің бұзылу процестерін баяулатуы және осылайша қосымша консерванттарды қажет етпей өнімдердің сақтау мерзімін ұзартуға ықпал етеді [2].

1-кестеде көрсетілгендей 2020 жылы бүкіл әлем бойынша радиациялық өңделген тағамның жалпы көлемі шамамен 400 000 тоннаға бағаланды [2]. 2025 жылы өңделген өнімдер 500 000 тоннадан асады, жылдық өсу қарқыны ~4-5% құрайды. Ең жиі қолданылатын тамақ өнімдерінің санатына – дәмдеуіштер, ет, теңіз өнімдері, жемістер мен көкөністер жатады.

©Г.Н. Нұрымхан, Н.Р. Муслимова, 2026

Кесте 1 – Әлемдегі радиациялық өңделген тағамның жалпы көлемі

Мемлекет	Жалпы әлемдік өндіріс көлеміндегі үлесі, %	Негізгі өңделетін азық-түлік санаттары	2020 жылғы көлемі (мың. тонн)	2025 жылғы көлемі (мың. тонн)
Қытай	37,6%	Дәмдеуіштер, ет және теңіз өнімдері	~150	~180
АҚШ	19,4%	Ет өнімдері, дәмдеуіштер, жемістер	~77	~95
Украина	14,7%	Астық және ет өнімдері	~58	~70
Вьетнам	12,4%	Теңіз өнімдері, көкеністер	~50	~60
Бразилия	5,6%	Ет өнімдері, дәмдеуіштер	~22	~28
Оңтүстік Африка	4,1%	Жәмдеуіштер, жемістер	~16	~20
Басқа 20 мемлекеттер	2,6%	Әртүрлі санаттар	~10	~12
**деректер әдебиет көздерінен алынған, сілмете төменде келтірілген*				

Ғылыми зерттеулерде дұрыс сәулелену дозасы еттің физика-химиялық және органолептикалық сипаттамаларын сақтайтынын, бәсекеге қабілетті және тұтынушылар үшін қауіпсіз екенін көрсетеді. Сонымен қатар, радиациялық технологияны қолдану өндіріс процестерін оңтайландыру және сақтау мерзімі ұзартылған ет жартылай фабрикат өнімдерінің түрлерін кеңейту үшін жаңа мүмкіндіктер ашады [9, 11]. Осылайша, радиациялық өңдеудің ет жартылай фабрикаттың, оның ішінде стейктің сапасы мен сақтау мерзіміне әсерін зерттеу тамақ өнеркәсібін дамыту және тамақ қауіпсіздігін қамтамасыз ету үшін теориялық және сараптамалық маңызы бар өзекті ғылыми міндет болып табылады [2].

Ғылыми еңбектерді талдау барысында, PubMed Central сайтындағы зерттеулер радиация сальмонелла мен E. coli ластану қаупін азайтатынын және етті +6^{0}C температурада ұзақ сақтауға мүмкіндік беретінін атап өтеді [3]. Бұл өнімді тасымалдау барсында өте тиімді болып келеді. Ал, Беларусь зерттеушілері (Домненкова және т.б., 2025) тамақ өнеркәсібіндегі радиациялық технологиялар өнім сапасын сақтай отырып, химиялық консерванттарды пайдалануды азайтуға мүмкіндік беретінін көрсетеді [3].

Зерттеулер нәтижелерін көрсеткендей, тіпті -18^{0}C температурада сақталғанның өзінде, стейктің сақтау мерзімі төмен, мысалы, «Сиыр етінен жасалған стейктердің сақтау мерзімін және сенсорлық қасиеттерін бағалау» [4] зерттеуінде стейктің органолептикалық қасиеттері оңтайлы жағдайда да 14-21 күн сақталғаннан кейін нашарлаған. Ұқсас нәтижелер «Төмен температурада ұзақ сақтаудан кейін сиыр етінің бөлшек саудадағы сақтау мерзімін бағалау» [5] зерттеуінде алынды, онда -2,7°C температурада ұзақ сақтаудан кейін стейктің бөлшек саудадағы сақтау мерзімі 7 күннен аспайтыны көрсетілген.

Сонымен қатар, ғылыми еңбектерде радиациялық өңдеу липидтердің тотығу процестерін жеделдетуі мүмкін, бұл қанықпаған май қышқылдарының радиолизі нәтижесінде альдегидтер мен кетондар сияқты екінші реттік тотығу өнімдерінің түзілуіне әкеледі. Бұл қосылыстар белгілі бір дозаларда өнімнің дәмі мен иісінің өзгеруіне себеп болуы ықтимал [12]. Сонымен қатар, жоғары сәулелену мөлшерлерінде (>6-9 кГр) еттің органолептикалық қасиеттерінің төмендеуі, соның ішінде бөтен иістердің пайда болуы және құрылымдық жұмсаруы байқалатыны туралы деректер бар [6].

Радиациялық өңдеу кезінде түзілетін радиолиз өнімдерінің мөлшері, Codex Alimentarius және ISO 14470-2011 талаптарына сәйкес, ұсынылған дозалар шегінде адам денсаулығына қауіп төндірмейтіні ғылыми түрде дәлелденген [1, 3]. Бұл қосылыстардың концентрациясы тағамды дәстүрлі термиялық өңдеу немесе сақтау кезінде түзілетін өнімдермен салыстырмалы деңгейде болады.

Осыған байланысты радиациялық өңдеу микробиологиялық қауіпсіздікті қамтамасыз ету қабілетінің арқасында ет өнеркәсібінде перспективалы әдіс ретінде қарастыруға болады. Радиациялық өңдеудің оңтайлы дозасын ретінде 3 кГр мөлшері таңдалған [10].

Зерттеу материалдары мен әдістері. Зерттеу материалы ретінде 3 кГр дозада радиациялық өңделген сиыр етінен жасалған жартылай фабрикат стейк және температуралық өңдеуден өткен дайын стейк өнімі алынды.

Зерттеулер «Ұлттық сараптама және сертификаттау орталығы» АҚ (Семей филиалы) сынақ орталығында; «Шәкәрім» университетінің «Агротехнопарк» биологиялық және тамақ

қауіпсіздігі зертханасында; «Қазақ қайта өңдеу және тамақ өнеркәсібі ғылыми-зерттеу институты» ЖШС, Семей филиалында; «Алматы технологиялық университеті» АҚ ғылыми-зерттеу зертханасында жүргізілді.

Ет жартылай фабрикатты зерттеу үшін физика-химиялық, микробиологиялық, токсикологиялық, радиациялық және органолептикалық параметрлерді қоса алғанда, кешенді аналитикалық әдістер қолданылды.

Физика-химиялық көрсеткіштер

Стандартты әдіс бойынша pH өлшегішті қолданып, қышқылдылық анықталды. Су белсенділігі (a_w) бөлме температурасында ылғал өлшегішті пайдаланып өлшенді. Ылғалдың, ақуыздың, майдың және күлдің массалық үлесі тиісті МЕМСТ стандарттарына (МЕМСТ 33319-2015, МЕМСТ 25011-2017, МЕМСТ Р 55569-2013, МЕМСТ 31727-2012) сәйкес анықталды. Түс сипаттамалары (L*,a*,b*) спектрофотометрді пайдаланып колориметриялық түрде өлшенді, бұл өңдеуден кейін ет түсінің өзгеруін сандық бағалауға мүмкіндік берді. Май қышқылының құрамы МЕМСТ Р 55480-2013 стандартына сәйкес май қышқылының метил эфирлерін алғаннан кейін газ хроматографиясы арқылы талданды [7].

Микробиологиялық көрсеткіштер

Мезофильді аэробты және факультативті анаэробты микроорганизмдердің (КМАФАнМ) санын, колиформдардың, патогенді микроорганизмдердің, оның ішінде Salmonella spp., Staphylococcus aureus, Proteus spp., ашытқылар мен зеңдердің болуын анықтау КО ТР 021/2011 «Тамақ қауіпсіздігі туралы» белгіленген әдістерді қолдану арқылы жүргізілді. Нәтижелер граммға немесе миллилитрге (CFU/г, CFU/мл) колония түзуші бірліктермен (КТБ) көрсетілді және ет өнімдеріне арналған стандартты мәндермен салыстырылды [8].

Токсикологиялық көрсеткіштер

Улы элементтердің (қорғасын, кадмий, мышьяк, сынап) мөлшері МЕМСТ 30178-96, МЕМСТ 31266-2004 және МЕМСТ 26927-86 бойынша анықталды. Пестицидтердің (ДДТ және оның метаболиттері, гексахлорциклогексан) болуы МУ 2142-80 бойынша бағаланды. Антибиотик қалдықтары (хлорамфеникол, тетрациклин тобы) ISO 13493-2014 және СТ 1505-2006 стандарттарына сәйкес бақыланды.

Органолептикалық қасиеттері

Жартылай фабрикаттардың сыртқы түрі, түсі, иісі және консистенциясы стандартты сенсорлық талдау әдістерін қолдана отырып, сарапшылар тобымен бағаланды. Бағалаудың объективтілігін арттыру үшін он балдық шкала қолданылды, содан кейін деректерге статистикалық талдау жүргізілді.

Зерттеу нәтижелері

Шикізатты өңдеуге дейінгі және әртүрлі мөлшерде өңдеуден кейінгі микробиологиялық көрсеткіштерін талдау 2-кестеде келтірілген. Зерттеу үлгілерін пролангациядан өткізу «Нутритест» ЖШС (Алматы қ.) зертханасында жүргізілді.

Кесте 2 – Сынамалардың микробиологиялық көрсеткіштері.

Атауы	Бақылау үлгісі	3 кГр	6 кГр	9 кГр	Пролангациядан кейін (t=0-4^{0}C, 26 күн)	
					Бақылау үлгісі	Өңдеуден кейін
Clostridium spp. 0,01 гр.	Анықталды	Анықталмады	Анықталмады	Анықталмады	+	Анықталмады
КМАФАнМ, КТБ/г	1,3x10^2	1x10^2	1x10^2	Анықталмады	1,6x10^5	1,0x10^1
Escherichia coli 1,0 гр.	Анықталмады	Анықталмады	Анықталмады	Анықталмады	+	Анықталмады
Salmonella	Анықталмады	Анықталмады	Анықталмады	Анықталмады	Анықталмады	Анықталмады

2-кестеде көрсеткендей, барлық қолданылған сәулелендіру мөлшерларында 0,01 гр үлгідегі Clostridium spp. анықталмады, бұл электронды сәулелендірудің аталған анаэробты бактерияларды элиминациялаудағы тиімділігін көрсетеді. КМАФАнМ көрсеткіші бақылау үлгісінде бастапқы мәнінен (1,3x10² КТБ/г) 3 кГр және 6 кГр мөлшерларында сәулелендіруден кейін төмендегені байқалды, ал 9 кГр мөлшерсында анықталмады. Пролонгация кезеңінде (t=0-4^{0}C, 26 күн) бақылау үлгісінде КМАФАнМ-нің айтарлықтай өсуі тіркелгенімен, сәулелендірілген үлгілерде, әсіресе 9 кГр мөлшерсында, олардың саны едәуір төмен күйінде қалды. Барлық сәулелендіру нұсқаларында және бақылау үлгісінде 1,0 гр үлгідегі Escherichia

coli мен Salmonella анықталмады, бұл зерттелген үлгілерде аталған бактериялардың бастапқыда болмағанын немесе анықтау шегінен төмен концентрацияда болғанын көрсетеді

Радиациялық өңделген ет шикізатынан алынған жартылай фабрикатының термо өңдеуден өткеннен кейін, сақтау температурасы +6^{0}С, салыстырмалы ылғалдылық 75%-да, 2 және 4 сағаттан кейінгі микробиологиялық көрсеткіші, «Агротехнопарк» биологиялық және тағам қауіпсіздігі зертханасында (Шәкәрім университеті) жүргізілді.

3-кестеде көрсетілгендей зерттеулер барысында стейк үлгілерінің микробиологиялық жағдайы нормативтік шектерде екені анықталды. Үлгілерде колиформ бактериялары, сульфитті азайтатын клостридиялар және сальмонеллалар анықталмады. Ашытқы мен зең саны нормативтік шектерден аспады, бұл микробиомның тұрақтылығын және сынақ кезінде өнімнің бұзылуына ықпал ететін жағдайлардың жоқтығын растайды. Зерттеу үлгісінің микробиологиялық көрсеткіштер нәтижесі МЕМСТ Р 70354-2022 Ет және ет өнімдері «Жалпы талаптар және сақтау мерзімін негіздеу үшін сынақтарды жүргізу тәртібі» стандарт талаптарына сай келеді. Бұл нәтижелер стейк үлгілерінің микробиологиялық қауіпсіздігі мен сапасын растайды және өнімді ағымдағы гигиеналық стандарттарға сәйкес. Сондықтан, стейкті дайын өнім түрінде сақтау шарттары мен жарамдылық мерзімін ұзартуға мүмкіндік береді.

Кесте 3 – Радиациялық өңделген жартылай фабрикаттан жасалған дайын өнімнің микробиологиялық көрсеткіштері.

№ р/с	Үлгі атауы және сынаманың №	Микробиологиялық көрсеткіші	Қалыпты (КТБ/г н/се КТБ мл)	Нақты нәтиже
1.	Стейк (пісірілген, 2 сағаттан кейін)	КМАФАнМ КТБ/г, көп емес	1*10^4	10^2 КТБ/г кем
2.		БГКП (колиформы)	0,01 г артық рұқсат етілмейді	Анықталмады
3.		Патогенді, оның ішінде, сальмонелла	25 г мөлшерде рұқсат етілмейді	Анықталмады
4.		S.aureus , 0,1 г	рұқсат етілмейді	Анықталмады
5.		0,1 г сульфитті клостридиялар	рұқсат етілмейді	Анықталмады
6.		Ашытқылар КТБ см^3(г), артық емес	1 х 10^3	10^2 КТБ /г артық емес
7.		Зең саңырауқұлағы, ККБ /г	рұқсат етілмейді	Анықталмады
8.	Стейк (пісірілген, 4 сағаттан кейін)	КМАФАнМ КТБ /г артық емес	1*10^4	10^2 КТБ /г артық емес
9.		БГКП (колиформдар)	0,01 г артық рұқсат етілмейді	Анықталмады
10.		Патогенді соның ішінде, сальмонеллалар	25 г мөлшерде рұқсат етілмейді	Анықталмады
11.		S.aureus , 0,1 г	рұқсат етілмейді	Анықталмады
12.		0,1 г сульфитті клостридиялар	рұқсат етілмейді	Анықталмады
13.		Ашытқылар, КТБ см^3(г), артық емес	1 х 10^3	10^2 ККБ /г артық емес
14.		Зең саңырауқұлағы, КТБ /г	рұқсат етілмейді	Анықталмады

4-кестеде стейк үлгісін талдау орташа қышқылдық мәні pH (pH = 6,52±0,18) екенін көрсетті, бұл жаңа піскен етке тән мәндерге сәйкес келеді. Су белсенділігі (aw = 0,9852±0,02) микробиологиялық процестер үшін ылғалдың жоғары қолжетімділігін көрсетеді, бұл сақтауды қатаң бақылауды қажет етеді. Ылғалдылық мөлшері 67,17±1,94% құрады, бұл өнімнің шырындылығын қамтамасыз етеді, ал ақуыз мөлшері 19,68±0,55% құрады, бұл жоғары тағамдық құндылықты көрсетеді. Май мөлшері 12,10±0,32%, ал күлділік мөлшері 1,05±0,02% құрады, бұл минералды құрамды көрсетеді. ЫҰҚ (73,13±1,97%) және МҰҚ (70±1,89%) көрсеткіштері су мен майды жақсы ұстау қабілетін растайды, бұл технологиялық өңдеу үшін маңызды.

Май қышқылдарының құрамы көбіне қаныққан май қышқылдары басым (каприл, ундецил, капрой) екені анықталды. Сонымен қатар аз мөлшерде қанықпаған май қышқылдары бар (олеин, гондой, нервон). Бұл комбинация өнімнің дәміне, иісіне және тағамдық құндылығына әсер етеді. Осылайша, липидтік профиль қаныққан май қышқылдарының жоғары

мөлшерімен және моноқанықпаған компоненттердің айтарлықтай үлесімен сипатталады, бұл өнімнің органолептикалық қасиеттері мен тағамдық құндылығына әсер етуі мүмкін.

Кесте 4 – Радиациялық өңделген ет шикізаттан дайындалған жартылай фабрикаттың физика-химиялық көрсеткіштері

Көрсеткіш атауы	Өңделген шикізаттан жасалған жартылай фабрикат (стейк)
pH	6,52±0,18
Судың белсенділігі	0,9852±0,02
ЫБҚ, %	42,5
ЫҰҚ, %	73,13±1,97
МҰҚ, %	70±1,89
Ылғал, %	67.17±1.94
Май, %	12,10±0,32
Күлділігі, %	1,05±0,02
Ақуыз %	19.68±0.55

Ет өнімдерінің сақтау мерзімінің негізгі көрсеткіштерінің бірі өнімінің түстік сипаттамалары болып табылады.

5-кестеде стейктің түс сипаттамалары (L* = 35.02; a* = 6.74; b* = 8.88) орташа ашықтықты және ақшыл-қызыл, қызғылт түстердің болуын көрсетеді, бұл тұтынушылардың сиыр етіне деген сенсорлық сұранысына сәйкес келеді.

Кесте 5 – Өңделген ет шикізатынан алынған жартылай фабрикатының түстік сипаттамалары.

Өнім	Түсі (L*)	Түсі (a*)	Түсі (b*)
Стейк	35,02	6,74	8,88

Зерттеу нәтижелерін талдау

Зерттеу барысында радиациялық өңделген жартылай фабрикаттан дайындалған стейк үлгілерінің микробиологиялық, физика-химиялық және органолептикалық көрсеткіштері кешенді түрде талданды.

Микробиологиялық көрсеткіштер стейк үлгілерін 2 және 4 сағаттан кейінгі бақылау нәтижелері қауіпті микроорганизмдердің (сальмонелла, колиформдар, сульфитті азайтатын клостридиялар, S. aureus) анықталмағанын көрсетті. Ашытқылар мен зең саңырауқұлақтарының саны нормативтік шектерден аспады.

Стейктің физика-химиялық қасиеттері оның химиялық құрамымен анықталады және қолданыстағы МЕМСТ талаптарына сай бағаланады. Стейк үшін негізгі сапалық көрсеткіштерге ылғал, ақуыз, май мен күл мөлшері, pH мәні, су белсенділігі және ылғалды ұстау қабілеті жатады. Зерттеу өніміндегі ылғал мөлшері мен су белсенділігі стейктің микробиологиялық тұрақтылығын және сақтау мерзіміне оң әсер береді. Ақуыз фракциясы миофибриллярлық, саркоплазмалық және стромальды ақуыздардан тұрады және олар стейктің консистенциясы мен шырындылығына тікелей әсер етеді. Стейктің ылғалды ұстау қабілеті термиялық өңдеу кезінде шырынын сақтап қалуымен сипатталады. Осы көрсеткіштердің жиынтығы стейктің сапасын бағалауда және оның қауіпсіздігін МЕМСТ талаптарына сәйкестігін көрсетеді.

Түстік көрсеткіштер стейктің орташа ашықтыққа және ақшыл-қызыл, қызғылт реңктерге ие екенін көрсетті. Бұл жаңа піскен сиыр етіне тән сенсорлық сипаттамаларға сәйкес келеді және тұтынушылардың қабылдауына оң әсер етеді.

Қорытынды

Осы зерттеу аясында сәулеленудің оңтайлы дозасы ретінде 3 кГр мөлшерінің таңдалуы өнімнің микробиологиялық қауіпсіздігін қамтамасыз ете отырып, физика-химиялық және органолептикалық көрсеткіштердің айтарлықтай өзгеруіне жол бермейтінін көрсетті. Бұл алынған нәтижелер әдеби деректермен және қолданыстағы халықаралық және ұлттық нормативтік құжаттармен үйлеседі.

Осылайша, радиациялық өңдеудің ықтимал жағымсыз әсерлері ескеріліп, оларды оңтайлы мөлшері сақталған жағдайда, бұл технология ет шикізатынан алынған жартылай фабрикаттардың қауіпсіздігін арттыру және сақтау мерзімін ұзарту үшін ғылыми негізделген әрі тиімді әдіс болып табылады.

Нәтижелер зерттелген стейктің теңдестірілген химиялық құрамы, жоғары ақуыз мөлшері және орташа май фракциясы бар екенін көрсетеді. Май қышқылдарының профилі орташа тізбекті қаныққан қышқылдардың басым болуымен сипатталады, бұл шикізаттың сипаттамаларына және өңдеу жағдайларына байланысты. Аталған параметрлер ет өнімдерінің сапасы мен тағамдық құндылығын бағалау, сондай-ақ ет өнімдерін сақтау және өңдеу бойынша ұсыныстар әзірлеу үшін маңызды.

Жүргізілген зерттеу нәтижелері радиациялық өңделген жартылай фабрикаттан дайындалған стейктің тамақ қауіпсіздігін, жоғары тағамдық құндылығын және органолептикалық тұрғыдан тұтынушы талаптарына сәйкестігін дәлелдеді. Алынған нәтижелер өнімнің сақтау мерзімін ұзартуға және ағымдағы гигиеналық стандарттарға сәйкес қауіпсіз тағам ретінде ұсынуға мүмкіндік береді.

Әдебиеттер тізімі

1. Кодекс Алиментариус. Облученные продукты питания. Совместная программа ФАО/ВОЗ по стандартам на пищевые продукты. – М.: Весь Мир, 2007.
2. Осецкая М.М. Экономические аспекты облучения пищевых продуктов [Электронный ресурс] / М.М. Осецкая, О.А. Момот // КиберЛенинка. – Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/ekonomicheskie-aspekty-oblucheniya-pischevyh-produktov.
3. ISO 14470-2011 Food irradiation – Радиационная обработка пищевых продуктов. Требования к разработке, валидации и повседневному контролю процесса облучения пищевых продуктов ионизирующим излучением.
4. Indiarto R. Meat irradiation: a comprehensive review of its impact on food quality and safety / R. Indiarto, A.N. Irawan, E. Subroto // Foods. – 2023. – № 12(9). – P. 1845. https://doi.org/10.3390/foods12091845.
5. Домненкова А.В. Радиационные технологии в пищевой промышленности / А.В. Домненкова, И. Т. Ермак, Д.М. Кузьменков. – Минск: БГТУ, 2021. – 120 с.
6. Evaluating the shelf life and sensory properties of beef steaks from cattle raised on different grass feeding systems in the Western United States / T.L. Duarte et al // Foods. – 2022. – Vol. 11, № 14, Art. 2141. https://doi.org/10.3390/foods11142141.
7. Evaluating the shelf life of beef in retail after extended low-temperature storage / S.V. Gonzales et al // Meat and Muscle Biology. – 2024. – Vol. 8, № 1. – P. 1-13. https://doi.org/10.22175/mmb.17649.
8. ГОСТ 31470-2012/ Мясо птицы, субпродукты и полуфабрикаты из мяса птицы. Методы органолептических и физико-химических исследований. – Введ. 01.07.2013. – М.: Стандартинформ. – 41 с.
9. ГОСТ Р 54354-2011. Мясо и мясные продукты. Общие требования и методы микробиологического анализа. – Введ. 01.01.2013. – М.: Стандартинформ. – 36 с.
10. Муслимова Н.Р. Сиыр етін ИЛУ-10 электронды үдеткіште өңдеудің оңтайлы параметрі және оның сақтау мерзіміне әсері / Н.Р. Муслимова, Г.Н. Нұрымхан, Ж.Э. Озбекова // Вестник Шәкәрім университеті. – 2026. – № 2. – Б. 45-52.
11. Improving Grain Safety Using Radiation Dose Technologies / R. Uazhanova et al // Agriculture. – 2025. – № 15(15). – P. 1669. https://doi.org/10.3390/agriculture15151669.
12. Indiarto R. Meat irradiation: a comprehensive review of its impact on food quality and safety / R. Indiarto, A.N. Irawan, E. Subroto // Foods. – 2023. – Vol. 12, № 9, Art. 1845. https://doi.org/10.3390/foods12091845.

References

1. Kodeks Alimentarius. Obluchennye produkty pitaniya. Sovmestnaya programma FAO/VOZ po standartam na pishchevye produkty. – M.: Ves' Mir, 2007. (In Russian).
2. Osetskaya M.M. Ehkonomicheskie aspekty oblucheniya pishchevykh produktov [Ehlektronnyi resurs] / M.M. Osetskaya, O.A. Momot // KibeRLeninka. – Rezhim dostupa: https://cyberleninka.ru/article/n/ekonomicheskie-aspekty-oblucheniya-pischevyh-produktov. (In Russian).
3. ISO 14470-2011 Food irradiation – Radiatsionnaya obrabotka pishchevykh produktov. Trebovaniya k razrabotke, validatsii i povsednevnomu kontrolyu protsessa oblucheniya pishchevykh produktov ioniziruyushchim izlucheniem.
4. Indiarto R. Meat irradiation: a comprehen (In Russian).sive review of its impact on food quality and safety / R. Indiarto, A.N. Irawan, E. Subroto // Foods. – 2023. – № 12(9). – R. 1845. https://doi.org/10.3390/foods12091845. (In English).

5. Domnenkova A.V. Radiatsionnye tekhnologii v pishchevoi promyshlennosti / A.V. Domnenkova, I.T. Ermak, D.M. Kuz'menkov. – Minsk: BGTU, 2021. – 120 s. (In Russian).
6. Evaluating the shelf life and sensory properties of beef steaks from cattle raised on different grass feeding systems in the Western United States / T.L. Duarte et al // Foods. – 2022. – Vol. 11, № 14, Art. 2141. https://doi.org/10.3390/foods11142141. (In English).
7. Evaluating the shelf life of beef in retail after extended low-temperature storage / S.V. Gonzales et al // Meat and Muscle Biology. – 2024. – Vol. 8, № 1. – P. 1-13. https://doi.org/10.22175/mmb.17649. (In English).
8. GOST 31470-2012/ Myaso ptitsy, subprodukty i polufabrikaty iz myasa ptitsy. Metody organolepticheskikh i fiziko-khimicheskikh issledovanii. – Vved. 01.07.2013. – M.: Standartinform. – 41 s. (In Russian).
9. GOST R 54354-2011. Myaso i myasnye produkty. Obshchie trebovaniya i metody mikrobiologicheskogo analiza. – Vved. 01.01.2013. – M.: Standartinform. – 36 s. (In Russian).
10. Muslimova N.R. Siyr etin ILU-10 ehlektrondy ydetkishte өңdeudің oңtaily parametri zhәne onyң saқtau merzimine әseri / N.R. Muslimova, G.N. Nyrymkhan, ZH.EH. Ozbekova // Vestnik Shәkәrim universiteti. – 2026. – № 2. – B. 45-52. (In Kazakh).
11. Improving Grain Safety Using Radiation Dose Technologies / R. Uazhanova et al // Agriculture. – 2025. – № 15(15). – R. 1669. https://doi.org/10.3390/agriculture15151669. (In English).
12. Indiarto R. Meat irradiation: a comprehensive review of its impact on food quality and safety / R. Indiarto, A.N. Irawan, E. Subroto // Foods. – 2023. – Vol. 12, № 9, Art. 1845. https://doi.org/10.3390/foods12091845. (In English).

G.N. Nurymkhan, N.R. Muslimova*
Shakarim University,
071412, Republic of Kazakhstan, Semey, 20A Glinki Street
*e-mail: muslimova.n.r@mail.ru

PROPERTIES AND SHELF-LIFE ASSESSMENT OF SEMI-FINISHED PRODUCTS OBTAINED FROM RADIATION-TREATED MEAT RAW MATERIALS

This article examines the technology for producing semi-finished products from radiation-treated meat and evaluates the effect of such treatment on the shelf life of the final product. The study analyzes modern approaches to the use of radiation processing of meat as an effective method for improving the microbiological safety of meat raw materials and preserving their quality. The main technological stages of semi-finished product manufacturing are described, including raw material preparation, radiation treatment using ionizing radiation at optimized doses, product preparation, packaging, and storage. Particular attention is paid to the influence of irradiation on the microbiological parameters, physicochemical properties, nutritional and biological value of meat semi-finished products. It is shown that radiation treatment significantly reduces the amount of pathogenic and opportunistic microflora, slows down microbiological spoilage and oxidative changes, thereby extending the shelf life of raw materials and finished products compared to traditional technologies. Compliance with optimal irradiation doses ensures the preservation of the protein, fat, and amino acid composition of meat, as well as satisfactory organoleptic characteristics. The results obtained confirm the feasibility of introducing the technology for producing semi-finished products from radiation-treated meat raw materials into the food industry in order to ensure product safety, stable quality, and extended shelf life.

Key words: *radiation treatment, optimal treatment dose, semi-finished product, shelf life, microbiological safety.*

Г.Н. Нурымхан, Н.Р. Муслимова*
Шәкәрім университет,
071412, Республика Казакстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А
*e-mail: muslimova.n.r@mail.ru

СВОЙСТВА И ОЦЕНКА СРОКА ХРАНЕНИЯ ПОЛУФАБРИКАТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ РАДИАЦИОННО ОБРАБОТАННОГО МЯСНОГО СЫРЬЯ

В данной статье рассматривается технология получения полуфабрикатов из радиационно обработанного мяса и оценивается влияние обработки на срок хранения готовой продукции. В исследовании анализируются современные подходы к применению радиационной обработки мяса как эффективного метода повышения микробиологической безопасности мясного сырья и сохранения его качества. Описаны основные технологические стадии производства полуфабрикатов, включая подготовку сырья, радиационную обработку с использованием

ионизирующего излучения при оптимизированных дозах, изготовление продукции, упаковку и хранение. Особое внимание уделено влиянию облучения на микробиологические показатели, физико-химические свойства, пищевую и биологическую ценность мясных полуфабрикатов. Показано, что радиационная обработка значительно снижает количество патогенной и условно-патогенной микрофлоры, замедляет микробиологическую порчу и окислительные изменения, тем самым продлевая срок хранения сырья и готовой продукции по сравнению с традиционными технологиями. Соблюдение оптимальных доз облучения обеспечивает сохранность белкового, жирового и аминокислотного состава мяса, а также удовлетворительные органолептические характеристики. Полученные данные подтверждают целесообразность внедрения технологии производства полуфабрикатов из радиационно обработанного мясного сырья в пищевой промышленности для обеспечения безопасности, стабильного качества продукции и увеличения сроков ее хранения.

Ключевые слова: *радиационная обработка, оптимальная доза обработки, полуфабрикат, срок хранения, микробиологическая безопасность.*

Авторлар туралы мәліметтер

Гүлнұр Несіптайқызы Нұрымхан –техника ғылымдарының кандидаты, «Тамақ технологиясы» кафедрасының қауымдас.профессоры, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: gulnu-n@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0955-3520.

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.

Сведения об авторах

Гулнур Несиптаевна Нурымхан – кандидат технических наук, ассоц.профессор кафедры «Пищевых технологий», Шәкәрім университет, Республика Казакстан; e-mail: gulnu-n@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0955-3520.

Назерке Рахифовна Муслимова* – магистр технических наук, докторант кафедры «Пищевых технологий», Шәкәрім университет, Республика Казакстан; e-mail: muslimova.n.r@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2536-0590.

Information about the authors

Gulnur Nurymkhan – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Food Technologies, Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: gulnu-n@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0955-3520.

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.

Редакцияға енуі 05.01.2026
Өңдеуден кейін түсуі 11.01.2026
Жариялауға қабылданды 22.01.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-40

МРНТИ: 65.59.15

CC BY 4.0
Check for updates

А.К. Суйчинов, Ж.С. Есимбеков, Г.А. Капашева*
[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

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЯСО-КОСТНОГО СЫРЬЯ ПТИЦЫ ПОСЛЕ ФЕРМЕНТАТИВНОЙ ОБРАБОТКИ ПЕПСИНОМ

Аннотация: *В данной работе подробно рассмотрена технология получения белково-минеральных продуктов из мясо-костного сырья птицы путём ферментативной биоконверсии с применением фермента пепсина. Представлен комплекс исследований, включающий анализ химического состава, а также изучение физико-химических и функционально-технологических*

©А.К. Суйчинов, Ж.С. Есимбеков, Г.А. Капашева, 2026

характеристик полученных продуктов в форме фаршеобразных масс и сублимированных порошков. Установлено, что ферментативная обработка обеспечивает эффективное расщепление белково-коллагеновых комплексов, способствуя образованию короткоцепочечных пептидов с высокой биологической ценностью. Применение сублимационной сушки позволило сохранить и концентрировать питательные вещества, а также повысить стабильность и срок хранения конечных продуктов.

Значения кислотности (pH от 6,2 до 6,9) и активности воды (от 0,25 до 0,99) подтверждают микробиологическую безопасность образцов. Максимальное содержание белка в порошках составило до 55,4%, минеральных веществ – до 29,7%, что указывает на их высокую пищевую ценность. Порошкообразные ингредиенты продемонстрировали отличные технологические параметры, в том числе высокую влагоудерживающую способность (182,5%) и жироудерживающую способность (135%), что делает их перспективными для использования в мясных продуктах в качестве функциональных компонентов.

Полученные результаты подтверждают эффективность применения ферментативной биоконверсии с использованием пепсина и демонстрируют научную и практическую значимость данной технологии при создании белково-минеральных пищевых добавок нового поколения.

Ключевые слова: *мясо птицы, мясо-костное сырьё, пепсин, биоконверсия, белково-минеральный продукт, функциональные свойства.*

Введение

Рациональное использование отходов и побочных продуктов мясной промышленности, в частности животноводческого и птицеводческого сырья, представляет собой актуальную задачу в контексте устойчивого развития, пищевой безопасности и экономики замкнутого цикла. Среди наиболее перспективных направлений переработки вторичных ресурсов экстракционные и биоконверсионные технологии, позволяющие получать белково-минеральные концентраты и функциональные добавки [1].

Экстракционные методы применяются для выделения водорастворимых белков, минеральных соединений (в первую очередь кальция и фосфора), а также низкомолекулярных метаболитов. Используются водная экстракция при различных температурах, гидромодулях и значениях pH, а также щелочные или ферментативно-подготовленные режимы [2]. Водная экстракция при 45–55 °C способствует мягкому переходу растворимых белков и минеральных веществ в жидкую фазу, сохраняя биологическую активность компонентов [3]. Щелочная экстракция (с использованием растворов NaOH, KOH) позволяет эффективно разрушать клеточные стенки, облегчая выделение белков и костных солей, но требует тщательной нейтрализации и контроля остаточной щёлочи в продукте. Согласно приведённому в пособии материалу, оптимизация условий экстракции (гидромодуль, температура, pH) позволяет существенно повысить выход белковых и минеральных веществ при сохранении безопасности и питательной ценности полуфабриката [2].

Ферментативная биоконверсия является более щадящим и эффективным способом гидролиза белков и коллагенсодержащих тканей с использованием протеолитических ферментов, таких как протосубтилин, алкализин, коллагеназа и др. Ферментативное расщепление позволяет получать легкоусвояемые пептиды, свободные аминокислоты и биоактивные соединения [4]. Активность ферментов зависит от условий среды: pH, температуры и продолжительности воздействия. Например, для коллагеназы оптимальны условия при 45-50 °C и pH 7,0-7,2, при которых достигается эффективный гидролиз соединительной ткани с последующим повышением растворимости и функциональных свойств продукта. Согласно пособию, такие условия обеспечивают образование текстурированной пастообразной массы, пригодной для включения в фаршевые системы или последующей сушки [5].

Микробная биоконверсия, как отдельное или комбинированное направление, реализуется за счёт действия молочнокислых бактерий (например, *Lactobacillus plantarum*, *Micrococcus caseolyticus*), которые способны снижать pH, улучшать микробиологическую стабильность продукта и обогащать его метаболитами [6]. Добавление 10% молочной сыворотки и соли способствует активации роста микрофлоры и повышению безопасности субстратов. Однако микробная ферментация требует строгого контроля pH, температуры (25-30 °C) и продолжительности (до 24 часов), а также оценки санитарных показателей [7].

Таким образом, экстракционные и биоконверсионные методы, особенно в сочетании, позволяют глубоко перерабатывать мясо-костные остатки птицы и КРС, обеспечивая высокий выход функциональных белково-минеральных продуктов с улучшенными технологическими характеристиками. Эти подходы создают основу для разработки эффективных технологий утилизации побочных продуктов и их включения в структуру пищевых и кормовых систем.

Целью данной работы является разработка и научное обоснование технологии получения белково-минеральных продуктов из мясо-костного сырья птицы методом ферментативного гидролиза с использованием пепсина.

Объекты и методы исследования

В качестве объектов исследования использовали мясное сырьё птицы: куриные крылья, шейки. Сырьё промывали проточной водой и измельчали на мясорубке (диаметр отверстий 3 мм), затем на коллоидной мельнице до размера частиц ~0,1 мм.

Для приготовления суспензии костной массы и шейного сырья использовали различный гидромодуль в зависимости от вида сырья. Полученную массу подкисляли раствором соляной кислоты до кислой реакции среды и термостатировали при заданной температуре.

Дозировку пепсина рассчитывали с учётом содержания белка в исследуемом сырье. Для проведения основных и вариационных серий экспериментов использовали несколько уровней ферментативной активности. Фермент предварительно растворяли в подкисленной воде и вносили в суспензию при постоянном перемешивании.

Ферментативный гидролиз проводили при pH 2,0-2,2, температуре 40 ± 2 °C в течение 2,5-3,0 ч для костей и 2,0-2,5 ч для шеек. Перемешивание осуществляли каждые 15 мин, контроль pH – каждые 30 мин.

Реакцию останавливали нейтрализацией до pH 7,0-7,2 (1 M NaOH) и нагреванием до 85-90 °C в течение 5-10 мин. Полученную массу центрифугировали при 3000-5000 об/мин 15-20 мин для удаления избыточной жидкости и получения фаршеобразной пасты.

Часть образцов подвергали сублимационной сушке до остаточной влажности 5-8% с последующим измельчением в порошок. Полученные белково-минеральные добавки использовали для последующих испытаний в составе фаршевых систем.

Определение общего химического состава проводили методом одной навески исследуемой пробы. Метод заключается в последовательном определении в одной навеске продукта содержания влаги, жира, белка и золы с использованием устройства для определения влажности и жирности мясных и молочных продуктов ускоренным методом [8].

Определение активности воды

Определение активности воды (aw) – с использованием прибора LabTouch-aw (Италия) [9].

Определение pH. Активную кислотность среды (pH) определяли потенциометрическим методом на приборе pH-метр-Seven2Go™, погружением электрода 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 20^0C [10].

Определение функционально-технологических свойств

Функционально-технологические свойства белково-минеральной массы из куриного сырья влагоудерживающая способность (ВУС), жироудерживающая способность (ЖУС), эмульгирующая способность (ЭС) и стабильность эмульсии (СЭ) определялись по методике, предложенной Тимошенко и соавторами [11].

Функционально-технологические свойства сублимированного порошка белково-минеральной массы из куриного сырья – влагоудерживающая способность (ВУС), жироудерживающая способность (ЖУС), эмульгирующая способность (ЭС) и стабильность эмульсии (СЭ) – определялись по методике, описанной в работе Амина Альвана и соавторов [12].

Определение предельного напряжения сдвига (ПНС)

Исследовательские работы проводились на приборе «Структурометр СТ-2». Данное устройство представляет собой автоматическое электромеханическое устройство с микропроцессорным управлением, осуществляющее измерение механической нагрузки, создаваемой с помощью индентора, закрепленного в тензодатчике при его внедрении в пробу продукта и математический анализ полученных результатов с целью определения его

реологических и прочностных характеристик. Методика исследованмй основана на определении усилия нагружения на конический индентор (угол при вершине α=60°) при его внедрении в подготовленную пробу мясного пасты на глубину 10 мм при скорости движения (внедрения) 0,5 мм/с [13].

Расчёт ПНС осуществлялся по формуле.

$$\theta_0 = K\frac{m}{h^2}, \text{ Па}, \quad (1)$$

где: К – константа конуса,

т – масса конуса и всех подвижных частей, кг,

h – глубина погружения конуса, м.

Учитывая, что прибор «Структурометр СТ-2» вместо массы конуса и всех подвижных частей выдает значение нагружения в граммах, а глубину погружения конуса в миллиметрах, то соответственно для удобства расчетов формула (1) преобразована в следующую зависимость:

$$\theta_0 = K \cdot \frac{P \cdot 9{,}81 \cdot 10^3}{h^2}, \text{ Па}, \quad (2)$$

где: Р – усилие, создаваемое прибором, г.

Для каждого исследуемого образца следует выполнить 3-5 измерений.

Среднеарифметическое значение ПНС для каждой серии образцов вычислялось по формуле (3):

$$\theta_0 = \frac{\sum \theta_i}{i}, \text{ Па}, \quad (3)$$

где i – количество измерений.

Определение динамической вязкости и напряжения сдвига

Динамическую вязкость и напряжение сдвига мясокостной пасты определяли с использованием вискозиметра BOYN Digital Viscometer (КНР) согласно инструкции прибора [14].

Определение цветовых характеристик

Цветовые характеристики определяли с использованием хромаметра Chroma Meter CR-400 (Konica Minolta, Япония).

Статистический анализ

Обработку результатов измерений осуществляли с помощью программы Microsoft Excel 2016. Результаты анализов были статистически значимы при $p \leq 0{,}05$. Данные представлены как среднее значение ± стандартное отклонение.

Результаты и их обсуждение

Исследование химического состава белково-минеральной массы

В результате ферментативной биоконверсии мясо-костного сырья птицы с использованием пепсина были получены четыре вида белково-минеральных продуктов: две фаршеобразные массы (из куриных шеек и костей) и два сублимированных порошка на их основе.

Химический анализ показал, что белково-минеральная масса из куриных шеек содержала 59,37% влаги, 17,68% белка, 8,12% жира и 14,83% золы, тогда как масса из куриных костей характеризовалась более высоким содержанием белка 32,61%, при 40,95% влаги, 7,79% жира и 18,65% золы. Использование костного сырья обеспечивает более концентрированный белково-минеральный продукт за счёт меньшей влажности и более высокой зольности, отражающей степень высвобождения минеральных компонентов при гидролизе (табл. 1).

Таблица 1 – Химический состав белково-минеральных продуктов из мясокостного сырья, %

Наименование	Влага	Белок	Жир	Зола
Белково-минеральная масса из куриных шеек	59.37±1.03	17.68±0.26	8.12±0.08	14.83±0.16
Белково-минеральная масса из куриных костей	40.95±0.84	32.61±0.40	7.79±0.07	18.65±0.18
Сублимированный порошок белково-минеральной массы из куриных шеек	2.46±0.05	55.43±0.47	19.49±0.29	22.62±0.29
Сублимированный порошок белково-минеральной массы из куриных костей	6.04±0.12	52.68±0.79	11.60±0.12	29.68±0.31

После сублимационной сушки наблюдалось закономерное снижение влажности до 2,46% и 6,04% для шеек и костей соответственно, что сопровождалось увеличением относительного содержания сухих веществ. В сублимированных порошках содержание белка достигало 55,43% для образца из шеек и 52,68% для образца из костей, что подтверждает эффективность ферментативного расщепления и концентрации белковых компонентов. Уровень золы составлял 22,62% и 29,68% соответственно, указывая на сохранение минеральной фракции, в том числе кальция и фосфора, типичных для мясо-костного сырья.

Сравнительный анализ показывает, что пепсиновая биоконверсия способствует получению сбалансированных по белково-жировому и минеральному составу продуктов с выраженными функциональными свойствами. Сублимационная сушка обеспечивает стабильность и концентрацию питательных веществ без потери термолабильных компонентов. Полученные данные подтверждают перспективность ферментативной биоконверсии и сублимационной сушки для создания белково-минеральных пищевых добавок из вторичного сырья птицы.

Исследование pH и активности воды образцов

Проведено определение кислотно-щелочного баланса и активности воды в полученных белково-минеральных продуктах после ферментативной биоконверсии мясо-костного сырья птицы с использованием пепсина. Показано, что белково-минеральная масса из куриных шеек имела pH 6,52 и активность воды 0,994, тогда как масса из куриных костей характеризовалась несколько более щелочной реакцией pH 6,93 и пониженной активностью воды 0,9701. Эти значения свидетельствуют о близости полученных масс к нейтральной среде, что благоприятно для их стабильности и применения в мясных системах без риска избыточного подкисления продукта. Данные приведены на рисунке 1.

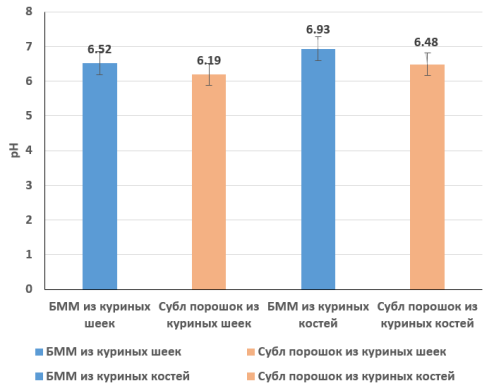


Рисунок 1 – Показатели pH белково-минеральных продуктов

После сублимационной сушки наблюдалось закономерное снижение активности воды вследствие удаления влаги и перехода продукта в стабильное сухое состояние. Активность воды в порошке из куриных шеек составила 0,2545, а из костей – 0,4906, что соответствует диапазону микробиологической стабильности ($a_n w$ < 0,6). Одновременно отмечено незначительное смещение pH в сторону кислой области – до 6,19 и 6,48 соответственно, что объясняется концентрацией низкомолекулярных пептидов и органических кислот, образующихся в процессе ферментативного гидролиза (рис. 2).

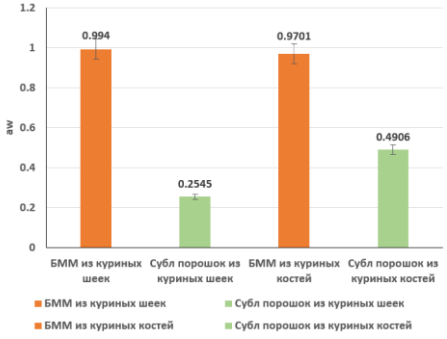


Рисунок 2 – Показатели активности воды белково-минеральных продуктов

Полученные результаты демонстрируют, что пепсиновая биоконверсия в сочетании с сублимационной сушкой позволяет формировать белково-минеральные продукты с оптимальным pH и низкой активностью воды, обеспечивая микробиологическую устойчивость и стабильность при хранении. Снижение активности воды и сдвиг pH в слабокислую зону являются положительными факторами, повышающими срок годности и функциональную пригодность добавок для использования в составе мясных и комбинированных продуктов.

Исследование функционально-технологических свойств белково-минеральных продуктов

Для оценки технологического потенциала полученных белково-минеральных продуктов определяли их влагосвязывающую способность (ВСС), влагоудерживающую способность (ВУС), жироудерживающую способность (ЖУС), эмульгирующую способность (ЭС) и стабильность эмульсии (СЭ).

Белково-минеральная масса из куриных шеек (образец 1) характеризовалась ВСС 69,7%, ВУС 61,28%, ЖУС 41,1%, ЭС 51% и СЭ 30%. Масса из куриных костей (образец 2) имела более низкие значения ВСС (45,9%) и ВУС (40,95%), но близкие показатели ЖУС (41,1%), ЭС (48%) и несколько меньшую стабильность эмульсии (18%). Эти различия связаны с разным соотношением коллагеновой и мышечной фракций в сырье: шейная масса содержит больше миофибриллярных белков, способных к удержанию влаги и эмульгированию жира, тогда как костная масса характеризуется повышенным содержанием минерализованного коллагена и более низкой гидрофильностью (рис. 3).

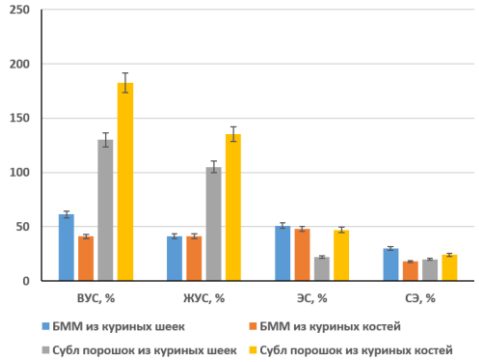


Рисунок 3 – Функционально-технологические свойства белково-минеральных продуктов

После сублимационной сушки наблюдалось резкое увеличение ВУС и ЖУС, особенно у порошков из костного сырья (образец 4), где ВУС достигла 182,5%, а ЖУС – 135%. Аналогичные показатели для порошка из шеек (образец 3) составили 130% и 105% соответственно. Увеличение этих параметров объясняется пористой структурой лиофилизата, способствующей интенсивному набуханию и удержанию воды и жира при восстановлении.

В то же время эмульгирующая способность порошков снизилась до 22% (шеи) и 47% (кости), что связано с частичной денатурацией и агрегацией белков при сушке. Стабильность эмульсии также уменьшилась и составила 20-24%, отражая ограниченную способность сухих белков формировать прочные эмульсионные системы без предварительной гидратации.

Таким образом, ферментативно-гидролизованные фаршеобразные массы обладают лучшими эмульгирующими характеристиками, тогда как сублимированные порошки отличаются высокой влаго- и жироудерживающей способностью. Это свидетельствует о возможности их дифференцированного применения: гидролизаты – в рецептурах эмульсионных мясных продуктов (паштеты, колбасы), а порошки как влагорегулирующие и структурообразующие добавки при производстве функциональных мясных и комбинированных изделий.

Исследование реологических свойств белково-минеральных масс фаршеобразной консистенции

Реологические характеристики белково-минеральных масс являются ключевыми показателями, определяющими их технологическую пластичность, формуемость и способность удерживать воду и жир в процессе тепловой обработки. Для оценки структурно-

механических свойств исследовали вязкость, напряжение сдвига и предельное напряжение сдвига (ПНС) образцов, полученных из куриных шеек и костей после ферментативной биоконверсии с использованием пепсина.

Белково-минеральная масса из куриных шеек (образец 1) характеризовалась вязкостью 7,89 Па·с, напряжением сдвига 5647,9 мПа и ПНС 0,620 кПа. Аналогичные параметры для массы из куриных костей (образец 2) составили 7,77 Па·с, 5556,9 мПа и 0,612 кПа соответственно (табл. 2).

Таблица 2 – Реологические характеристики белково-минеральных масс (БММ) из куриного сырья

Наименование	Вязкость (Па•с)	Напряжение сдвига, мПа	ПНС, кПа
БММ из куриных шеек	7,899±0,117	5647,9±77,5	0,620±0,01
БММ из куриных костей	7,772±0,118	5556,9±74,1	0,612±0,01

Полученные результаты свидетельствуют о близких реологических характеристиках обоих образцов, что указывает на формирование однородной дисперсной структуры после гидролиза. Незначительно более высокая вязкость и ПНС в образце из куриных шеек, вероятно, связаны с большим содержанием миофибриллярных белков и меньшей степенью минерализации, что способствует образованию более эластичной белковой сетки. Масса из костного сырья, напротив, содержит больше коллагеновой и минеральной фракций, которые придают системе более пластичный, но менее упругий характер.

Сравнительно высокие значения вязкости (7,7-7,9 Па·с) и напряжения сдвига подтверждают устойчивость и структурную стабильность масс, что делает их пригодными для применения в рецептурах мясных фаршевых продуктов, паштетов и эмульсионных систем. Таким образом, ферментативная биоконверсия обеспечивает формирование пластичной и технологически адаптированной белково-минеральной матрицы, обладающей удовлетворительными структурно-механическими свойствами.

Исследование цветовых характеристик белково-минеральных масс фаршеобразной консистенции

Цветовые параметры белково-минеральных продуктов являются важным индикатором степени денатурации белков, наличия пигментов и степени окисления компонентов, а также влияют на восприятие готовых изделий при их использовании в мясных системах. Для оценки цветности исследуемых образцов использовали колориметрическую систему CIE Lab*, где L* характеризует светлоту, a* – интенсивность красного/зеленого тона, а b* – желтого/синего.

Белково-минеральная масса из куриных шеек (образец 1) имела следующие показатели: L = 52,41*, a = 18,67*, b = 11,01*, что указывает на умеренно светлый, розовато-бежевый оттенок. Для массы из куриных костей (образец 2) значения составляли L = 48,11*, a = 26,11*, b = 11,66*, что отражает более тёмный и насыщенный красновато-коричневый оттенок (табл. 3).

Таблица 3 – Цветовые характеристики белково-минеральных продуктов

Образец	Цвет (L*)	Цвет (a*)	Цвет (b*)
БММ из куриных шеек	52,41	18,67	11,01
БММ из куриных костей	48,11	26,11	11,66

Снижение светлоты (L*), сопровождающееся увеличением показателя a* в образце из костного сырья, связано с более высокой степенью термического воздействия на миоглобин и продуктами реакции Майяра, а также с присутствием гемовых пигментов, высвобождающихся из костного и кровеносного остатка. Кроме того, минеральные соединения (в частности, железо и фосфаты), присутствующие в костной массе, могли способствовать усилению красно-коричневого тона.

Таким образом, образцы, полученные из куриных шеек белково-минеральные продукты, обладают более светлой и однородной окраской, что делает их предпочтительными для включения в рецептуры паштетов и эмульсионных мясных изделий, где требуется нейтральный или светлый цвет. Образцы из костного сырья, напротив, характеризуются более интенсивной окраской, что может быть технологически полезным при разработке мясных паст и начинок с выраженным цветом, имитирующим темные виды мяса.

Выводы

В результате ферментативной биоконверсии мясо-костного сырья птицы с использованием пепсина получены белково-минеральные продукты в виде фаршеобразных масс и сублимированных порошков с высокой пищевой и технологической ценностью. Химический анализ показал оптимальное соотношение белка (17,7-32,6%) и минеральных веществ (14,8-18,7%) в гидролизатах, при низкой влажности и высоком содержании белка в лиофилизированных образцах (до 55%). Значения pH (6,2-6,9) и активности воды (0,25-0,99) указывают на стабильность продуктов и возможность их длительного хранения. Исследование функционально-технологических свойств выявило высокие влаго- и жироудерживающие способности, особенно в порошках (до 182,5% и 135% соответственно). Реологические параметры (вязкость 7,8 Па·с, ПНС ~0,62 кПа) свидетельствуют о хорошей пластичности и формуемости масс. Цветовые характеристики варьировали от светло-розового до тёмно-коричневого. Полученные продукты перспективны для применения в мясных системах как функциональные белково-минеральные добавки.

Список литературы

1. Биотехнологическая переработка отходов сельского хозяйства и пищевой промышленности / М.М. Шамцян и др. // Российский химический журнал. Журнал Российского химического общества им. Д.И. Менделеева. – 2011. – Вып. 1. – С. 17-25.
2. Инновационные методы экстракции биологически активных веществ из растительного сырья / Ю.С. Сидорова и др. // Вопросы питания. – 2023. – Т. 92, № 6 (550). – С. 28-37.
3. Османов В.К. Методы выделения и очистки продуктов биотехнологических производств / В.К. Османов, О.В. Бирюкова, А.В. Борисова // Нижний Новгород: НГМА. – 2005. – С. 29.
4. Машанов А.И. Биоконверсия растительного сырья: учеб. пособие / А.И. Машанов, Н.А. Величко, Е.Е. Ташлыкова. – Красноярск: Красноярский гос. аграр. ун-т, 2014. – 223 с.
5. Приворотская Елизавета Александровна. Получение стабилизированных форм гидролитических ферментов технического и фармацевтического назначения: дис. канд. хим. наук: 03.01.06 / Рос. хим.-технол. ун-т им. Д.И. Менделеева, Москва, 2017. – 171 с.
6. Насибов Э.М. Разработка биотехнологических процессов получения коллагенолитических протеаз с использованием микромицетов: автореф. дис. канд. биол. наук. – Москва: Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, 2024. – 18 с.
7. Лысенко Ю.А. Разработка бактериального концентрата на основе клеток Lactobacillus acidophilus / Ю.А. Лысенко, С.А. Волкова, В.В. Петрова // Молодой ученый. – 2015. – № 1(81). – С. 80-82. https://moluch.ru/archive/81/14749.
8. Антипова Л.В. Методы исследования мяса и мясных продуктов / Л.В. Антипова, И.А. Глотова, И.А. Рогов. – М.: Колос, 2001. – 376 с.
9. ГОСТ ISO 21807-2015. Микробиология пищевой продукции и кормов. Определение активности воды. – Введ. 2017-07-01. – М.: Стандартинформ, 2016. – 3 с.
10. СТ РК ИСО 2917-2009. Мясо и мясные продукты. Определение pH. Контрольный метод. – Введ. 2010-07-01. – Астана: Госстандарт Республики Казахстан, 2010. – 16 с.
11. Методический указания к лабораторно-практической работе «Функционально-технологические свойства мяса» / Н.В. Тимошенко и др. – Краснодар. КубГАУ, 2015 – 26 с.
12. Альван А. Функциональные свойства белковых продуктов из семян кунжута / А. Альван, А.Д. Минакова, В.Г. Щербаков // Известия вузов. Пищевая технология. – 1999. – № 2-3. – С. 17-18.
13. ГОСТ Р 50814-95. Мясопродукты. Методы определения пенетрации конусом и игольчатым индентором. – Введ. 2015-07-31. – М.: Стандартинформ, 2010. – 6 с.
14. Ротационные вискозиметры Брукфильда в исследовании пищевых продуктов / А.К. Какимов и др. // Вестник ГУ имени Шакарима. – 2015. – № 3(71). – С.87-91.
15. ГОСТ 33479-2015. Продукты переработки фруктов и овощей. Определение цвета колориметрическим методом. – М.: Стандартинформ, 2016. – 12 с.

References

1. Biotekhnologicheskaya pererabotka otkhodov sel'skogo khozyaistva i pishchevoi promyshlennosti / M.M. Shamtsyan i dr. // Rossiiskii khimicheskii zhurnal. Zhurnal Rossiiskogo khimicheskogo obshchestva im. D.I. Mendeleeva. – 2011. – Vyp. 1. – S. 17-25. (In Russian).

2. Innovatsionnye metody ehkstraktsii biologicheski aktivnykh veshchestv iz rastitel'nogo syr'ya / YU.S. Sidorova i dr. // Voprosy pitaniya. – 2023. – T. 92, № 6 (550). – S. 28-37. (In Russian).
3. Osmanov V.K. Metody vydeleniya i ochistki produktov biotekhnologicheskikh proizvodstv / V.K. Osmanov, O.V. Biryukova, A.V. Borisova // Nizhnii Novgorod: NGMA. – 2005. – S. 29. (In Russian).
4. Mashanov A.I. Biokonversiya rastitel'nogo syr'ya: ucheb. posobie / A.I. Mashanov, N.A. Velichko, E.E. Tashlykova. – Krasnoyarsk: Krasnoyarskii gos. agrar. un-t, 2014. – 223 s. (In Russian).
5. Privorotskaya Elizaveta Aleksandrovna. Poluchenie stabilizirovannykh form gidroliticheskikh fermentov tekhnicheskogo i farmatsevticheskogo naznacheniya: dis. kand. khim. nauk: 03.01.06 / Ros. khim.-tekhnol. un-t im. D.I. Mendeleeva, Moskva, 2017. – 171 s. (In Russian).
6. Nasibov EH.M. Razrabotka biotekhnologicheskikh protsessov polucheniya kollagenoliticheskikh proteaz s ispol'zovaniem mikromitsetov: avtoref. dis. kand. biol. nauk. – Moskva: Rossiiskii khimiko-tekhnologicheskii universitet im. D.I. Mendeleeva, 2024. – 18 s. (In Russian).
7. Lysenko YU.A. Razrabotka bakterial'nogo kontsentrata na osnove kletok Lactobacillus acidophilus / YU.A. Lysenko, S.A. Volkova, V.V. Petrova // Molodoi uchenyi. – 2015. – № 1(81). – S. 80-82. https://moluch.ru/archive/81/14749. (In Russian).
8. Antipova L.V. Metody issledovaniya myasa i myasnykh produktov / L.V. Antipova, I.A. Glotova, I.A. Rogov. – M.: Kolos, 2001. – 376 s. (In Russian).
9. GOST ISO 21807-2015. Mikrobiologiya pishchevoi produktsii i kormov. Opredelenie aktivnosti vody. – Vved. 2017-07-01. – M.: Standartinform, 2016. – 3 s. (In Russian).
10. 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).
11. Metodicheskii ukazaniya k laboratorno-prakticheskoi rabote «Funktsional'no-tekhnologicheskie svoistva myasA» / N.V. Timoshenko i dr. – Krasnodar. KuBGAU, 2015 – 26 s. (In Russian).
12. Al'van A. Funktsional'nye svoistva belkovykh produktov iz semyan kunzhuta / A. Al'van, A.D. Minakova, V.G. Shcherbakov // Izvestiya vuzov. Pishchevaya tekhnologiya. – 1999. – № 2-3. – S. 17-18. (In Russian).
13. GOST R 50814-95. Myasoprodukty. Metody opredeleniya penetratsii konusom i igol'chatym indentorom. – Vved. 2015-07-31. – M.: Standartinform, 2010. – 6 s. (In Russian).
14. Rotatsionnye viskozimetry Brukfil'da v issledovanii pishchevykh produktov / A.K. Kakimov i dr. // Vestnik GU imeni Shakarima. – 2015. – № 3(71). – S.87-91. (In Russian).
15. GOST 33479-2015. Produkty pererabotki fruktov i ovoshchei. Opredelenie tsveta kolorimetricheskim metodom. – M.: Standartinform, 2016. – 12 s. (In Russian).

Материалы подготовлены в рамках научно-технической программы BR24992938 Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан на 2024-2026 годы.

А.К. Суйчинов, Ж.С. Есимбеков, Г.А. Капашева*
[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

ПЕПСИНМЕН ФЕРМЕНТАТИВТІ ӨҢДЕУДЕН КЕЙІН ҚҰС ЕТ-СҮЙЕКТЕН ЖАСАЛҒАН ШИКІЗАТЫНЫҢ ФИЗИКА-ХИМИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ

Бұл жұмыста пепсин ферментін қолдану арқылы құс ет-сүйек шикізатынан ферментативтік биоконверсия жолымен ақуызды-минералды өнімдер алу технологиясы жан-жақты қарастырылған. Зерттеулер кешені жүргізіліп, алынған өнімдердің фарш тәрізді массалар және сублимациялық кептірілген ұнтақтар түріндегі химиялық құрамы, сондай-ақ физика-химиялық және функционалдық-технологиялық қасиеттері зерттелді. Ферментативтік өңдеу ақуыз-коллаген кешендерінің тиімді ыдырауын қамтамасыз етіп, жоғары биологиялық құндылыққа ие қысқа тізбекті пептидтердің түзілуіне ықпал ететіні анықталды. Сублимациялық кептіру қоректік заттарды сақтау мен шоғырландыруға, сондай-ақ соңғы өнімдердің тұрақтылығы мен сақтау мерзімін арттыруға мүмкіндік берді.

Қышқылдық көрсеткіштері (pH 6,2-6,9 аралығында) және су белсенділігі мәндері (0,25-0,99) үлгілердің микробиологиялық қауіпсіздігін растайды. Ұнтақтардағы ақуыздың ең жоғары мөлшері 55,4%-ға дейін, ал минералды заттардың мөлшері 29,7%-ға дейін жетіп, олардың жоғары тағамдық құндылығын көрсетеді.

Ұнтақ тәрізді ингредиенттер жоғары су ұстап тұру қабілетімен (182,5%) және май ұстап тұру қабілетімен (135%) ерекшеленіп, оларды ет өнімдерінде функционалдық компоненттер

ретінде қолданудың перспективалы екендігін дәлелдейді. Алынған нәтижелер пепсинді қолдана отырып жүргізілген ферментативтік биоконверсияның тиімділігін растап, жаңа буындағы ақуызды-минералды тағамдық қоспаларды әзірлеудегі осы технологияның ғылыми және практикалық маңыздылығын көрсетеді.

Түйін сөздер: *құс еті, ет-сүйек шикізаты, пепсин, биоконверсия, ақуызды-минералды өнім, функционалды қасиеттер.*

A.K. Suichinov, Zh.S. Yesimbekov, G.A. Kapasheva*
[1]Kazakh Scientific Research Institute of Processing and Food Industry (Semey branch),
071410, Republic of Kazakhstan, Semey, 29 Baitursynova str.
*e-mail: gena.89.89@mail.ru

INVESTIGATION OF THE PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF PIG MEAT AND BONE RAW MATERIALS AFTER ENZYMATIC TREATMENT WITH PEPSYN

This study provides a detailed examination of the technology for producing protein – mineral products from poultry meat-and-bone raw materials through enzymatic bioconversion using the enzyme pepsin. A comprehensive set of investigations is presented, including analysis of the chemical composition, as well as the study of physicochemical and functional-technological properties of the resulting products in the form of minced-like masses and freeze-dried powders.

It was established that enzymatic treatment ensures effective degradation of protein–collagen complexes, promoting the formation of short-chain peptides with high biological value. The application of freeze-drying made it possible to preserve and concentrate nutrients, as well as to enhance the stability and shelf life of the final products.

Acidity values (pH ranging from 6.2 to 6.9) and water activity levels (from 0.25 to 0.99) confirm the microbiological safety of the samples. The maximum protein content in the powders reached up to 55.4%, while mineral substances accounted for up to 29.7%, indicating their high nutritional value.

The powdered ingredients demonstrated excellent technological properties, including high water-holding capacity (182.5%) and fat-holding capacity (135%), making them promising for use in meat products as functional components. The obtained results confirm the effectiveness of enzymatic bioconversion using pepsin and demonstrate the scientific and practical significance of this technology in the development of next-generation protein–mineral food additives.

Key words: *poultry meat, meat-and-bone raw material, pepsin, bioconversion, protein-mineral product, functional properties.*

Авторлар туралы мәліметтер

Ануарбек Казисович Суйчинов – қауымдастырылған профессор, PhD? «Қазақ қайта өңдеу және тағам өнеркәсіптері ғылыми зерттеу институты» ЖШС Семей филиалы, 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, 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, ғылыми қызметкер; e-mail: gena.89.89@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-0735-9783.

Сведения об авторах

Ануарбек Казисович Суйчинов – ассоц. профессор, PhD, Семейский филиал ТОО «Казахский научно-исследовательский институт перерабатывающей и пищевой промышленности», 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», 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», научный сотрудник; e-mail: gena.89.89@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-0735-9783.

Information about the authors

Anuarbek Kazisovich Suychinov – assoc. Professor, PhD; Kazakh Research Institute of Processing and Food Industry (Semey Branch), director; e-mail: asuychinov@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4862-3293.

Zhanibek Serikbekovich Yessimbekov – assoc. Professor, PhD, 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), researcher; e-mail: gena.89.89@mail.ru.
ORCID: https://orcid.org/0009-0001-0735-9783.

Поступила в редакцию 05.01.2026
Поступила после доработки 30.01.2026
Принята к публикации 30.01.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-41

IRSTI: 65.59.21

Z. Apsalikova[1], K. Amirkhanov[1], S. Gaptar[2], A. Baikadamova[1]*
[1]Shakarim University,
071412, Republic of Kazakhstan, Semey, Glinka str., 20A
[2] Siberian State University of Engineering and Biotechnology,
630039, Russian Federation, Novosibirsk, Dobrolyubova str., 160
*e-mail: a.baikadamova@shakarim.kz

STUDY OF HEAVY METAL AND RADIONUCLIDE CONTENT IN MEAT RAW MATERIALS DEPENDING ON THE TYPE OF THERMAL PROCESSING

Annotation: *The article presents the results of the assessment of heavy metal and radionuclide content in lamb depending on the type of thermal processing. The object of the study was lamb muscle tissue subjected to boiling, frying, and stewing under conditions typical for culinary practice. The concentrations of lead (Pb), cadmium (Cd), arsenic (As), as well as radionuclides cesium-137 (Cs-137) and strontium-90 (Sr-90), were determined using instrumental analytical methods after acid digestion and radiometric measurements. It was established that the initial content of toxic and radioactive elements in raw lamb did not exceed the maximum permissible concentrations regulated by sanitary and hygienic standards. The results showed that thermal processing significantly affects the redistribution and relative concentration of contaminants in the finished product. Boiling resulted in a pronounced decrease in heavy metal content (Pb by 58.6%, Cd by 56.7%, As by 18.2%) and radionuclide activity (Cs-137 by 69.8%, Sr-90 by 40.0%) due to their partial migration into the cooking broth. Frying led to a relative increase in the concentration of several elements, particularly Pb and Sr-90, as a result of moisture loss and product mass reduction, while stewing demonstrated intermediate effects. The obtained results confirm the necessity of considering the method of thermal processing when assessing lamb food safety and substantiate boiling as the most preferable method for minimizing toxic and radioactive element intake.*

Key words: *lamb; heavy metals; food safety; thermal processing; culinary processing.*

Introduction

Lamb is a widely consumed type of meat raw material characterized by high nutritional and biological value and serving as a source of complete proteins, essential amino acids, B-group vitamins, and mineral elements. At the same time, as a product of animal origin, lamb is capable of accumulating environmental contaminants, including heavy metals that enter the animal body through feed, water, and soil [1].

Lead, cadmium, and arsenic are among the major toxic elements, characterized by high toxicity, the ability to bioaccumulate, and long biological half-lives in the human body [2]. Even at levels not exceeding sanitary and hygienic standards, chronic dietary intake of heavy metals may adversely affect the functions of internal organs, which necessitates continuous monitoring of their content in meat raw materials and products [3].

In the Republic of Kazakhstan, lamb occupies a significant place in the structure of meat consumption and is traditionally included in the daily diet of the population. Sheep breeding is widely developed in various regions of the country, including areas characterized by heterogeneous environmental conditions, such as proximity to mining enterprises, metallurgical industries, and

©Z. Apsalikova, K. Amirkhanov, S. Gaptar, A. Baikadamova, 2026

territories with a history of radiation exposure. Under these conditions, meat raw materials, including lamb, may serve as an indicator of environmental contamination and a potential source of toxic and radioactive substances entering the human body through food chains.

Despite the importance of lamb in national nutrition, systematic studies evaluating the content of heavy metals and radionuclides in lamb produced in Kazakhstan, as well as the influence of culinary processing methods on their levels, remain limited. This circumstance determines the relevance of the present study, aimed at substantiating safe technological and culinary approaches to lamb processing under the conditions of environmentally heterogeneous regions of the Republic of Kazakhstan.

The relevance of this problem increases under conditions of intensified anthropogenic pressure, the intensification of livestock production, and the expansion of the geographical supply of meat raw materials. The level of heavy metal contamination in lamb may vary significantly depending on the region of production, animal husbandry conditions, and feed quality. This requires studying not only the initial levels of toxic elements but also the factors influencing their concentrations during technological and culinary processing [4].

According to data from FAO/WHO and EFSA, thermal processing does not destroy heavy metals; however, it may alter their distribution between product phases and their relative concentrations due to moisture loss and changes in product mass [5-7]. Therefore, when assessing the food safety of meat products, it is necessary to consider the effects of the method, temperature, and duration of thermal processing.

Despite its practical importance, data on the influence of various thermal processing methods on heavy metal content in lamb remain limited and fragmented. This necessitates comprehensive studies aimed at comparing boiling, frying, and stewing in terms of changes in the levels of toxic elements.

Boiling is considered the most preferable culinary processing method for food raw materials under conditions of increased environmental contamination with radioactive substances. During boiling, a significant proportion of radionuclides transfers into the broth, making its consumption undesirable. To obtain a safer broth, the product should be boiled in water for 10 minutes, after which the water is discarded and boiling is continued in a fresh portion of water. Such broth may be used for food purposes, for example, in the preparation of first courses. Before cooking, meat should be soaked in cold water for two hours after cutting it into small pieces, then refilled with cold water and boiled at low intensity for 10 minutes; the water is then drained, and cooking is continued in a new portion of water until done. It should be noted that frying meat and fish leads to dehydration and the formation of a crust on the surface, which hinders the removal of radionuclides and other harmful substances. Therefore, when there is a potential risk of food contamination with radioisotopes, boiled meat and fish dishes should be preferred.

The aim of this study is to investigate the content of heavy metals in lamb depending on the type of thermal processing and to assess the obtained results from the standpoint of food safety.

Materials and Methods

The object of the study was meat raw material-lamb (muscle tissue) obtained from clinically healthy animals approved for slaughter in accordance with veterinary and sanitary requirements. Samples of chilled lamb without visible signs of spoilage, mechanical damage, or foreign inclusions were used. To reduce variability in chemical composition, samples were taken from the same anatomical part of the carcass.

Before thermal processing, the meat was trimmed of connective tissue and excess fat and then cut into pieces of equal mass and thickness. Part of the samples was used to determine the initial content of heavy metals (control), while the remaining samples were subjected to thermal processing.

The following thermal processing methods were applied:

- boiling – treatment in potable water at 95-100°C until culinary readiness;
- frying – treatment in a pan without water addition at a surface temperature of 160-180°C;
- stewing – thermal treatment at moderate temperature with the addition of a small amount of water followed by simmering.

Processing times were selected to reflect conditions typical of household and technological culinary practice. After thermal processing, samples were cooled to room temperature, mass changes were recorded, and the samples were prepared for analysis.

The samples were homogenized, after which weighed portions were subjected to acid digestion until a clear solution suitable for analytical determination was obtained. Chemically resistant laboratory glassware pretreated with acids and rinsed with deionized water was used.

The contents of lead (Pb), cadmium (Cd), and arsenic (As) were determined using atomic absorption spectrometry (AAS) and/or inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). Calibration was performed using standard solutions. Analytical quality control included blank experiments, analysis of reference materials, and replicate determinations. Results were expressed in mg/kg of raw matter [8-9].

For the quantitative determination of radionuclides, particularly cesium-137 (Cs-137), food raw material samples were prepared in accordance with GOST 32161-2013, which includes preliminary sample preparation for measurements, activity registration, and assessment of compliance with radiation safety requirements. The selected samples were homogenized and standardized by mass, after which counting samples were prepared to measure the specific activity of Cs-137 using highly sensitive radiometric instruments in accordance with the methodology described in the subsection “Measurement of activity (specific activity) of cesium Cs-137 in counting samples.” The reliability of the results was ensured through quality control protocols, and content calculations were performed in accordance with the procedures established by the standard [10].

Assessment of the Effect of Thermal Processing. To assess the effect of thermal processing, the contents of heavy metals in raw (control) and thermally processed samples were compared, taking into account changes in product mass, which allowed evaluation of relative changes in element concentrations. The obtained values were compared with regulatory maximum permissible concentrations of heavy metals in meat and meat products.

Statistical analysis was performed using methods of variation statistics. For each parameter, the mean value and standard deviation were calculated. The significance of differences between control and processed samples was assessed using parametric statistical tests at a significance level of $p \leq 0.05$.

Results

The conducted studies showed that the initial content of heavy metals in raw lamb was within the limits of current sanitary and hygienic standards. Among the analyzed elements, lead exhibited the highest values, whereas cadmium and arsenic were detected at lower levels. These data indicate the absence of pronounced contamination of the meat raw material and allow its use as a representative object for assessing the effect of thermal processing.

Analysis of the experimental data demonstrated that boiling lamb is the most effective method for reducing the content of both heavy metals and radionuclides. After boiling, the concentration of lead decreased from 0.29 to 0.12 mg/kg, cadmium from 0.03 to 0.013 mg/kg, arsenic to 0.054 mg/kg, and the contents of Cs-137 and Sr-90 decreased by more than 2–3 times, which is due to their partial transfer into the aqueous phase (Table 1).

Table 1 – Changes in heavy metal content in lamb during thermal processing

The toxic element	Average value before treatment, mg/kg	Content after heat treatment, mg/kg		
		Boiling (1.5 h)	Frying (15 min)	Stewing (2.5 h)
Pb	0.29	0.12±0.04	0.32±0.09	0.18±0.05
Cd	0.03	0.013±0.004	0.021±0.006	0.02±0.006
As	0.066	0.054±0.022	0.050±0.020	0.035±0.012

Frying was accompanied by a relative increase in the content of lead (up to 0.32 mg/kg) and Sr-90 (up to 0.084 mg/kg), which is associated with moisture loss and the concentration of elements in the product (Table 2). Stewing was characterized by intermediate values of the indicators and provided a moderate reduction in the content of most toxic elements compared with the initial raw material.

Table 2 – Changes in the content of radionuclides in mutton during its heat treatment

Radionuclide	Average value before treatment, Bg/kg	Content after heat treatment, Bg/kg		
		Boiling (1.5 h)	Frying (15 min)	Stewing (2.5 h)
Cs-137	3.564	1.075	1.343	1.488
Sr-90	0.02	0.012	0.084	0.014

A comparative analysis of the results showed that boiling is the most favorable method of thermal processing in terms of reducing the content of heavy metals in lamb, whereas frying and roasting contribute to a relative increase in their concentrations. Stewing occupies an intermediate position and is characterized by more stable indicators.

The obtained results confirm that the choice of thermal processing method for lamb can have a significant impact on the level of heavy metals in the finished product and should be taken into account when assessing food safety and developing recommendations for rational nutrition.

The observed changes in heavy metal concentrations after thermal processing are predominantly redistributive in nature and do not indicate additional contamination of the product. The increase in concentrations noted during frying and roasting is due to the concentration effect resulting from dehydration of muscle tissue, which is consistent with the results of similar studies conducted on beef, lamb, and poultry meat [11-13].

The reduction in Cs-137 and Sr-90 contents during boiling and stewing is associated with their high solubility and ability to migrate into the liquid phase. Similar patterns have been described in studies devoted to the radiation safety of meat products subjected to culinary processing [14,15].

Thus, thermal processing does not eliminate heavy metals as a class of contaminants but significantly affects their quantitative distribution in the product. The obtained data confirm the necessity of a comprehensive approach to assessing the food safety of meat raw materials, including analysis of both the initial level of contamination and the influence of technological factors. The results of the study are of practical significance for the development of recommendations on the rational culinary processing of lamb under conditions of environmentally heterogeneous regions.

Conclusion

The conducted study demonstrated that the initial contents of lead (0.29 mg/kg), cadmium (0.03 mg/kg), arsenic (0.066 mg/kg), cesium-137 (3.564 Bq/kg), and strontium-90 (0.02 Bq/kg) in raw lamb did not exceed the established sanitary and hygienic standards.

It was quantitatively established that boiling is the most effective thermal processing method for reducing contaminant levels: lead content decreased by 58.6%, cadmium by 56.7%, arsenic by 18.2%, cesium-137 by 69.8%, and strontium-90 by 40.0% compared with raw meat. Frying resulted in a relative increase in the concentrations of lead (up to 0.32 mg/kg) and strontium-90 (up to 0.084 Bq/kg), primarily due to dehydration and concentration effects. Stewing showed intermediate values, providing partial reduction of toxic and radioactive elements while maintaining more stable indicators.

The obtained results confirm that changes in contaminant levels during thermal processing are redistributive in nature and are determined by mass loss and migration of elements into the liquid phase. From the standpoint of food safety, boiling should be recommended as the preferable culinary processing method for lamb, especially for populations residing in environmentally unfavorable regions. The findings may be applied in the development of practical recommendations for public catering establishments and household nutrition.

References

1. Zhubanov D.E. Pishchevaya i biologicheskaya tsennost' myasnykh produktov / D.E. Zhubanov, M.Ch. Tultabaev // Vestnik nauki. – 2025. – № 1(82). https://cyberleninka.ru/article/n/pischevaya-i-biologicheskaya-tsennost-myasnyh-produktov.
2. Makhnichenko A.S. Vliyanie tyazhelykh metallov na organizm cheloveka / A.S. Makhnichenko, A.E. Pashchenko // Science Time. – 2016. – № 2(26). https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-tyazhelyh-metallov-na-organizm-cheloveka.
3. Berezin I.I. Vliyanie soderzhaniya solei tyazhelykh metallov v produktakh pitaniya na zdorov'e naseleniya / I.I. Berezin, O.V. Sazonova // Obrazovatel'nyi vestnik «Soznanie». – 2008. – № 3. https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-soderzhaniya-soley-tyazhelyh-metallov-v-produktah-pitaniya-na-zdorovie-naseleniya.
4. Gleba O.V. Ekologicheskie problemy zhivotnovodcheskoi otrasli / O.V. Gleba // Agrarnoe i zemel'noe pravo. – 2019. – № 7(175). https://cyberleninka.ru/article/n/ekologicheskie-problemy-zhivotnovodcheskoy-otrasli.
5. Investigation of the food safety of lamb meat obtained in ecologically unfavorable territories / Z. Apsalikova et al // Frontiers in Sustainable Food Systems. – 2024. – Vol. 8. https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1368206.
6. Codex Alimentarius Commission. General Standard for Contaminants and Toxins in Food and Feed (CODEX STAN 193–1995). Rome: FAO/WHO, 1995.

7. EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM). Scientific Opinion on the risk for public health related to the presence of lead in food // EFSA Journal. – 2010. – Vol. 8, № 4. – Art. 1570. https://doi.org/10.2903/j.efsa.2010.1570.
8. GOST 33824-2016. Produkty pishchevye i prodovol'stvennoe syr'e. Inversionno-vol'tamperometricheskii metod opredeleniya soderzhaniya toksichnykh elementov (kadmii, svinets, med' i tsink). Moscow: Standartinform, 2016. https://internet-law.ru/gosts/gost/62938/ (accessed: 05.01.2026).
9. GOST 31628-2012. Produkty pishchevye i prodovol'stvennoe syr'e. Inversionno-vol'tamperometricheskii metod opredeleniya massovoi kontsentratsii mysh'yaka. Moscow: Standartinform, 2012. https://internet-law.ru/gosts/gost/52594/ (accessed: 05.01.2026).
10. GOST 32161-2013. Produkty pishchevye. Metod opredeleniya soderzhaniya tseziya Cs-137. Moscow: Standartinform, 2013. https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293777/4293777880.html (accessed: 05.01.2026).
11. FAO/WHO. Evaluation of certain contaminants in food. Geneva: WHO Press, 2011.
12. WHO. Heavy metals in food: exposure and health effects. Geneva: World Health Organization, 2020.
13. Commission Regulation (EU) 2023/915. Setting maximum levels for certain contaminants in foodstuffs // Official Journal of the European Union. 2023.
14. Sobhanardakani S. Effect of cooking process on heavy metal content of meat / S. Sobhanardakani // Food Chemistry. – 2018. – Vol. 249. – P. 117-121.
15. Demirezen D. Comparative study of trace elements in certain fish, meat and meat products / D. Demirezen, K. Uruc // Meat Science. – 2006. – Vol. 74. – P. 255-260.

З.С. Апсаликова[1], К.Ж. Амирханов[1], С.Л. Гаптар[2], А.М. Байкадамова[1]*
[1]Шәкәрім университет,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинки к-сі, 20А
[2]Сібір мемлекеттік инженерия және биотехнология университеті,
630039, Ресей Федерациясы, Новосібір қ., Добролюбов к-сі, 160
*e-mail: a.baikadamova@shakarim.kz

ТЕРМИЯЛЫҚ ӨҢДЕУ ТҮРІНЕ БАЙЛАНЫСТЫ ЕТ ШИКІЗАТЫНДАҒЫ АУЫР МЕТАЛДАР МЕН РАДИОНУКЛИДТЕРДІҢ ҚҰРАМЫН ЗЕРТТЕУ

Мақалада қой етінің термиялық өңдеу түріне байланысты құрамындағы ауыр металдар мен радионуклидтердің мөлшеріне бағалау нәтижелері ұсынылған. Зерттеу нысаны ретінде аспаздық тәжірибеде кеңінен қолданылатын жағдайларда қайнату, қуыру және бұқтыру әдістерімен өңделген қой етінің бұлшықет тіні алынды. Қорғасын (Pb), кадмий (Cd), мышьяк (As), сондай-ақ цезий-137 (Cs-137) және стронций-90 (Sr-90) радионуклидтерінің концентрациясы қышқылдық ыдыратудан кейін аспаптық-аналитикалық әдістер мен радиометриялық өлшеулер арқылы анықталды. Зерттеу нәтижелері бойынша шикі қой етіндегі улы және радиоактивті элементтердің бастапқы мөлшері санитариялық-гигиеналық нормалармен регламенттелген шекті жол берілетін концентрациялардан аспағаны анықталды. Нәтижелер термиялық өңдеу дайын өнімдегі ластаушы заттардың қайта бөлінуіне және салыстырмалы концентрациясының өзгеруіне елеулі әсер ететінін көрсетті. Қайнату кезінде ауыр металдардың (Pb – 58,6%-ға, Cd – 56,7%-ға, As – 18,2%-ға) және радионуклидтердің белсенділігінің (Cs-137 – 69,8%-ға, Sr-90 – 40,0%-ға) айтарлықтай төмендеуі байқалды, бұл олардың бір бөлігінің сорпаға өтуімен түсіндіріледі. Қуыру ылғалдың жоғалуы мен өнім массасының азаюына байланысты кейбір элементтердің, әсіресе Pb мен Sr-90-ның салыстырмалы концентрациясының артуына алып келді, ал бұқтыру аралық әсер көрсетті. Алынған нәтижелер қой етінің тағамдық қауіпсіздігін бағалау кезінде термиялық өңдеу әдісін ескеру қажеттігін растайды және улы әрі радиоактивті элементтердің тағам арқылы түсуін азайту тұрғысынан қайнату әдісінің ең қолайлы екенін негіздейді.

Түйін сөздер: *қой еті; ауыр металдар; тағамдық қауіпсіздік; термиялық өңдеу; кулинарлық өңдеу.*

З.С. Апсаликова[1], К.Ж. Амирханов[1], С.Л. Гаптар[2], А.М. Байкадамова[1]*
[1]Шәкәрім университет, 071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А
[2]Сибирский государственный университет инженерии и биотехнологий,
630039, Российская Федерация, г. Новосибирск, ул. Добролюбова, 160
*e-mail: a.baikadamova@shakarim.kz

ИССЛЕДОВАНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ТЯЖЁЛЫХ МЕТАЛЛОВ И РАДИОНУКЛИДОВ В МЯСНОМ СЫРЬЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВИДА ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

В статье представлены результаты оценки содержания тяжёлых металлов и радионуклидов в баранине в зависимости от вида термической обработки. Объектом исследования служила мышечная ткань баранины, подвергнутая варке, жарке и тушению в условиях, типичных для кулинарной практики. Концентрации свинца (Pb), кадмия (Cd), мышьяка (As), а также радионуклидов цезия-137 (Cs-137) и стронция-90 (Sr-90) определяли с использованием инструментально-аналитических методов после кислотного разложения проб и радиометрических измерений. Установлено, что исходное содержание токсичных и радиоактивных элементов в сырой баранине не превышало предельно допустимых концентраций, регламентированных санитарно-гигиеническими нормами. Полученные результаты показали, что термическая обработка оказывает существенное влияние на перераспределение и относительную концентрацию контаминантов в готовом продукте. Варка приводила к выраженному снижению содержания тяжёлых металлов (Pb – на 58,6%, Cd – на 56,7%, As – на 18,2%) и активности радионуклидов (Cs-137 – на 69,8%, Sr-90 – на 40,0%) вследствие их частичной миграции в бульон. Жарка обусловливала относительное увеличение концентрации ряда элементов, прежде всего Pb и Sr-90, за счёт потери влаги и уменьшения массы продукта, тогда как тушение характеризовалось промежуточными эффектами. Полученные данные подтверждают необходимость учёта способа термической обработки при оценке пищевой безопасности баранины и обосновывают варку как наиболее предпочтительный метод с точки зрения минимизации поступления токсичных и радиоактивных элементов с пищей.

Ключевые слова: *баранина; тяжелые металлы; пищевая безопасность; термическая обработка; варка.*

Information about the authors

Zukhra Apsalikova – Master of Technical Sciences, Department of Food Technologies, Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: zingatinovazs@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2017-2067.

Kumarbek Amirkhanov – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Food Technologies; Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: aspirant57@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7988-988X.

Svetlana Gaptar – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Technology and Commodity Science of Food Products; Siberian State University of Engineering and Biotechnology, Russia; e-mail: 466485@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7823-6369.

Assemgul Baikadamova* – PhD, Associate Professor of the Department of Food Technologies; Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: asemgul93@yandex.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0062-6997.

Сведения об авторах

Зухра Сансызбаевна Апсаликова – магистр технических наук, кафедра «Пищевые технологии» Шәкәрім университеті, Казахстан; e-mail: zingatinovazs@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2017-2067.

Кумарбек Жунусбекович Амирханов – доктор технических наук, профессор кафедры «Пищевые технологии», Шәкәрім университеті, Республика Казахстан; e-mail: aspirant57@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7988-988X.

Светлана Леонидовна Гаптар – кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой «Технология и товароведение пищевой продукции», Сибирский государственный университет инженерии и биотехнологий, Россия; e-mail: 466485@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7823-6369.

Асемгуль Мадениетовна Байкадамова* – PhD, ассоциированный профессор кафедры «Пищевые технологии», Шәкәрім университеті, Республика Казахстан; e-mail: asemgul93@yandex.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0062-6997.

Авторлар туралы мәліметтер

Зухра Сансызбаевна Апсаликова – техника ғылымдарының магистрі, «Тамақ технологиясы» кафедрасы, Шәкәрім университеті, Қазақстан; e-mail: zingatinovazs@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2017-2067.

Кумарбек Жунусбекович Амирханов – техника ғылымдарының докторы, «Тамақ технологиясы» кафедрасының профессоры, Шәкәрім университеті, Қазақстан; e-mail: aspirant57@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7988-988X.

Светлана Леонидовна Гаптар – техника ғылымдарының кандидаты, доцент, «Тамақ өнімдерінің технологиясы және тауартану» кафедрасының меңгерушісі, Сібір мемлекеттік инженерия және биотехнология университеті, Ресей; e-mail: 466485@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7823-6369.

Асемгуль Мадениетовна Байкадамова* – PhD, «Тамақ технологиясы» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: asemgul93@yandex.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0062-6997.

Received 10.01.2026
Revised 11.02.2026
Accepted 12.02.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-42

ҒТАХР: 65.59.03

CC BY 4.0
Check for updates

Ж.Б. Жуман[1], Н.С. Ханжаров[1], Д.А. Бараненко[2], Б.Т. Абдижаппарова[*]
[1]М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті,
160012, Қазақстан Республикасы, Шымкент қ., Тауке хан даңғылы, 5
[2]ИТМО Университеті,
197101, Ресей Федерациясы, Санкт-Петербург қ., Кронверк даңғылы, 49 үй, литер А
*e-mail: b.abdizhapparova@auezov.edu.kz

ЖЫЛҚЫ ЕТІ ФУНКЦИОНАЛДЫҚ ТАМАҚТАНУДЫҢ КЕЛЕШЕГІ ЗОР КОМПОНЕНТІ РЕТІНДЕ: ҒЫЛЫМИ ШОЛУ

Аңдатпа: *Бұл мақала жылқы етін Орталық Азия халықтарының мәдениетінде құнды және дәстүрлі тағам көзі ретінде қарастырып, оның ерекше тағамдық артықшылықтарын көрсетеді. Мақаланың негізгі мақсаты - жылқы етіне қатысты негізгі зерттеулерді ғылыми тұрғыда шолу жасап, оның перспективалық зерттеу бағыттарын анықтау. Сиыр, шошқа және құс етімен салыстырғанда жылқы етінде май мен холестерин мөлшері 20%-ға төмен, ал қанықпаған май қышқылдары мен темірдің деңгейі жоғары, бұл оны пайдалы балама өнім ретінде қарастыруға мүмкіндік береді. Дегенмен, жылқы еті тағамдық өнім ретінде салыстырмалы түрде шектеулі зерттелген. Өзгермелі климат жағдайында азық-түлік қауіпсіздігін қамтамасыз ету үшін жылқы етін одан әрі зерттеу қажеттілігі негізделген. Мақалада жылқы етін өңдеудің әртүрлі әдістері, соның ішінде ферментация мен термиялық өңдеу, жаңа өнімдерді әзірлеу, сондай-ақ малдың жасы мен сақтау шарттары сияқты факторлардың ет сапасына әсері талқыланады. Сонымен қатар, әртүрлі дәм мен диеталық қажеттіліктерді қанағаттандыра алатын жаңа өнімдерді (шұжықтар, консервілер, жартылай дүмбілдер) әзірлеудің инновациялық тәсілдері қарастырылады. Жылқы етінің технологиялық сипаттамалары зерттеліп, оның тамақ өнеркәсібінде тиімді пайдалану жолдары талқыланады.*

Түйін сөздер: *жылқы еті, өңдеу, физикалық-химиялық көрсеткіштер, функционалды өнім, тағам.*

Кіріспе

Қазіргі таңда жаһандық азық-түлік қауіпсіздігін қамтамасыз ету, халық денсаулығын сақтау және функционалдық тағам өнімдерін дамыту мәселелері өзектілікке ие. Осы контексте баламалы және дәстүрлі емес ет түрлеріне, соның ішінде жылқы етіне деген ғылыми әрі өндірістік қызығушылық артып отыр.

Жылқы етінің тағамдық шикізат көзі ретіндегі Орталық Азия халықтарының мәдениетінде терең тарихи тамырларға ие. Сонымен қатар, жылқы етін болашағы зор азық-түлік өнімі ретінде зерттеу қажеттілігі көптеген ғылыми еңбектерде негізделген [1-9].

Жылқы еті жеңіл сіңімділігімен, толыққанды ақуыздың жоғары мөлшерімен, полиқанықпаған май қышқылдарының болуымен және үйлесімді аминқышқылдық құрамымен ерекшеленеді. Жылқы етін тұрақты тұтыну полиқанықпаған май қышқылдарының тағам рационына түсуіне, сондай-ақ сау адамдарда липидтік профильдің жақсаруына және темір деңгейінің артуына ықпал етуі мүмкін [10].

Жылқы етінің физика-химиялық құрамы мәселелеріне арналған бірқатар зерттеулер жүргізілген [11-18].

Шошқа, сиыр және құс етімен салыстырғанда жылқы етінің құрамында май мен холестерин мөлшері төмен (20%-ға) анықталған [19]. Жылқы етінде қанықпаған май

©Ж.Б. Жуман, Н.С. Ханжаров, Д.А. Бараненко, Б.Т. Абдижаппарова, 2026

қышқылдарының үлесі (55%-дан астам), сондай-ақ темір мөлшері де елеулі деңгейде кездеседі [16, 19]. Жылқы етіндегі ауыстырылмайтын және ауыстырылатын аминқышқылдарының арақатынасы (0,81) оның тағамдық құндылығын қосымша дәлелдейді [20].

Аталған артықшылықтар жылқы етін басқа ет түрлеріне пайдалы балама ретінде қарастыруға мүмкіндік береді [21-23].

Сонымен қатар, жоғары әлеуетіне қарамастан, болашағы зор азық-түлік өнімі ретінде жылқы етінің қасиеттері мен мүмкіндіктерін зерттеуге арналған ғылыми еңбектер жоғарыда көрсетілген ет түрлеріне қатысты зерттеулермен салыстырғанда әлі де шектеулі деңгейде қалып отыр.

Жылқы етінің қасиеттерін зерттеу қажеттілігі бірнеше маңызды факторлармен негізделеді. Біріншіден, жылқы еті ерекше тағамдық бейінге ие: оның құрамында толыққанды ақуыз, темір, В тобы дәрумендері және полиқанықпаған май қышқылдары мол, бұл оны салауатты тамақтану тұрғысынан құнды өнім ретінде сипаттайды. Екіншіден, климаттың өзгеруі және ақуыз көздерін әртараптандыру қажеттілігі жағдайында жылқы еті азық-түлік қауіпсіздігін қамтамасыз етуде маңызды рөл атқара алады.

Жылқы етінен жасалған бұйымдарды әзірлеу болашағы бар бағыт болып табылады. Ет өнеркәсібіндегі инновациялар тұтынушылардың әртүрлі дәмдік талғамдары мен диеталық қажеттіліктерін қанағаттандыра алатын жаңа өнімдерді жасауға мүмкіндік береді. Бұл бағытқа шұжықтар, консервілер, өңделген ет, сондай-ақ қосымша пайдалы қасиеттері бар функционалды тағам өнімдерін әзірлеу кіреді.

Бұл мақаланың мақсаты - жылқы етінің қасиеттерін зерттеуге қатысты негізгі аспектілерді ашып көрсету және осы ет түрінен жаңа өнімдерді әзірлеудің маңыздылығын айқындау. Осы мақсатқа сәйкес мақалада жылқы етінің технологиялық және сенсорлық сипаттамалары қарастырылып, оның тамақ өнеркәсібінде одан әрі зерттеулер мен инновациялар арқылытиімді қолдану әлеуеті талқыланады.

Зерттеу шарттары мен әдістері

Жылқы етін өңдеудегі заманауи үрдістерді талдау мақсатында осы саладағы соңғы жетістіктер мен инновацияларды қамтитын шолу зерттеуі жүргізілді. Зерттеудың негізгі мақсаты жылқы етінің құрамын, технологиялық сипаттамаларын зерделеуге және жаңа өнімдерді әзірлеуге қатысты жарияланымдарды жүйелі түрде талдау болды.

Зерттеу барысында келесі әдістер пайдаланылдыі:

– ғылыми жарияланымдарды талдау - рецензияланған журналдарда, конференциялар жинақтарында және патенттік құжаттамада ұсынылған отандық және шетелдік дереккөздерді қарастыру;

– жылқы етінің сапасына әртүрлі факторлардың әсерін талдау – малдың жасы, тұқымдық ерекшеліктері, ұстау жағдайлары, өңдеу және сақтау әдістері, сондай-ақ органолептикалық және физика-химиялық сипаттамаларына қатысты зерттеулерді жүйелеу;

– өңдеудің инновациялық технологияларын талдау - құрама ет өнімдерін әзірлеуді қоса алғанда, жылқы етінен жаңа өнім түрлерін өндірудің заманауи әдістерін қарастыру.

Әдеби деректерді талдау нәтижесінде жылқы етін зерттеу және қайта өңдеу саласындағы ізденістердің негізгі үрдістері мен перспективалы бағыттары айқындалды.

Зерттеу нәижелері

Зерттеулердің үлкен тобы жылқы етінің әртүрлі бөліктерінің физика-химиялық және аминқышқылдық құрамын, жылқы етінің жетілуі кезіндегі құрылымы мен технологиялық сипаттамаларының өзгеруін, сондай-ақ жылқы жасының және өңдеу әдістерінің еттің сапалық көрсеткіштеріне әсерін зерттеуге арналған.

Бірніші және екінші сұрыпты жылқы етінің әртүрлі бөліктерінің физикалық-химиялық құрамы, май қышқылдарының бейіні және сенсорлық қасиеттері зерттелді. Нәтижелер ет сұрыпының липидтер мен ылғал мөлшеріне, текстуралық сипаттамаларға, сондай-ақ пальмитолеин және стеарин қышқылдарының деңгейіне есеулі әсер ететінің көрсетті. Екінші сұрыпты белдеме етінде басқа бөліктермен салыстырғанда pH мәні төмен екені анықталды [24].

Ересек жылқыдан алынған ұзынша және жартылай сіңірлі бұлшықеттерінің химиялық құрамы мен физика-химиялық қасиеттері салыстырылды. Ұзынша бұлшықет жоғары ылғал ұстау қабілетімен және жоғары энергетикалық құндылығымен сипатталады, алайда жартылай

сіңірлі бұлшықетпен салыстырғанда ондағы су мен ақуыз мөлшерінің төмен екені анықталды [25].

Жылқы етінің технологиялық қасиеттеріне, түсіне, консистенциясына және сенсорлық сипаттамаларына кесілген бөліктің түрі мен жетілдіру (ұстау) кезеңінің әсері зерттелді [26]. Зерттеу үшін 28 айлық жылқылардың белдемше еті, жаурын еті, асық жілік, сан етінің сыртқы бөлігі, филей еті, жаурын бұлшық еті, төс еті және сан етінің жоғарғы бөлігі мен бел омыртқа бөлігі алынды. Нәтижелер әртүрлі ет кесінділерінде ылғал жоғалту, pH деңгейі және түс сипаттамалары бойынша айтарлықтай айырмашылықтар бар екенін көрсетті. Сонымен қатар, жетілдіру кезені кейбір кесінділердің, мысалы, жіліншік етінің текстуралық қасиеттерін, атап айтқанда жұмсақтықты жақсартады. Ең айқын өзгерістер 20-30 күндік жетілдіруден кейін байқалады, әсіресе бел омыртқа бөлігі мен филей кесінділерінде.

Басқа бір зерттеуде 32 айлық Jeju тұқымды жылқыларының (N=9) әртүрлі ет кесінділерінің химиялық құрамы, сапалық және тағамдық сипаттамаларына әсері зерттелді [27]. Сойылғаннан кейін 24 сағат өткен соң ұшалар 10 бөлікке кесілді. Нәтижелер көрсеткендей, ылғал, ақуыз, май және холестерин мөлшері кесінділер арасында айтарлықтай өзгеріп отырды. Әртүрлі кесінділер бойынша химиялық құрамның диапазоны (минималды және максималды мәндері) мынандай болды: ылғалдылық – 65,06-71,69%; ақуыз – 19,07-21,28%; коллаген – 1,40-2,45%; май – 2,56-12,14%; холестерин – 55,76-79,50 мг/100 г. Жаурын бөлігінің суды ұстау қабілеті жоғары болса, ал жоғарғы бөлігінің пісіру кезіндегі шығыны ең көп болған. Сонымен қатар, зерттелген кесінділердің көпшілігі полиқанықпаған (PUFA) және қаныққан май қышқылдары (SFA), омега-3 және омега-6 май қышқылдары, сондай-ақ ауыстырылмайтын және ауыстырылатын амин қышқылдарының қатынасы жағынан қолайлы сипатталды.

Бірқатар зерттеулер жылқы етінің сапасына әсер ететін факторларды, сонын ішінде жануарлардың жасы мен салқындатылған немесе мұздатылған сақтау жағдайларын қарастырған [28-31]. Зерттеулердің негізгі мақсаты – жылқы етінің физика-химиялық, сенсорлық және текстуралық қасиеттерін жақсарту арқылы оның тұтынушылық тартымдылығын арттыру және технологиялық үдерістерді оңтайландыру. Авторлардың нәтижелеріне сүйене отырып, аталған факторлардың жылқы етінің сапасына әсері туралы қорытынды жасауға болады.

Жануарлардың жасы еттегі май мөлшерінің, текстуралық сипаттамалардың (шайнау, қаттылық, жабысқақтық) және түс параметрлерінің қалыптасуында маңызды рөл атқарады. Кәрі жылқылардың еті майлылығы мен қаттылығы жоғары деңгейде болады, бұл оны текстура жағынан азырақ тартымды етеді, дегенмен тағамдық құндылығы жоғары болуы мүмкін. Осылайша, еттің жұмсақтылығы мен шырындылығы сияқты сенсорлық сипаттамалары жылқы жасына және өңдеу жағдайларына айтарлықтай тәуелді.

-22°C температурада мұздату және ұзақ сақтау еттің түсінің қарайуына, гидратациялық қасиеттерінің нашарлауына, текстуралық көрсеткіштердің (қаттылық, шайнау қабілеті, серпімділік) төмендеуіне және қышқылдылықтың артуына әкелді. Сонымен қатар, салқындатылған күйде сақтау еттің сипаттамаларын мұздатуға қарағанда аз өзгертеді, сондықтан қысқа мерзімді сақтау үшін тиімді.

Жылқы етінің сапасы мен қауіпсіздігін қамтамасыз ету мақсатында жаңа сойылған етті салқындату әдісі әзірленді [32]. Вакуумдық қаптамадағы жылқы етінің ішкі температурасы 4°C немесе одан төменге жеткенше салқындатылады, бұл өнімнің мұздатылмай, салқын күйде сақталуын қамтамасыз етеді.

Мұздату технологиясында сұйытылған көмірқышқыл газын қолдану жылқы етін дәстүрлі ауамен салқындату әдісіне қарағанда оның тұтынушылық және экспорттық мақсаттарға жарамдылығын арттыратын тиімді әдіс болып табылады [33].

Әртүрлі бактериалды ашытқылар тотығу арқылы болатын бұзылуды тиімді төмендетіп, салқындатылған жағдайда сақтау кезінде pH өзгерістерін бақылауға мүмкіндік береді. Бромелайнмен өңдеу жылқы етінің жұмсақтығын, ылғал ұстау қабілетін және органолептикалық қасиеттерін айтарлықтай жақсартты, ең елеулі әсер шприцтеу әдісі арқылы байқалды [34].

Сонымен қатар, басқа зерттеулер тобы жылқы етінен жасалған өнімдердің сапасын жақсартуға, жаңа өнім түрлерін әзірлеуге және сақтау мерзімін ұзартуға бағытталған.

Маринадтау үшін қолданылатын заттар – тағамдық қышқылдар (сүт, алма, лимон қышқылы), фосфаттар, кальций және натрий хлоридтері, сондай-ақ олардың комбинациясы – еттің белсенді қышқылдығына, текстурасына және түсіне айтарлықтай әсер етеді [30, 35]:

- сүт қышқылы еттің түсінің ашықтығын арттырғанымен, сенсорлық бағалау көрсеткішін төмендетті;
- алма қышқылы pH деңгейін төмендетіп, еттің қызыл реңкін азайтып, сары түстің күшеюіне себеп болды, бұл әсіресе жас жылқылардың етінде айқын байқалды;
- қышқылдармен бірге қолданылған фосфаттар текстурасы мен ылғалды ұстау қасиеттерін жақсартты;
- кальций хлориді (0,3 М) етті ең көп ағартқанымен, оның ылғалды ұстап тұру қабілетін төмендетті.

Фосфаттар жеке қолданылған жағдайда еттің текстурасы мен түс сипаттамаларын жақсартуда ең төмен әсер көрсетті.

Көп компонентті тұзды ерітінділер еттің ылғал ұстау қабілетін және құрылымдық-механикалық қасиеттерін жақсартты, бұл қой және жылқы етінде байқалды [36]. Механикалық өңдеу сойылғаннан кейінгі алғашқы 24 сағат ішінде ылғал ұстауды қабілетін арттыруда ең үлкен әсер көрсеткен.

Жылқы етінің ылғал ұстау қабілетін ультрадыбыстық өңдеу арқылы да арттыруға болады [37]. Термиялық емес өңдеу әдісі тек текстуралық қасиеттерді, мысалы кесу кернеуін төмендетуді жақсартып қана қоймай, сонымен қатар патогенді микроорганизмдердің мөлшерін азайтты.

Құрамында 10% арабиногалактан бар көп компонентті тұздықты пісірілген жылқы етінен жасалған өнімдерге қолдану олардың функционалдық, технологиялық және дәмдік сипаттамаларын айтарлықтай жақсартты [38]. Зерттеу табиғи полисахаридтерді пайдалану арқылы етті өңдеу және текстурасын жақсартуға байланысты мәселелерді шешуге мүмкіндік беретінін көрсетті. Бұл өз кезегінде жылқы етін азық-түлік өнеркәсібінде кеңінен пайдалануға жол ашады, әсіресе импортты алмастыру жағдайында. Аталған тәсіл өндірістік деңгейде бейімдеуге жарамды және жылқы етін тұтынушылар үшін тартымды етіп, гастрономия саласында жаңа мүмкіндіктер ашады.

Жылқы етінен дайындалған турамаға 15-20% мөлшерінде биотехнологиялық тәсілмен өңделген тауық айдарынан мақта майынан және судан тұратын ақуызды-майлы эмульсияны қосу фарштың реологиялық параметрлерін оңтайлы деңгейге жеткізуге мүмкіндік береді [39]. Сонымен қатар, мұндай мөлшерде ақуыз-май эмульсия қосу өнімнің тағамдық құндылығын төмендетпейді.

Жылқы етінің қаттылығын папаин, бромелайн, пепсин және панкреатин сияқты ферменттермен өңдеу арқылы төмендету ұсынылады [40]. Зерттеулер нәтижесінде аталған ферменттер етінің қаттылығы мен серпімділігін айтарлықтай төмендеткен. Бұл жылқы етінен жұмсақ текстуралы, технологиялық сипаттамалары қанағаттанарлық және алмастырылмайтын май қышқылдарымен байытылған өнімдер өндіруге мүмкіндік береді.

Бір қатар зарттеулерде жылқы еті негізіндегі жартылай дүмбілдерге дегидрокверцетин мен аскорбин қышқылы сияқты антиоксиданттарды қосу олардың сақтау мерзімін айтарлықтай ұзартып, липидтердің тотығу реакцияларының алдын алатыны анықталды [41-43]. Статистикалық әдістер арқылы авторлар антиоксиданттардың оңтайлы концентрациясын анықтады: 0,03% L-аскорбин қышқылы (0,3 г/кг) және 0,03% дегидрокверцетин (0,3 г/кг).

Sous-vide әдісімен өңдеу жылқы етінен жасалған өнімдердің сақтау мерзімін 72 сағатқа ұзартуға мүмкіндік берді, бұл олардың микробиологиялық қауіпсіздігін қамтамасыз ету арқылы жүзеге асты: өңделген үлгілерде микроорганизмдер өсуі 3-5 есеге азайды [44]. Температура мен өңдеу уақытына бақылау жасау жоғары органолептикалық көрсеткіштерге қол жеткізуге мүмкіндік берді. Сондай-ақ, sous-vide әдісімен өңдеу кезінде жылқы етінің текстурасының жақсарғаны байқалды [45].

Жаңа өнімдерді әзірлеу саласындағы зерттеулер жылқы етін басқа ет түрлерімен үйлестіру, сондай-ақ тағам құрамын теңгерімдеу мақсатында өсімдік компоненттерімен байыту бағытында жүргізілуде.

Мысалы, жылқы еті, сиыр еті және тауық филесінің комбинациясы етті чипстерге арналған фарштың оңтайлы құрамын қамтамасыз етеді [46]. Ауалық конвекция әдісі өндіріс уақытын 9 сағатқа дейін қысқартуға мүмкіндік беріп, өнімнің жоғары тағамдық және

биологиялық құндылығын сақтауды қамтамасыз етті. Бастапқы ингредиенттердің минералдық құрамы олардың негізгі макроэлементтер (калий, фосфор, магний, натрий) бойынша шамалас деңгейде екенін көрсетті.

Жылқы еті, құс еті және баклажан негізінде ет-өсімдікті жартылай дүмбілдердің рецептуралары әзірленді [47]. Тәжірибелік үлгілер шикізаттың оңтайлы арақатынасынан айқындап, жоғары органолептикалық бағалауға және дайын өнімнің жоғары шығымына қол жеткізуді қол жеткізуді қамтамасыз етті. Аталған жартылай дүмбілдер жоғары сапасымен және тұрақты технологиялық қасиеттерімен сипатталды.

Жылқы етінен дайындалған котлеттер құрамына 20% мөлшерінде асқабақ қосу өнімді көмірсулармен, кальциймен, сондай-ақ А және С дәрумендерімен айтарлықтай байытатыны анықталды [48].

Жылқы етін өңдеу әдістері оның адам ағзасына сіңірілу дәрежесіне айтарлықтай әсер ететіні анықталды: қуырылған жылқы етінен дайындалған өнімдерді тұтынғанда ауыстырылмайтын аминқышқылдарының сіңірілу коэффициенті 0,81 болса, буға пісірілген өнімдерде бұл көрсеткіш 0,88-ге дейін жетеді [49].

Жоғары сапалы, белгілі бір құрылымдық сипаттамалары бар өнімдер алу мақсатында құрамында ірі ақуыз бөлшектері бар ақуыздық композиция әзірленді, олардың мөлшері жалпы құрамның кемінде 75%-ын құрайды [50]. Ірі бөлшектерге ұзындығы шамамен 4 см талшықтар, 3 см жіпшелер және шамамен 2 см кесінділер жатады. Бұл бөлшектержалпы композиция массасының шамамен 15%-ын құрайды және жоғары кесу беріктігімен (кемінде 1400 г) сипатталады. Аталған өнертабыс осы композицияны өндіру тәсілдерін және оны қайта құрылымдалған ет, көкөніс немесе жеміс негізіндегі өнімдерде қолдану мүмкіндігін қамтиды. Шикізат ретінде ірі қара, шошқа, қой, ешкі етімен қатар, жылқы еті, кит еті және басқа сүтқоректілердің, сондай-ақ құс пен балық еттері пайдаланылуы мүмкін.

Жылқы етінен дайындалған пісірілген шұжықтарды әзірлеу кезінде негізгі шикізат массасының 10-15% мөлшерінде ақуызды-майлы эмульсия енгізіледі. Эмульсия құрамында оның массасының 8-9%-ын құрайтын биологиялық белсенді қоспа қосылады [51]. Бұл тәсіл жылқы етінен жасалған пісірілген шұжықтарды селенмен байытуға, дайын өнім шығымын арттыруға, сондай-ақ олардың функционалдық-технологиялық қасиеттерін жақсартуға мүмкіндік береді. Биологиялық белсенді қоспа бидай дәндерін 0,03-0,04% концентрациядағы натрий селениті ерітіндісінде жібіту, оларды көктеу, өскіндерін бөліп алу және кейін ұнтақтау арқылы алынады.

Ғылыми нәтижелерді талқылау

Жүргізілген зерттеулер жылқы етінің азық-түлік өнімі ретіндегі бірегей артықшылықтарын айқындайды. Физика-химиялық көрсеткіштерді талдау нәтижелері жылқы етінің басқа ет түрлерімен салыстырғанда май мен холестерин мөлшерінің төмен екенін көрсетті, бұл оның пайдалы балама өнім ретіндегі маңызын дәлелдейді. Жылқы етінің әртүрлі анатомиялық бөліктерін зерттеу оның химиялық құрамы мен текстуралық сипаттамалары ет сортына, жануардың жасына және өңдеу тәсілдеріне байланысты елеулі өзгерістерге ұшырайтынын анықтады.

Жылқы етінің әр түрлі анатомиялық бөліктері ылғалды ұстау қабілеті мен пісіру кезіндегі массалық шығындары бойынша да ерекшеленеді. Зерттеу нәтижелері жауырын бөлігінің ылғалды ең жақсы сақтайтынын, ал жоғарғы бөліктің аспаздық өңдеу барысында ең жоғары шығынға ұшырайтынын көрсетті. Етті жетілдіру мерзіміне қатысты деректерді ерекше атап өткен жөн: 20-30 тәулік бойы жетілдіруден кейін текстуралық қасиеттердің жақсаруы байқалады, бұл еттің тұтынушылық сапасын арттыру үшін жетілдіру үдерісін оңтайландырудың тиімділігін дәлелдейді. Сонымен қатар, жылқы жасы май мөлшеріне, текстуралық ерекшеліктеріне және ет түсіне елеулі әсер етеді. Кәрі жылқылардың еті жоғары қаттылығымен және майлылығымен сипатталады.

Мұздату еттің түсіне, гидратациялық қасиеттеріне және текстурасына кері әсер етеді, ал салқындатылған күйде сақтау аталған көрсеткіштерге салыстырмалы түрде аз ықпал етеді.

Маринадтау, фосфаттармен, сондай-ақ кальций және натрий тұздарымен өңдеу сияқты технологиялық тәсілдер еттің түсін, текстурасын және ылғалды ұстау қабілетін жақсартуға мүмкіндік береді. Сүт қышқылын қолдану түсінің ашықтығын арттырғанымен, өнімнің сенсорлық бағасына теріс әсер етуі мүмкін.

Ультрадыбыстық өңдеу және sous-vide сияқты инновациялық технологиялар жылқы етінің дәмдік және текстуралық қасиеттерін айтарлықтай жақсартып, оның сақтау мерзімін

ұлғайтуға мүмкіндік береді. Бұл әдістер өнім сапасын арттырып қана қоймай, жылқы етін тамақ өнеркәсібінде кеңінен қолдануға жағдай жасайды және оны әртүрлі тұтынушы топтары үшін тартымды етеді. Сонымен қатар, жылқы еті өнімдерінің рецептурасына табиғи полисахаридтер мен антиоксиданттарды енгізу олардың тағамдық құндылығын арттырудың және жарамдылық мерзімін ұзартудың тиімді тәсілі болып табылады.

Жылқы етін басқа ингредиенттермен үйлестіре отырып жаңа өнім түрлерін әзірлеу белгілі бір дәрумендер мен минералдарға бай функционалдық тағам өнімдерін жасауға мүмкіндік береді, бұл арнайы диеталық қажеттіліктерді қанағаттандыруға жағдай жасайды.

Ұсынылған зерттеулер жылқы етінің сапасы мен қасиеттеріне әсер ететін көптеген факторлардың бар екенін дәлелдейді және оны тамақ өнеркәсібінде кең ауқымда әрі әртүрлі бағытта тиімді пайдалануға мүмкіндік беретінін көрсетеді.

Қорытынды

Ұсынылған зерттеулердің талдауы жылқы етінің маңызды тағамдық, технологиялық және инновациялық әлеуетке ие екенін көрсетеді, дегенмен, оның зерттеу мен өнеркәсіптік қолдану көлемі мен деңгейін әлі де арттыру қажет.

Біріншіден, жылқы еті құнды қоректік заттармен сипатталады: май мен холестериннің төмендетілген мөлшері, толықққұнды ақуыздың, темірдің және полиқанықпаған май қышқылдарының жоғары деңгейі, сондай-ақ үйлесімді аминқышқылды құрамы.

Екіншіден, жылқы етінің сапасы биологиялық және технологиялық факторларға байланысты айтарлықтай өзгереді. Физика-химиялық, текстуралық және сенсорлық сипаттамларға жануардың жасы, анатомиялық бөлігі, ұстау шарттары мен ұзақтығы, сондай-ақ сақтау жағдайлары айтарлықтай әсер етеді. 20-30 күн ішінде ұстау жеке анатомиялық бөліктердің нәзіктігін жақсартатыны, ал мұздату салқындатуға қарағанда еттің түсін, ылғал ұстау қабілетін және текстурасын нашарлататыны анықталды.

Үшіншіден, заманауи өңдеу әдістері жылқы етінің қасиеттерін қажетті бағытта реттеуге мүмкіндік береді. Органикалық қышқылдармен маринадтау, фосфаттарды, кальций және натрий тұздарын қолдану, ферментативті және ультрадыбыспен өңдеу, көп компонентті тұздықтарды, табиғи полисахаридтерді, ақуыз-май эмульсияларын және антиоксиданттарды қолдану ылғал ұстау қабілетін арттыруға, текстура, түс, реологиялық қасиеттер және сақтау мерзімін ұзартуға ықпал етеді. Sous-vide технологиялары сонымен қатар микробиологиялық қауіпсіздікті және жоғары органолептикалық қасиеттерді қамтамасыз етеді.

Сонымен қатар, жаңа ет, ет-өсімдік және аралас жылқы өнімдерін әзірлеу белсенді дамып келеді. Өсімдік компоненттермен, функционалды қоспалармен байыту және басқа ет өнімдерімен үйлестіру белгілі бір құрылымдық, тағамдық және диеталық сипаттамалары бар өнімдерді өндіруге мүмкіндік береді. Бұл тұтынушылық сегментті кеңейтеді және жылқы етінің өнеркәсіптік тартымдылығын арттырады.

Осылайша, жылқы еті функционалды және жоғары сапалы тамақ өнімдерін өндіру үшін перспективалы шикізат болып табылады. Биологиялық факторларды кешенді ескеру, сақтау жағдайларын оңтайландыру және инновациялық өңдеу технологияларын енгізу тамақ өнеркәсібінде жылқы етін кеңінен пайдаланудың ғылыми және технологиялық негізін жасайды.

Әдебиеттер тізімі

1. Martuzzi F. Characteristics of horse meat consumption and production in Italy / F. Martuzzi, A.L. Catalano, C. Sussi // Annali della Facoltà di Medicina Veterinaria, Università di Parma. – 2001. – Vol. 21. – P. 213-223.
2. Meat Production Potential of Local Horse Breeds: Sustainable Conservation Through Valorization / A. Ivanković et al // Animals. – 2025. – vol. 15(13). – P. 1911. https://doi.org/10.3390/ani15131911.
3. Lušnic Polak M. Nutritional value of horse meat and products on the Slovenian market / M. Lušnic Polak, U. Mervič, L. Demšar // MESO: Prvi hrvatski časopis o mesu. – 2017. – vol. 19(1). – P. 73-81. https://doi.org/10.31727/m.19.1.1.
4. Amir R. Some factors affecting the demand for horse meat / R. Amir, V.S. Lestari, S.N. Sirajuddin // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. – 2020 – Vol. 492. – P. 012140. https://doi.org/10.1088/1755-1315/492/1/012140.
5. Effect of Gender on Meat Quality from Adult Obsolescent Horses / V. Razmaitė et al // Animals. – 2021. – vol. 11(10). – P. 2880. https://doi.org/10.3390/ani11102880.

6. Trombetta M.F. Meat quality and intramuscular fatty acid composition of Catria Horse / M.F. Trombetta, F. Nocelli, M. Pasquin // Animal Science Journal. – 2017. – vol. 88. – P. 1107-1112. https://doi.org/10.1111/asj.12737.
7. Muscle and Subcutaneous Fatty Acid Composition and the Evaluation of Ageing Time on Meat Quality Parameters of Hispano-Bretón Horse Breed / L.R. Beldarrain et al // Animals. – 2021. – vol. 11(5). – P. 1421. https://doi.org/10.3390/ani11051421.
8. Effect of horse meat content on the quality and sensory characteristics of press ham / P.N. Seong et al // Food Science of Animal Resources. – 2008. – vol. 28(1). – P. 9-13.
9. Horse carcass and meat quality – current knowledge and research gaps / N. Čobanović et al // Meat Technology. – 2023. – vol. 64(2). – P. 160-165. https://doi.org/10.18485/meattech.2023.64.2.29.
10. Horse meat consumption affects iron status, lipid profile and fatty acid composition of red blood cells in healthy volunteers / C.D. Bò et al // International Journal of Food Sciences and Nutrition. – 2012. – vol. 64(2). – P. 147-154. https://doi.org/10.3109/09637486.2012.728198.
11. Physicochemical, sensory, functional and microbial characterization of horse meat / G. Arcos-Garcia et al // Rev. Bras. Agrociência. – 2002. – vol. 8. – P. 43-46. file:///C:/Users/Hello/Downloads/420-Article%20Text-714-1-10-20120821-1.pdf (дата обращения: 02.06.2025).
12. Meat quality of “Galician Mountain” foals breed. Effect of sex, slaughter age and livestock production system / D. Franco et al // Meat Sci. – 2011. – vol. 88. – P. 292-298.
13. Breed effect on carcass and meat quality of foals slaughtered at 24 months of age / M. Juárez et al // Meat Sci. – 2009. – vol. 83. – P. 224-228.
14. Lorenzo J.M. Changes in physico-chemical properties and volatile compounds throughout the manufacturing process of dry-cured foal loin / J.M. Lorenzo, J. Carballo // Meat Sci. – 2015. – vol. 99. – P. 44-51.
15. Lorenzo J.M. Influence of type of muscles on nutritional value of foal meat / J.M. Lorenzo, M. Pateiro // Meat Sci. – 2013. – vol. 93. – P. 630-638.
16. Lorenzo J.M. Influence of muscle type on physicochemical and sensory properties of foal meat / J.M. Lorenzo, M. Pateiro, D. Franco // Meat Sci. – 2013. – vol. 94. – P. 77-83.
17. Chemical composition of horse meat / V. Dobranić et al // Meso. – 2009. – vol.9. – P. 62-67.
18. Vanegas Azuero A.M. Carne equina: producción, consumo y valor Nutricional / A.M. Vanegas Azuero, L.F. Gutiérrez // Rev. CES Med. Zootec. – 2016. – Vol. 11(3). – P. 86-103.
19. Carcass characteristics, meat quality and nutritional value of horsemeat: A review / J.M. Lorenzo et al // Meat Sci. – 2014. – vol. 96. – P. 1478-1488.
20. Meat Production Potential of Local Horse Breeds: Sustainable Conservation Through Valorization / A.Ivanković et al // Animals. – 2025. – vol. 15(13). – P. 1911. https://doi.org/10.3390/ani15131911.
21. Horse-meat for human consumption — Current research and future opportunities / X. Belaunzaran et al // Meat Science. – Vol. 108. – 2015. – P. 74-81. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2015.05.006.
22. Balji Y. Perspectives and safety of horsemeat consumption / Y. Balji, M. Knicky, G. Zamaratskaia // International Journal of Food Science and Technology. – 2020. – vol. 55(3). – P. 942-952. https://doi.org/10.1111/ijfs.14390.
23. Čobanović N. Horse carcass and meat quality – current knowledge and research gaps / N. Čobanović et al // Meat Technology. – 2023. – vol. 64(2). – P. 160-165. https://doi.org/10.18485/meattech.2023.64.2.29.
24. Comparison of chemical composition, physico-chemical properties and fatty acid composition of horse meat by different grade and cuts / Jin-Hyung Cheong et al // Journal of Animal Science and Technology. – 2013. – vol. 55(3). – P. 211-217. http://dx.doi.org/10.5187/JAST.2013.55.3.211.
25. Chemical composition and physicochemical properties of horse meat from the longissimus lumborum and semitendinosus muscle / A. Litwińczuk et al // Journal of Muscle Foods. – 2008. – vol. 19(3). – P. 223-236. http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-4573.2008.00117.x.
26. Effect of cut type and post-mortem ageing on the technological quality, textural profile and sensory characteristics of horse meat / Seong Pil Nam et al // Animal Production Science. – 2016. – vol. 56. – P. 1551-1559. https://doi.org/10.1071/AN14545.

27. The differences in chemical composition, physical quality traits and nutritional values of horse meat as affected by various retail cut types / P.N. Seong et al // Asian-Australas J Anim Sci. – 2016. – vol. 29(1). – P. 89-99. https://doi.org/10.5713/ajas.15.0049.
28. Influence of cold and frozen storage on the chemical content, hydration properties and texture parameters of horse meat / R. Stanisławczyk et al // Medycyna Weterynaryjna. – 2019. – vol. 75(4). – P. 242-246.
29. Influence of Horse Age, Marinating Substances, and Frozen Storage on Horse Meat Quality / R. Stanisławczyk et al // Animals. – 2021. – vol.11. – P. 2666. https://doi.org/10.3390/ani11092666.
30. Stanisławczyk R. Changes of sensory properties of horse meat during cold and frozen storage / R. Stanisławczyk // Wiadomości Zootechniczne. – 2018. – vol. 56. – P. 34-41.
31. Stanisławczyk R. Quality characteristics of horse meat as influence by the age of horse / R. Stanisławczyk, M. Rudy, M. Gil, // International Journal of Food Properties. – 2020. – vol. 23(1). – P. 864-877. https://doi.org/10.1080/10942912.2020.1764579).
32. An unfrozen raw horse meat product [Text]: pat. 2636443 Canada: IPC A22C 18/00 (2006.01), A22B 3/00 (2006.01), A22C 17/00 (2006.01), A 22C 17/04 (2006.01), A23B 4/06 (2006.01), A23L 1/31 (2006.01) Tadao Tanaka; zayavitel' i patentoobladatel' Tadao Tanaka, JP. – № CA002636443A; zayavl. 27.06.08; opubl. 27.12.2009. – 37 s.: il. – URL: https://patentimages.storage.googleapis.com/84/74/0e/1ed4b477f2e219/CA2636443A1.pdf (data obrashcheniya: 02.06.2025).
33. Stanisławczyk R. The Quality of Horsemeat and Selected Methods of Improving the Properties of This Raw Material / R. Stanisławczyk, M. Rudy, S. Rudy // Processes. – 2021. – vol. 9(9). – P. 1672. https://doi.org/10.3390/pr9091672.
34. Study on the Combined Effects of Bromelain (Ananas comosus) Enzyme Treatment and Bacteria Cultures on the Physicochemical Properties and Oxidative Stability of Horse Meat / D. Orynbekov et al // Processes. – 2024. – vol. 12(8). – P. 1766. https://doi.org/10.3390/pr12081766.
35. The Effect of Citric Acid, NaCl, and CaCl2 on Qualitative Changes of Horse Meat in Cold Storage / R. Stanisławczyk et al // Processes. – 2020. – vol. 8. – P. 1099. https://doi.org/10.3390/pr8091099.
36. Uzakov YA.M. Issledovanie strukturno-mekhanicheskih svojstv nacional'nyh restrukturirovannyh myasnyh produktov / YA.M. Uzakov, M.A. Kaldarbekova, I.M. CHernuha // Vestnik Almatinskogo tekhnologicheskogo universiteta. – 2019. – № 4. – S. 54-61. (In Russian).
37. Vliyanie ul'trazvuka na kachestvennye pokazateli pishchevogo syr'ya i gotovoj produkcii / D.R. Orynbekov et al // Vestnik Universiteta SHakarima. – 2023. – № 4(12). – S. 101-108. https://doi.org/10.53360/2788-7995-2023-4(12)-14. (In Russian).
38. Influence of the new multicomponent brine on the quality characteristics of the boiled horse meat product / N.I. Gombozhapova et al // Foods and Raw Materials. – 2017. – vol. 5(1). – P.11-19. https://doi.org/10.21179/2308-4057-2017-1-11-19.
39. The effect of technological parameters on functional, technological and physicochemical indicators of horse meat minces with added chicken combs / G. Zhumanova et al // Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences. – 2022. – vol. 16. – P. 545-555. https://doi.org/10.5219/1786.
40. Dah-Sol Kim. Texture Characteristics of Horse Meat for the Elderly Based on the Enzyme Treatment / Dah-Sol Kim, Nami Joo // Food Science of Animal Resources. – 2020. – Vol. 40(1). – P. 74-86. https://doi.org/https://doi.org/10.5851/kosfa.2019.e86.
41. Vyyavlenie ehffektivnosti vozdeistviya rastitel'nykh ehkstraktov v myasnykh produktakh / A.M. Taeva i dr. // Vestnik Almatinskogo tekhnologicheskogo universiteta. – 2022. – № 3. – S. 114-121. https://doi.org/10.48184/2304-568X-2022-3-114-121. (In Russian).
42. Razrabotka tekhnologii myasnykh polufabrikatov s ispol'zovaniem rastitel'nogo syr'ya / N.K. Abil'mazhinova i dr. // Vestnik Universiteta Shakarima. Seriya tekhnicheskie nauki. – 2020. – № 4(92). – S. 112-116. (In Russian).
43. Optimization of the oxidative stability of horse minced meat enriched with dihydroquercetin and vitamin C as a new functional food / N. Abilmazhinova et al // Comptes rendus de l'Académie bulgare des Sciences. – 2020. – vol. 73(7). – P. 1033-1040. https://doi.org/10.7546/CRABS.2020.07.18.
44. Vliyanie tekhnologii sous-vide na mikrobiologicheskie pokazateli myasa / C. Berdigaliuly i dr. // Vestnik Universiteta Shakarima. Seriya tekhnicheskie nauki. – 2020. – № 4(92). – S. 133-136. (In Russian).
45. Meat Subjected to Sous-Vide Cooking: Texture Changes and Sensory Acceptability / R. Stanisławczyk et al // Processes. – 2024. – vol. 12. – P. 1577. https://doi.org/10.3390/pr12081577.

46. Vybor sostava iskhodnogo syr'ya dlya proizvodstva kombinirovannykh myasnykh chipsov / A.A. Kaisarova i dr. // Vestnik Almatinskogo tekhnologicheskogo universiteta. – 2023. – № 2. – S. 20-28.
47. Razrabotka retseptury i tekhnologii myasnykh kombinirovannykh polufabrikatov / L.A. Kaimbaeva i dr. // Vestnik Almatinskogo tekhnologicheskogo universiteta. – 2019. – № 1. – S. 30-35. (In Russian).
48. Enhancing Nutritional Value and Safety in Horse Meat Cutlets with Pumpkin Additives / Y. Abilmazhinov et al // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., 2023. – P. 1242.
49. Results of semi-finished horse meat products research using protein fortifiers after heat treatment / G.T. Zhumanova et al // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – P. 677.
50. Pat. 2430628 Rossiiskaya Federatsiya, MNPK A23J 3/00 (2006.01), A23L 1/317 (2006.01), A23L 1/212 (2006.01). Belkovaya kompozitsiya i ee primenenie v restrukturirovannykh myasnykh, ovoshchnykh i fruktovykh produktakh / Mehtt'yu K. MAKMAINDZ, Ehduardo GODINES, Izumi MYULLER, Mehk ORKATT, Patrika A. ALTEMYULLER; zayavitel' i patentoobladatel' SOLAE, EhLEhLSi (US). № 2008150300/13; zayavl. 17.05.07; opubl. 10.10.11, Byul. № 28. – 38 s. – URL: https://patentimages.storage.googleapis.com/cb/ed/80/4dbad94714417f/RU2430628C2.pdf (data obrashcheniya: 02.06.2025). (In Russian).
51. Pat. 2464790 Rossiiskaya Federatsiya, MPK A22C 11/00 (2006.01), A23L 1/317 (2006.01). Sposob proizvodstva varenykh kolbas iz koniny / Bazhenova B.A., Balykina O.A., Aslaliev A.D., Mikheeva N.M., Danilov M.B.; zayavitel' i patentoobladatel' FGBOU VPO «Vostochno-Sibirskii universitet tekhnologii i upravleniYA». № 2011118436/13; zayavl. 06.05.11; opubl. 27.10.12, Byul. № 30. – 14 s.: il. – URL: https://patentimages.storage.googleapis.com/fc/eb/59/d2013e2d3473fd/RU2464790C1.pdf (data obrashcheniya: 02.06.2025). (In Russian).

Ж.Б. Жуман[1], Н.С. Ханжаров[1], Д.А. Бараненко[2], Б.Т. Абдижаппарова[*]
[1]Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова,
160012, Республика Казахстан, г. Шымкент, проспект Тауке хана, 5
[2]Университет ИТМО,
197101, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, д.49, лит. А
*e-mail: b.abdizhapparova@auezov.edu.kz

КОНИНА КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЙ КОМПОНЕНТ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПИТАНИЯ: НАУЧНЫЙ ОБЗОР

Данная статья рассматривает конину как ценный и традиционный источник пищи в культуре народов Центральной Азии, подчеркивая её уникальные питательные преимущества. Основная цель статьи – провести научный обзор ключевых исследований, посвященных конине, и определить перспективные направления для ее дальнейшего изучения. По сравнению с говядиной, свининой и мясом птицы, конина содержит на 20% меньше жира и холестерина, при этом отличается высоким уровнем ненасыщенных жирных кислот и железа, что позволяет рассматривать ее как полезную альтернативу другим видам мяса. Вмете с тем конина как пищевой продукт остается сравнительно недостаточно изученной. В условиях изменяющегося климата подчеркивается необходимость дальнейших исследований конины для обеспечения продовольственной безопасности. В статье обсуждаются различные методы переработки конины, включая ферментацию и термическую обработку, разработки новых продуктов, а также влияние таких факторов, как возраст животных и условия хранения, на качество мяса. Кроме того, рассматриваются инновационные подходы к созданию новых продуктов (колбасных изделий, консервов, полуфабрикатов), способных удовлетворить разнообразные вкусовые и диетические потребности. Изучаются технологические характеристики конины и пути ее эффективного применения в пищевой промышленности.

Ключевые слова: *конина, переработка, физико-химические показатели, функциональный продукт.*

Zh.B. Zhuman[1], N.S. Khanzharov[1], D.A. Baranenko[2], B.T. Abdizhapparova[*]
[1]M. Auezov South Kazakhstan University,
160012, Republic of Kazakhstan, Shymkent city, Tauke khan avenue, 5
[2]ITMO University, 197101, Russian Federation, Saint Petersburg city, Kronverksky avenue, 49, building A
*e-mail: b.abdizhapparova@auezov.edu.kz

HORSEMEAT AS A PROMISING COMPONENT OF FUNCTIONAL NUTRITION: A SCIENTIFIC REVIEW

The article examines horsemeat as a valuable and traditional food source in the culture of people of Central Asia, highlighting its unique nutritional benefits. The main aim of the article is to provide a scientific review of key research on horsemeat and to identify prospective directions for its further study. Compared to beef, pork and poultry, horsemeat contains 20% less fat and cholesterol, while being rich in unsaturated fatty acids and iron, which allows it to be considered a healthy alternative to other types of meat, At the same time, horsemeat as a food product remains relatively under-researched. In the context of a changing climate, the need for further studies on horsemeat to ensure food security is justified. The article discusses various methods of horsemeat processing, including fermentation and thermal treatment, the development of new products, as well as effects of factors such as animal age and storage conditions on meat quality. In addition, innovative approaches to creating new products (sausages, canned goods, semi-finished products) that can satisfy diverse taste and dietary needs are considered. The technological characteristics of horsemeat ana analyzed, along with ways to use it effectively in the food industry.

Key words: *horse meat, processing, physicochemical indicators, functional product.*

Сведения об авторах

Жансерік Бауыржанұлы Жуман – докторант кафедры «Технология и безопасность продовольственных продуктов», Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова, Республика Казахстан; e-mail: J.Jassik_96@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-4356-2229.

Нурлан Серикбаевич Ханжаров – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология и безопасность продовольственных продуктов», Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова, Республика Казахстан; e-mail: khanzharov_n@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7406-0386.

Денис Александрович Бараненко – кандидат технических наук, доцент, руководитель международного научного центра «Биотехнологии третьего тысячелетия»; Университет ИТМО, Российская Федерация; e-mail: denis.baranenko@itmo.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9284-4379.

Бахыткуль Тельхожаевна Абдижаппарова* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Пищевая инженерия», Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова, Республика Казахстан; e-mail: b.abdizhapparova@auezov.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1600-9275.

Авторлар туралы мәліметтер

Жансерік Бауыржанұлы Жуман – «Технология және тамақ өнімдерінің қауіпсіздігі» кафедрасының докторанты, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: J.Jassik_96@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-4356-2229.

Нурлан Серикбаевич Ханжаров – техника ғылымдарының кандидаты, «Технология және тамақ өнімдерінің қауіпсіздігі» кафедрасының доценті, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: khanzharov_n@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7406-0386.

Денис Александрович Бараненко – техника ғылымдарының кандидаты, доцент, «Үшінші мыңжылдық биотехнологиялары» халықаралық ғылыми орталығының жетекшісі, ИТМО Университеті, Ресей Федерациясы; e-mail: denis.baranenko@itmo.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9284-4379.

Бахыткуль Тельхожаевна Абдижаппарова* – техника ғылымдарының кандидаты, «Тамақ инженериясы» кафедрасының доценті; М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: b.abdizhapparova@auezov.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1600-9275.

Information about the authors

Zhanserik Zhuman – doctoral student of the department «Technology and food safety», M. Auezov South Kazakhstan University, Republic of Kazakhstan; e-mail: J.Jassik_96@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-4356-2229.

Nurlan Khanzharov – Candidate of technical sciences, associated professor of the department «Technology and food safety», M. Auezov South Kazakhstan University, Republic of Kazakhstan; e-mail: khanzharov_n@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7406-0386.

Denis Baranenko – Candidate of technical sciences, associated professor, Head of the international scientific center «Biotechnologies of the Third Millennium», ITMO University, Russian Federation; e-mail: denis.baranenko@itmo.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9284-4379.

Bakhytkul Abdizhapparova* – Candidate of technical sciences, associated professor of the department «Food Engineering», M. Auezov South Kazakhstan University, Republic of Kazakhstan; e-mail: b.abdizhapparova@auezov.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1600-9275.

Редакцияға енуі 05.01.2026
Өңдеуден кейін түсуі 18.02.2026
Жариялауға қабылданды 19.02.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-43

МРНТИ: 65.63.37

BY 4.0
Check for updates

Ф.Х. Смольникова[*], Г.К. Наурзбаева[1], М.Б. Ребезов[2], Б.К. Асенова[1], Э.К. Окусханова[1]
[1]Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки 20 А
[2]Федеральный научный центр пищевых систем имени В.М. Горбатова РАН,
109316, Российская Федерация, г. Москва, ул. Талалихина, 26
[*]e-mail: smolnikovafarida@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА МАСЛООБРАЗОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНЦЕНТРАТА СЫВОРОТОЧНЫХ БЕЛКОВ КСБ-60

Аннотация: *Процесс маслообразования зависит от физического созревания сливок, сбивания сливок, обработки масляного зерна. Для улучшения и интенсификации процесса используются различные методы, это зависит от применения теории сбивания масла сливок и происходящих физических процессах при сбивании. В данной статье было исследовано влияние концентрата сывороточных белков КСБ-60 на процесс сбивания сливок и маслообразование при получении сливочного масла массовой долей жира 82,5%, с целью его интенсификации. Концентрат сывороточных белков вносили в виде сливочного модуля (растворения порошка КСБ-60 в сливках) в соотношении 1:3. При сбивании сливок было предложено вводить КСБ-60 в виде сливочного модуля, вводимого в разных количествах в сбиваемые сливки от 0,5 до 1,5 %. Эксперименты проводили в летний и зимний периоды при различных температурных режимах сбивания. Исследовался процесса маслообразования, содержание жира в пахте, фактический выход масла, степень использования молочного жира, массовую долю влаги, количество вытекаемого жира и термоустойчивость масла. Установлено, что применение КСБ-60 способствует ускорению процесса сбивания, снижению отхода жира в пахту и увеличению степени использования молочного жира по сравнению с контрольными образцами. Наиболее эффективными режимами оказались: в летний период – температура 6-8°С и внесение 1% КСБ-60, в зимний период – температура 10-12°С и внесение 1,5% КСБ-60. Полученные результаты подтверждают целесообразность применения концентрата сывороточного белка КСБ-60 при периодическом способе сбивания сливок для производства сливочного масла жирностью 82,5% с улучшенными показателями качества.*

Ключевые слова: *масло, сбивание, термоустойчивость, вытекаемый жир, пахта.*

Введение

Сливочное масло и молочный жир являются примерами пластичных материалов, для которых текстура играет решающую роль в определении функциональности и потребительской приемлемости [1].

Сливочное масло, маргарин и спреды представляют собой вязкоупругие твердые вещества (т.е. пластичные эмульсии, которые остаются твердыми при комнатной температуре и в основном состоят из воды и масла).

Сливочное масло, маргарин и полножирные смеси должны содержать не менее 80% жира, но не более 90% жирности, максимум 16% воды и 2% сухого обезжиренного молока. С пониженным содержанием жира или на три четверти жирные продукты должны содержать более 41%, но не более 62% жира. Нежирные, легкие или полужирные продукты должны содержать 10-41% жира [2].

Процесс производства сливочного масла в основном включает в себя ряд этапов, направленных на концентрацию молочного жира до 80% и преобразование эмульсии масло-в-воде в эмульсию вода-в-масле, что обеспечивает максимально возможное извлечение молочного жира из масла [3].

Взбивание сливок в масло практикуется уже довольно давно. Все методы взбивания направлены на частичную дестабилизацию границы раздела молочных шариков, тем самым высвобождая жир, который образует непрерывную фазу масла. Введение пузырьков воздуха способствует дестабилизации эмульсии, и большая часть современного оборудования использует непрерывные технологии, основанные на процессе Фрица. Альтернативные

©Ф.Х. Смольникова, Г.К. Наурзбаева, М.Б. Ребезов, Б.К. Асенова, Э.К. Окусханова, 2026

методы включают смешивание безводного молочного жира с сывороткой в скребковых охладителях. В технологическом процессе учитываются как параметры оборудования (конфигурация установок и условия эксплуатации), так и способ добавления второстепенных ингредиентов, а также параметры сливок [4].

Сливочное масло и другие продукты на основе молочного жира являются ценными продуктами для молочной промышленности благодаря своему уникальному вкусу, текстурным характеристикам и питательной ценности. Однако растущий потребительский спрос на продукты с низким содержанием жира увеличивает потребность в более глубоком понимании факторов, определяющих структуру продуктов на основе молочного жира. Сегодня доступны два метода производства: метод взбивания и метод эмульгирования. Первый обычно используется для производства масла с глобулярной структурой, которое становится все более популярным для получения продуктов с низким содержанием жира, как правило, без наличия молочных жировых глобул. Микроструктура продуктов на основе молочного жира тесно связана с их структурной реологией, а следовательно, и с областями применения. Структурное поведение определяется не одним единственным параметром, а взаимодействием многих из них. Эта сложность рассматривается здесь. Такие параметры, как термическая обработка сливок перед производством масла, содержание воды и химический состав, влияют не только на полиморфизм кристаллов, но и на количество и размеры жировых кристаллов. Количество взаимодействий между кристаллами, образующихся в продуктах, связано с твёрдостью продукта [5].

Одним из этапов производства масла является взбивание, при котором сливки, представляющие собой эмульсию типа «масло в воде», подвергаются фазовой инверсии. Во время взбивания образуются пузырьки воздуха, окружённые белковой плёнкой. Поскольку во время взбивания применяется непрерывное сдвиговое воздействие, жировые шарики молока схлопываются, позволяя жидкому жиру окружить пузырьки воздуха. В определённый момент пузырьки воздуха начинают сливаться, и образуются более крупные агрегаты жира, также называемые масляными зёрнами, окружённые пахтой. Температура взбивания обычно находится в диапазоне 10-15°C. Было отмечено, что температура взбивания выше 13°C приводит к относительно большому количеству жидкого жира, что ограничивает возможность включения большого количества воды в масляную матрицу. Кроме того, при высоких температурах взбивания больше жира теряется в пахте. Высокая температура вызывает частичное плавление жира, тем самым увеличивая процент жидкого жира. В жидком состоянии жир не включается в масляные зерна и затем выводится с пахтой [6].

Проведённые ранее теоретические и практические исследования (Han, J., Zhou, X., 2018) позволили сделать предположение, что процесс сбивания находится в прямой зависимости от пенообразования сливок, чем лучше пенообразование, тем интенсивнее процесс маслообразования [7]. Таким образом, регулируя данный процесс можно повысить качество масла, уменьшить отход жира в пахту, повлиять на консистенцию масла и показатели качества готовой продукции.

В данном исследовании будет рассматриваться возможность применения концентрата сывороточного белка КСБ- 60 для улучшения качества сладкосливочного масла жирностью 82,5%, интенсификации процесса маслообразования методом сбивания сливок.

Условия и методы исследования

Отбор проб масла осуществляли по ГОСТ 26809.2-2014. Прежде чем брать образцы, оценивают состояние тары и убеждаются в равномерности состава каждой партии товара. Если содержимое нескольких партий было перемешано, продукт разделяют на отдельные группы с похожими характеристиками.

Для оценки химического и физического качества продукции берут точечные, объединённые и лабораторные пробы. Отобранные образцы упаковывают в подходящие контейнеры – стеклянные, керамические, металлические или пластиковые – которые не искажают результаты исследований и оберегают образец от внешних факторов, плотно закрывая их. Для независимой проверки составленную единую пробу делят надвое. Из одной части весом от 500 грамм делают лабораторные исследования. Другую часть хранят в оригинальной упаковке, соблюдая условия хранения, рекомендованные для этого продукта, чтобы использовать её для повторного анализа в случае несоответствия результатов первоначальных тестов хотя бы по одному параметру [8].

Термоустойчивость определялась по методике ГОСТ 32261-2013 [9].

Показатель термоустойчивости рассчитывали по формуле 1:

$$Кт = \frac{Д0}{Д1}, \qquad (1)$$

Д0 – начальный диаметр пробы, 20 мм;

Дк– диаметр основания пробы после ее термостатирования, мм.

Показания исследований – хорошая термоустойчивость – 1,00-0,86; удовлетворительная термоустойчивость – 0,85-0,70; неудовлетворительная термоустойчивость – менее 0,70.

Для определения вытекания свободного жидкого жира из сливочного масла использовали специальную методику [10].

Количество вытекшего жира в (%) рассчитывали по формуле:

$$Мвж = \frac{(c-a)\times 100}{(b-a)}, \ (4)$$

где

a – масса чашки Петри с фильтровальной бумагой;

b – масса чашки Петри с фильтровальной бумагой и кубиком масла;

c – масса чашки Петри с пропитанной жиром фильтровальной бумагой.

Органолептические исследования масла осуществляли по ГОСТ 33632–2015 [111].

Сбивание сливок осуществляли на аппарате МБ-01 «ФЕРМЕР», (г. Новосибирск, Россия), частота вращения мешалки 70 об/мин.

Результаты исследования

В молочной промышленности широко применяются концентраты сывороточных белков. В данном исследовании была рассмотрена возможность применения концентрата сывороточных белков для улучшения процесса сбивания и интенсификации процесса. Для проведения данного исследования был выбран концентрат сывороточного белка КСБ-60 в качестве технологической добавки для улучшения процесса сбивания сливок 35% жирности.

Ранее были проведены исследования учеными (Ghorbani-HasanSaraei A., Rafe A., 2019) [12], которые применяли концентрат рисового протеина для сбивания сливок в количестве 1-3 %, в данном исследовании было принято решение вводить КСБ-60 в виде сливочного модуля в сбиваемые сливки в количестве от 0,5 до 1,5 %, составы сливочных модулей приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Состав сливочного модуля с КСБ-60

Наименование	Модуль 1 (0,5% КСБ-60) от массы сливок	Модуль 2 (1 % КСБ-60) от массы сливок	Модуль 3 (1, 5 % КСБ-60) от массы сливок
Соотношение КСБ-60 : сливки 35 %	1:3	1:3	1:3
Модуль: Сливки 35 %, кг КСБ-60, кг	 1,5 0,5	 3 1	 4,5 1,5
Сливки 35 %, кг	98	96	94
Итого, кг	100	100	100

На рисунке 1 представлена схема для изготовления сливочного модуля с КСБ-60.



Рисунок 1 – Приготовление сливочного модуля с КСБ-60

Для исследования процесса маслообразования при сбивании сливок с КСБ-60 было выбрано несколько температурных режимов сбивания, данные приведены в таблице 2.

Таблица 2 –Температурные режимы сбивания сливок в производстве сливочного масла

Летний период			Зимний период		
Температура сбивания	Количество КСБ-60, %	Номер опытного образца	Температура сбивания	Количество КСБ-60 от массы сливок %	Номер опытного образца
6+8°С	0,5	Опыт 1	10-12°С	0,5	Опыт 7
	1	Опыт 2		1	Опыт 8
	1,5	Опыт 3		1,5	Опыт 9
	-	Контроль 1		-	Контроль 3
10-12°С	0,5	Опыт 4	12-14°С	0,5	Опыт 10
	1	Опыт 5		1	Опыт 11
	1,5	Опыт 6		1,5	Опыт 12
	-	Контроль 2		-	Контроль 4

Было исследовано время сбивания сливок 35 % жирности в летний и зимний периоды данные приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Время сбивания сливок с КСБ-60 (летний и зимний период)

Температура сбивания	Опытные образцы	Начальная точка маслообразования, мин	Конечная точка маслообразования, мин
Летний период			
6-8°С	Опыт 1	27±0,01	33±0,01
	Опыт 2	23±0,02	30±0,02
	Опыт 3	25±0,02	32±0,01
	Контроль 1	29±0,01	39±0,01
10-12°С	Опыт 4	29±0,01	37±0,01
	Опыт 5	27±0,01	35±0,01
	Опыт 6	28±0,01	37±0,01
	Контроль 2	30±0,01	41±0,01
Зимний период			
10-12°С	Опыт 7	28±0,01	34±0,01
	Опыт 8	25±0,02	32±0,01
	Опыт 9	26±0,02	32±0,02
	Контроль 3	29±0,01	38±0,01
12-14°С	Опыт 10	29±0,01	36±0,01
	Опыт 11	27±0,01	35±0,01
	Опыт 12	26±0,01	33±0,01
	Контроль4	30±0,01	40±0,01

Полученные исследования показали, что процесс маслообразования в летний период происходил более интенсивно с использованием 1 % КСБ-60 при температуре 6-8 °С и составил 30 минут. В зимний период процесс маслообразования прошел более интенсивнее и быстрее при температуре 10–12 °С с внесением 1,5 % КСБ-60 и составил 32 минуты (Опыт 9).

Обсуждение научных результатов

Степень использования молочного жира в летний период представлено на диаграмме рисунка 2.

Чем меньше содержание жира в пахте, тем выше степень использования молочного жира сливок. В летний период наибольшее значение было при внесении 1% КСБ-60 при температуре 6-8°С и составило 99,29%, у контрольного образца 99,16%.

Степень использования молочного жира в зимний период представлено на диаграмме рисунка 3.

Максимальные показатели степени использования молочного жира в зимний период были при температуре 10-12°С при использовании 1,5% пенообразователя КСБ-60 и составило 99,28% – рисунок 3 А, в контрольном образце при этой температуре степень использования молочного жира составила 99,16%.

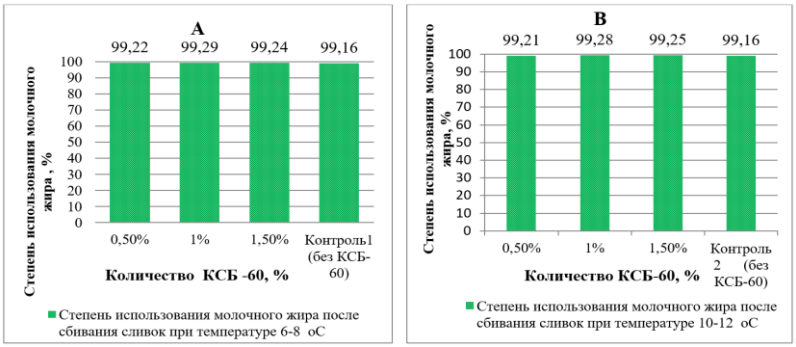


Рисунок 2 – Степень использования молочного жира при сбивании сливок в летний период
А – при температуре 6-8ºС; В – при температуре 10-12ºС

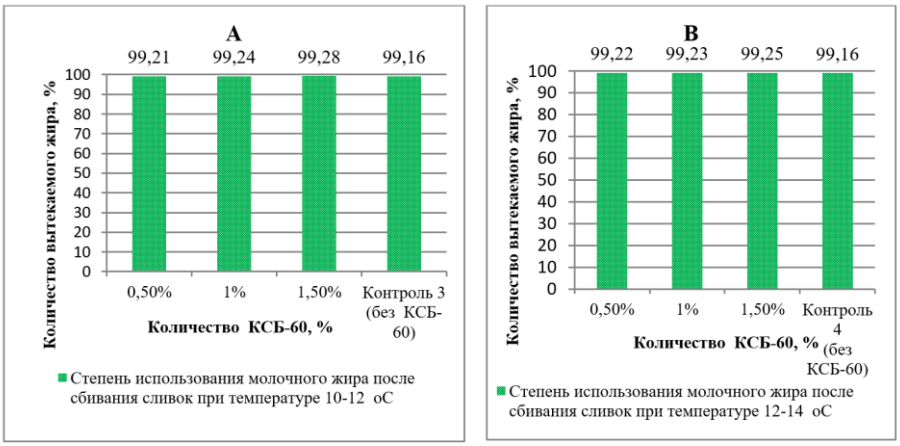


Рисунок 3 – Степень использования молочного жира при сбивании сливок в зимний период
А – при температуре 10-12ºС; В – при температуре 12-14ºС

В опытных образцах масла был проведён анализ на количество вытекаемого жидкого жира согласно методике В. Моора [9].

Исследовали количество вытекаемого жира в масле после сбивания сливок в зимний и летний периоды (табл. 4, 5).

Таблица 4 – Количество вытекаемого жира из сливочного масла в летний период, %

Опытный образец	Количество КСБ-60, %	Температурный режим	
		Температура 6-8ºС	Температура 10-12ºС
Опыт 1	0,5	5,1	5,3
Опыт 2	1	5,0	5,2
Опыт 3	1,5	5,3	5,5
Контроль без КСБ -60	-	6,0	6,2

Удовлетворительные показатели (наименьшее значение) было при температуре 6-8ºС, количество пенообразователя КСБ-60 – 1%.

В таблице 5 приведено количество вытекаемого жира в зимний период.

Таблица 5 – Количество вытекаемого жира из сливочного масла в зимний период %

Опытный образец	Количество КСБ-60, %	Температурный режим	
		Температура 6-8ºС	Температура 10-12ºС
Опыт 1	0,5	5,3	5,4
Опыт 2	1	5,2	5,3
Опыт 3	1,5	5,1	5,2
Контроль без КСБ -60	-	6,1	6,4

Наименьшее количество жира вытекло при использовании 1,5% КСБ-60 при температуре сбивания 10-12ºС и составило 5,1%.

После сбивания образцы масла были исследованы на термоустойчивость.

На диаграмме рисунка 4 представлена термоустойчивость сливочного масла, полученного в летний период.

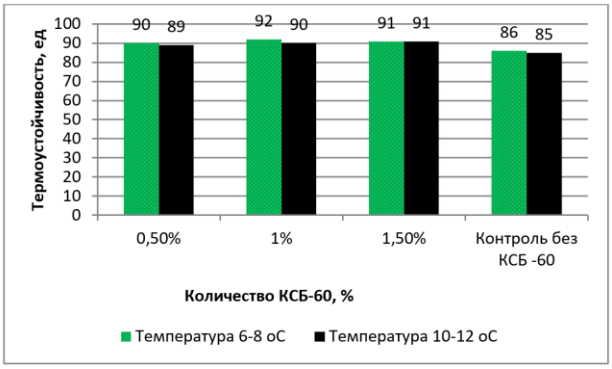


Рисунок 4 – Термоустойчивость сливочного масла, полученного после сбивания сливок в летний период

Высокая термоустойчивость с использованием КСБ-60 – 1% при температуре 6-8°С, составила 92.

На диаграмме рисунка 5 представлена термоустойчивость масла после сбивания в зимний период.

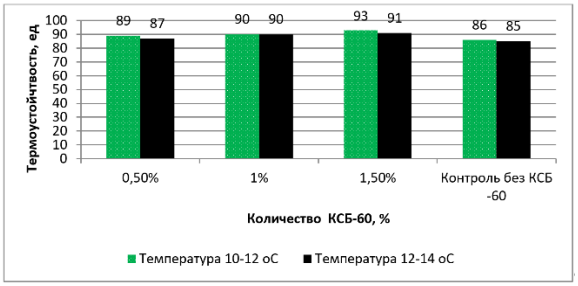


Рисунок 5 – Термоустойчивость масла, полученного после сбивания сливок в зимний период

Анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что наилучшая термоустойчивость была достигнута при температуре 10-12 °С и составила 93 при использовании 1,5 % пенообразователя КСБ-60.

Заключение

Анализ результатов указывает на перспективность применения концентрата сывороточных белков КСБ-60 при производстве масла методом периодического сбивания с целью достижения жирности продукта 82,5 %.

В связи с этим предлагаются оптимальные параметры обработки сливок содержащих 35% жира: для летнего периода рекомендуется температура 6-8°С, продолжительность процесса – 30 минут, расход сливочного модуля КСБ-60 – 1% от веса сливок; в холодное время года – температура 10-12 °С, длительность – 32 минуты, доля сливочного модуля КСБ-60 – 1,5 % от массы исходного сырья.

Применение КСБ-60 позволяет уменьшить потерю молочного жира, улучшить устойчивость готового масла к нагреву, увеличить эффективность извлечения жира во время сбивания, сократить время сбивания.

Список литературы

1. Rheological properties of milkfat and butter / A.J. Wright et al // Journal of food science. – 2001. – Т. 66. – № 8. – P. 1056-1071.
2. Keogh M.K. Chemistry and technology of butter and milk fat spreads / M.K. Keogh // Advanced dairy chemistry volume 2 lipids. – Boston, MA: Springer US, 2006. – P. 333-363.
3. Patel A.A. Butter and fat spreads: Manufacture and quality assurance / A.A. Patel, P. Sharma, H. Patel // Dairy Processing and Quality Assurance. – 2015. – P. 266-286.

4. Keogh M.K. Chemistry and technology of butter and milk fat spreads / M.K. Keogh // Advanced dairy chemistry volume 2 lipids. – Boston, MA: Springer US, 2006. – P. 333-363.
5. Ronholt S. The effective factors on the structure of butter and other milk fat-based products / S. Ronholt, K. Mortensen, J.C. Knudsen // Comprehensive reviews in Food science and Food safety. – 2013. – Т. 12, № 5. – P. 468-482.
6. The effect of whipping temperature on the water content, rheology, microstructure and stability of butter during four weeks of storage / S. Renholt et al // The structure of food products. – 2014. – Т. 2, № 1-2. – P. 14-26.
7. Microstructural evolution of whipped cream in whipping process observed by confocal laser scanning microscopy / J. Han et al // International Journal of Food Properties. – 2018. – V.21(1). – P. 593-605.
8. ГОСТ 26809.2-2014 Молоко и молочная продукция. Правила приемки, отбор проб и подготовка их к анализу. Часть 2. Масло из коровьего молока, спреды, сыры и сырные продукты, плавленые сыры и плавленые сырные продукты. Введ.01.01.2016 – М.: Стандартинформ, 2019. – 17 с.
9. ГОСТ 32261-2013 Масло сливочное Технические условия (с Поправками). Введ.01.07.2015. – М.: Стандартинформ, 2019. – 23 с.
10. Стандартизация и экспертиза молока и молочных продуктов: метод. рекомендации к выполнению практических работ / сост. О.А. Огнева, Н.Н. Забашта. – Краснодар: КубГАУ. – 2020. – 84 с.
11. ГОСТ 33632-2015 Молочный жир, масло и паста масляная из коровьего молока. Методы контроля органолептических показателей. Введ. 01.07.2016 – М.: Стандартинформ, 2016. – 16 с.
12. Ghorbani-Hasan Saraei A. Microstructure and chemorheological behavior of whipped cream as affected by rice bran protein addition / A. Ghorbani-Hasan Saraei, A. Rafe, S-A. Shahidi, A. Atashzar // Food Sci Nutr. – 2019. – V.7. – P.875-881.

References

1. Rheological properties of milkfat and butter / A.J. Wright et al //Journal of food science. – 2001. – Т. 66. – № 8. – R. 1056-1071. (In English).
2. Keogh M.K. Chemistry and technology of butter and milk fat spreads / M.K. Keogh // Advanced dairy chemistry volume 2 lipids. – Boston, MA: Springer US, 2006. – R. 333-363. (In English).
3. Patel A.A. Butter and fat spreads: Manufacture and quality assurance / A.A. Patel, P. Sharma, H. Patel //Dairy Processing and Quality Assurance. – 2015. – R. 266-286. (In English).
4. Keogh M.K. Chemistry and technology of butter and milk fat spreads / M.K. Keogh // Advanced dairy chemistry volume 2 lipids. – Boston, MA: Springer US, 2006. – R. 333-363. (In English).
5. Ronholt S. The effective factors on the structure of butter and other milk fat-based products / S. Ronholt, K. Mortensen, J.C. Knudsen // Comprehensive reviews in Food science and Food safety. – 2013. – Т. 12, № 5. – R. 468-482. (In English).
6. The effect of whipping temperature on the water content, rheology, microstructure and stability of butter during four weeks of storage / S. Renholt et al // The structure of food products. – 2014. – Т. 2, № 1-2. – R. 14-26. (In English).
7. Microstructural evolution of whipped cream in whipping process observed by confocal laser scanning microscopy / J. Han et al // International Journal of Food Properties. – 2018. – V.21(1). – P. 593-605. (In English).
8. GOST 26809.2-2014 Moloko i molochnaya produktsiya. Pravila priemki, otbor prob i podgotovka ikh k analizu. Chast' 2. Maslo iz korov'ego moloka, spredy, syry i syrnye produkty, plavlenye syry i plavlenye syrnye produkty. Vved.01.01.2016 – M.: Standartinform, 2019. – 17 s. (In Russian).
9. GOST 32261-2013 Maslo slivochnoe Tekhnicheskie usloviya (s Popravkami). Vved.01.07.2015. – M.: Standartinform, 2019. – 23 s. (In Russian).
10. Standartizatsiya i ehkspertiza moloka i molochnykh produktov: metod. rekomendatsii k vypolneniyu prakticheskikh rabot / sost. O.A. Ogneva, N.N. Zabashta. – Krasnodar: KuBGAU. – 2020. – 84 s. (In Russian).
11. GOST 33632-2015 Molochnyi zhir, maslo i pasta maslyanaya iz korov'ego moloka. Metody kontrolya organolepticheskikh pokazatelei. Vved. 01.07.2016 – M.: Standartinform, 2016. – 16 s. (In Russian).

12. Ghorbani-Hasan Saraei A. Microstructure and chemorheological behavior of whipped cream as affected by rice bran protein addition / A. Ghorbani-Hasan Saraei, A. Rafe, S-A. Shahidi, A. Atashzar // Food Sci Nutr. – 2019. – V.7. – R.875-881. (In English).

Ф.Х. Смольникова*, Г.К. Наурзбаева[1], М.Б. Ребезов[2], Б.К. Асенова[1], Э.К. Окусханова[1]
[1]Шәкәрім университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинки к-сі, 20 А
[2]РҒА В.М. Горбатов атындағы Тамақ жүйелері федералдық ғылыми орталығы,
109316, Ресей Федерациясы, Мәскеу қ., Талалихин к-сі, 26
*e-mail: smolnikovafarida@mail.ru

КСБ-60 САРЫСУ АҚУЫЗДАРЫ КОНЦЕНТРАТЫН ҚОЛДАНУ АРҚЫЛЫ МАЙ ТҮЗІЛУ ПРОЦЕСІН ЗЕРТТЕУ

Май түзілу процесі кілегейді физикалық жетілдіруге, кілегейді шайқауға және май дәнін өңдеуге байланысты. Процесті жақсарту және қарқындату үшін әртүрлі әдістер қолданылады, бұл кілегей майын шайқау теориясын және шайқау кезінде жүретін физикалық процестерді қолдануға тәуелді. Бұл мақалада майлылығы 82,5% сары май өндіру кезінде кілегейді шайқау және май түзілу процесін қарқындату мақсатында КСБ-60 сарысу ақуыздары концентратының әсері зерттелді. Сарысу ақуыздарының концентраты кілегей модулі түрінде (КСБ-60 ұнтағын кілегейде еріту) 1:3 қатынасында енгізілді. Кілегейді шайқау барысында КСБ-60-ты шайқалатын кілегейге 0,5-тен 1,5 %-ға дейін әртүрлі мөлшерде енгізілетін кілегей модулі түрінде қосу ұсынылды. Тәжірибелер жазғы және қысқы кезеңдерде, шайқаудың әртүрлі температуралық режимдерінде жүргізілді. Май түзілу процесі, майдың пахтадағы майлылығы, майдың нақты шығымы, сүт майын пайдалану дәрежесі, ылғалдың массалық үлесі, ағып шығатын май мөлшері және майдың термотұрақтылығы зерттелді. КСБ-60 қолдану шайқау процесін жеделдететіні, пахтаға кететін май шығынын азайтатыны және бақылау үлгілерімен салыстырғанда сүт майын пайдалану дәрежесін арттыратыны анықталды. Ең тиімді режимдер: жазғы кезеңде – температура 6-8°С және 1% КСБ-60 енгізу, қысқы кезеңде – температура 10-12°С және 1,5% КСБ-60 енгізу. Алынған нәтижелер майлылығы 82,5% сары май өндіруде кілегейді кезеңдік тәсілмен шайқау кезінде КСБ-60 сарысу ақуыздары концентратын қолданудың мақсатқа сай екенін және өнім сапасының көрсеткіштері жақсаратынын растайды.

Түйін сөздер: *май, шайқау, термотұрақтылық, ағып шығатын май, пахта.*

F.H. Smolnikova*, G.K. Naurzbaeva[1], M.B. Rebezov[2], B.K. Assenova[1], E.K. Okuskhanova[1]
[1]Shakarim University,
071412, Republic of Kazakhstan, Semey, 20A Glinka St.
[2]V.M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of the Russian Academy of Sciences,
109316, Russian Federation, Moscow, Talalikhina Street, 26
*e-mail: smolnikovafarida@mail.ru

STUDY OF THE BUTTER FORMATION PROCESS USING WHEY PROTEIN CONCENTRATE WPC-60

The butter formation process depends on the physical ripening of cream, cream churning, and butter grain processing. Various methods are used to improve and intensify this process, depending on the application of the theory of cream butter churning and the physical processes occurring during churning. This paper investigates the effect of whey protein concentrate WPC-60 on the cream churning and butter formation process in the production of butter with a fat content of 82.5%, with the aim of intensifying the process. The whey protein concentrate was added in the form of a cream module (dissolving WPC-60 powder in cream) at a ratio of 1:3. During cream churning, it was proposed to add WPC-60 in the form of a cream module introduced into the churned cream in amounts ranging from 0.5 to 1.5%. Experiments were carried out during summer and winter periods under different churning temperature regimes. The butter formation process, fat content in buttermilk, actual butter yield, degree of milk fat utilization, moisture mass fraction, amount of free (leaking) fat, and butter thermal stability were studied. It was found that the use of WPC-60 contributes to accelerating the churning process, reducing fat losses into buttermilk, and increasing the degree of milk fat utilization compared to control samples. The most effective regimes were: in the summer period – temperature of 6-8°C with the addition of 1% WPC-60; in the winter period – temperature of 10-12°C with the addition of 1.5% WPC-60. The obtained results confirm the feasibility of using whey protein concentrate WPC-60 in the batch churning method for the production of butter with a fat content of 82.5% and improved quality indicators.

Key words: butter, churning, thermal stability, free fat, buttermilk.

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.

Гульмира Каиргалиевна Наурзбаева–докторант кафедры «Пищевые технологии»; Шәкәрім университет, Казахстан, Казахстан; e-mail: gumnur @mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2653-226X.

Макисим Борисович Ребезов– доктор с/х наук, профессор Федерального научного центра пищевых систем имени В.М. Горбатова Российской Академии Наук, Россия; e-mail: rebezov@yandex.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0857-5143.

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, и.о. ассоциированного профессора кафедры «Пищевые технологии», Шәкәрім университет, Казахстан; e-mail: eleonoraokushan@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5139-9291.

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.

Гульмира Каиргалиқызы Наурзбаева – «Тамақ технологиясы» кафедрасының докторантты, Шәкәрім университеті, Қазақстан; e-mail: gumnur @mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2653-226X.

Макисим Борисұлы Ребезов – В.М. Горбатов атындағы Ресей Ғылым Академиясының Азық-түлік жүйелері жөніндегі федералды ғылыми орталығының ауылшаруашылық ғылымдарының докторы, профессор, Ресей; e-mail: rebezov@yandex.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0857-5143.

Бахыткуль Кажженқызы 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.

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.

Gulmira Naurzbayeva – Senior Lecturer at the of the Department of Food Technology; Shakarim University, Kazakhstan; e-mail: gumnur@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2653-226X.

Makisim Rebezov – Doctor of Agricultural Sciences, Professor of the V.M. Gorbatov Federal Scientific Center for Food Systems of the Russian Academy of Sciences, Russia; e-mail: rebezov@yandex.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0857-5143.

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, Kazakhstan; e-mail: eleonora-okushan@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5139-9291.

Поступила в редакцию 05.01.2026
Поступила после доработки 12.02.2026
Принята к публикации 13.02.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-44

IRSTI: 65.51.29

BY 4.0
Check for updates

Zh. Shadyarova[1]*, D. Kurmangaliyeva[1], A. Daribayeva[1], N. Sarsembayeva[2], S. Toleubekova[3]
[1]S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University,
010011, Republic of Kazakhstan, Astana city, Zhenis Avenue, 62
[2]Kazakh National Agrarian Research University,
050010, Republic of Kazakhstan, Almaty city Avenue Abay, 8,
[3]Shakarim University,
071412, Republic of Kazakhstan, Semey city, Glinka street, 20A
*e-mail: zhazirashadyarova@gmail.com

FERMENTED TILAPIA FISH PATTIES: A MULTILEVEL BIOTECHNOLOGICAL, SPECTROSCOPIC, AND MICROSTRUCTURAL ANALYSIS

Abstract: *This study presents the development and scientific substantiation of an innovative biotechnology for the production of fermented fish patties based on Nile tilapia (*Tilapia nilotica*) enriched with shrimp homogenate and a multistrain microbial culture including* Streptococcus cremoris*,* Streptococcus faecalis *var.* liquefaciens*,* Lactobacillus fermentum*, and the probiotic strain* Escherichia coli *64G. The research involved comprehensive evaluation of structural, rheological, spectral, and microbiological characteristics using texture profile analysis (TPA), Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), scanning electron microscopy (SEM), and statistical analysis (ANOVA). Fermentation induced intensive proteolysis and restructuring of the protein matrix, resulting in a 27-34% reduction in hardness, increased cohesiveness and elasticity, and a 12-18% increase in water-holding capacity. FTIR analysis revealed redistribution of protein secondary structures, while SEM visualization confirmed the formation of a dense and homogeneous gel network with reduced porosity. Microbiological assessment demonstrated a 1.5-2.0 log reduction in total viable counts and suppression of yeast and mold microflora, confirming a natural biopreservative effect and extended shelf life. Sensory evaluation showed improved juiciness, texture, and overall acceptability. The developed technology demonstrates high scalability and strong potential for industrial implementation in functional and gerodietetic food production.*

Key words: *fermented fish products, Nile tilapia (Tilapia nilotica), shrimp homogenate, multistrain starter culture; proteolysis, texture profile analysis (TPA), microbiological stability*.

Introduction

Nile tilapia (*Tilapia nilotica*) is one of the most rapidly developing species in global aquaculture due to its high nutritional value, balanced amino acid composition, and fast growth rate, making it a promising raw material for functional food products [1-3]. Tilapia muscle tissue is characterized by a soft texture, low lipid content, and a high level of easily digestible protein, which is particularly important for the development of gerodietetic food products [4].

However, conventional technologies for producing fish-based semi-finished products face several limitations, including low water-holding capacity, loose or structurally unstable protein gels, insufficient development of aromatic characteristics, and high susceptibility to microbial spoilage [5-7]. The application of fermentation in fish processing is regarded as a modern biotechnological approach that improves rheological behavior, textural properties, and flavor formation through the activation of proteolysis and the generation of functional metabolites [8-10].

Additional biotechnological potential is associated with the use of shrimp homogenate as a source of endogenous proteases, minerals, and biologically active peptides capable of enhancing hydration properties and promoting the formation of a more stable protein matrix [11-13]. Simultaneously, the incorporation of a multistrain microbial composition, including lactococci, lactobacilli, and the probiotic strain *Escherichia coli 64G*, enables controlled fermentation, natural biopreservation, and the development of a characteristic aromatic profile without the use of artificial preservatives [14-16].

Thus, the integration of shrimp homogenate and functional bacterial cultures into the fermentation process of fish mince represents a promising biotechnological strategy for improving the structural, sensory, and microbiological characteristics of tilapia-based semi-finished products. The evaluation of the effectiveness of this technology requires a comprehensive analytical approach, including texture profile analysis (TPA), FTIR spectroscopy, scanning electron microscopy (SEM), microbiological

©Zh. Shadyarova, D. Kurmangaliyeva, A. Daribayeva, N. Sarsembayeva, S. Toleubekova, 2026

monitoring, as well as correlation analysis and analysis of variance (ANOVA) for statistical validation of the obtained results.

Materials and methods

Tilapia fillets (Tilapia nilotica) obtained from certified producers and subjected to preliminary sanitary and hygienic inspection were used as the primary raw material. Fresh shrimp from the family Caridea were utilized to prepare a homogenate serving as a source of endogenous proteases and biologically active compounds. In addition, a multistrain microbial culture was applied, comprising Streptococcus cremoris, Streptococcus faecalis var. liquefaciens, Lactobacillus fermentum, and the probiotic strain Escherichia coli 64G, characterized by high survivability in lipid-protein matrices. All components complied with food industry sanitary regulations and standards, were stored at 0-4°C prior to use, and their quality was verified using standard microbiological and physicochemical control methods.

The fermented base was prepared by mixing minced fish raw material with shrimp homogenate (7.5-9.0%) and the multistrain microbial culture (0.20-0.35%). The mixture was homogenized to a paste-like consistency and incubated at 30-35°C for 20-30 min. These parameters were experimentally optimized to simultaneously activate shrimp-derived proteases, ensure initial growth of lactic acid bacteria (LAB), and stimulate the metabolic activity of the probiotic strain. The completion of fermentation was determined by stabilization of viscosity, development of a characteristic «fermentative» aroma, and increased structural homogeneity.

Rheological properties of the final fish product were evaluated using texture profile analysis (TPA), determining hardness, cohesiveness, elasticity, chewiness, and adhesiveness. Measurements were performed using a texture analyzer with double compression of samples to 50% of their original height at a deformation speed of 1 mm/s. Data acquisition was automated and subsequently subjected to statistical analysis to identify differences between control and fermented samples.

Microstructural characteristics were examined by scanning electron microscopy (SEM) at magnifications ranging from 500× to 3000×. Samples were fixed in glutaraldehyde, dehydrated through a graded ethanol series, dried using critical point drying, and sputter-coated with gold. SEM analysis enabled visualization of the protein matrix, porosity, degree of interfibrillar bonding, and the formation pattern of the gel network structure.

Protein structural changes were further investigated using Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy in the range of 4000-600 cm^{-1}, with particular emphasis on the interpretation of Amide I (1650-1660 cm^{-1}), Amide II (1530-1550 cm^{-1}), and lipid-related bands (1740-750 cm^{-1}). FTIR analysis allowed assessment of protein denaturation, polypeptide chain rearrangement, changes in secondary structure (α-helices and β-sheets), and the influence of fermentation on protein hydration environments.

Sensory evaluation was conducted using a 9-point hedonic scale by a panel of 15 trained assessors who evaluated appearance, aroma, taste, texture, juiciness, and overall acceptability. Prior to evaluation, samples were reheated under standardized conditions and served at 50-55°C. All sensory tests were performed in individual booths under controlled lighting and odor-free conditions.

Statistical analysis of the data was carried out using one-way analysis of variance (ANOVA), followed by Tukey's post hoc test for multiple comparisons. Differences were considered statistically significant at $p < 0.05$. In addition, correlation analysis was applied to determine relationships among rheological, microstructural, and sensory parameters, while multivariate statistical methods, including principal component analysis (PCA), were used to visualize sample groupings and identify key factors influencing the quality of the fermented product.

Equipment and software

Texture measurements were performed using a TA.XTplus Texture Analyzer (Stable Micro Systems, UK). FTIR spectra were recorded using a Nicolet iS10 FTIR spectrometer (Thermo Fisher Scientific, USA). Microstructural analysis was carried out using a JSM-6510 scanning electron microscope (JEOL, Japan). pH was measured using a SevenCompact pH meter (Mettler Toledo, Switzerland). Statistical analysis was performed using SPSS Statistics 26 software (IBM, USA).

Results and discussion

This section presents comprehensive results of instrumental, spectroscopic, and microstructural analyses of samples produced at different fermentation levels. The visual data are accompanied by an

interpretative discussion demonstrating the influence of the fermented base on product structure, texture, protein chemical state, and storage stability.

Figure 1 illustrates the hardness profiles of fish patties obtained by texture profile analysis (TPA). The fermented samples exhibited a pronounced reduction in hardness compared with the control: hardness decreased by 27% in samples containing 30% fermented base and by 34% in samples containing 40%. This effect is attributed to intensive proteolysis induced by endogenous shrimp proteases and partial denaturation of myofibrillar proteins under the action of lactic acid bacteria (LAB) fermentation. The reduction in hardness was accompanied by an increase in cohesiveness and elasticity, which is a key indicator of the formation of a more homogeneous and mechanically stable protein gel network.

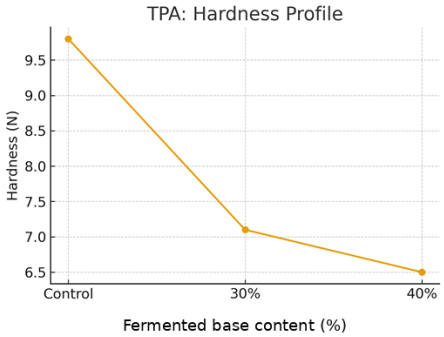


Figure 1 – TPA Analysis (Hardness)

Figure 2 presents the dynamics of pH changes during 14 days of storage. The control sample exhibited a gradual increase in pH, which is a typical indicator of microbial spoilage and the accumulation of biogenic amines. In contrast, the fermented samples maintained stable pH values in the range of 6.0-6.1 throughout the entire storage period due to the formation of organic acids, bacteriocins, and reduced activity of proteolytic spoilage microflora. This pH stability confirms the pronounced natural biopreservative effect of fermentation and provides a scientific rationale for a significant extension of the product's shelf life.

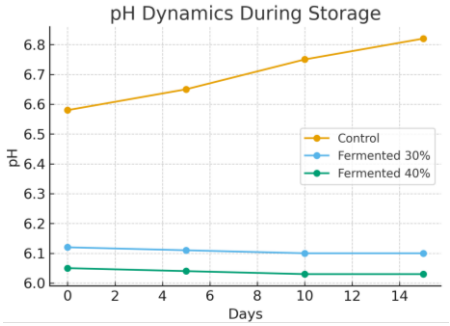


Figure 2 – pH Dynamics

The results of water-holding capacity (WHC) are presented in Figure 3. The incorporation of the fermented base increased WHC by 12-18%, which can be attributed to partial protein hydrolysis and enhanced hydrophilicity of protein molecules. The higher WHC resulted in improved juiciness and texture of the final product and increased its resistance to freezing and thawing processes. These findings are in close agreement with the previously reported texture profile parameters.

– Amide I region (1650-1660 cm^{-1}): a shift of the peak toward lower wavenumbers, indicating an increased proportion of disordered structures (β-turns and random coils).

– Amide II region (1530-1550 cm^{-1}): a decrease in band intensity associated with the disruption of hydrogen bonding.

– 1740-1750 cm^{-1} region: an increased peak intensity related to the lipid component, suggesting improved lipid emulsification induced by the fermented base.

The spectroscopic data confirm that fermentation induces mild modification of protein secondary structures, thereby enhancing their functional properties, including gelation capacity and hydration behavior (Figure 4).

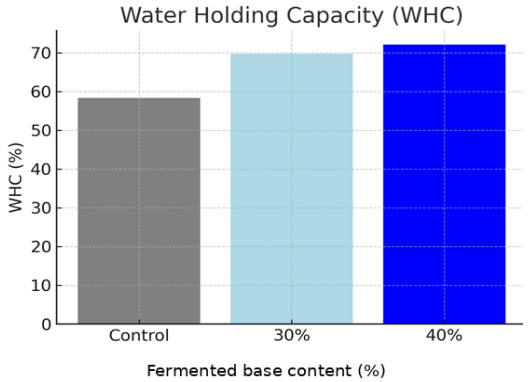


Figure 3 – Water Holding Capacity

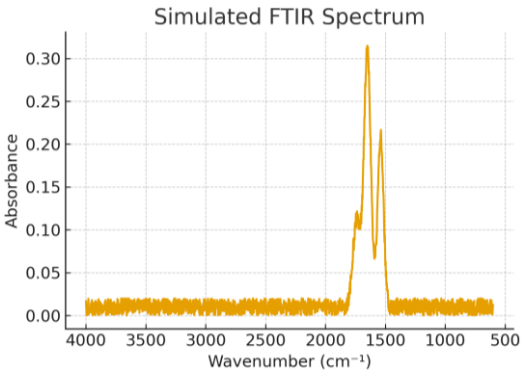


Figure 4 – FTIR Spectrum

SEM analysis (Figure 5) reveals clearly pronounced microstructural differences between the control sample and samples with different levels of fermentation (30% and 40%). The obtained micrographs (1000× magnification, scale bar 10 μm) enabled visualization of morphological shifts in the organization of protein–fiber structures induced by the action of endogenous shrimp proteases and the metabolic activity of lactic acid bacteria (LAB)

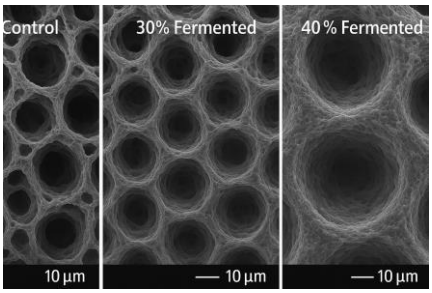


Figure 5 – Scanning electron microscopy (SEM) micrographs of the control sample and samples containing 30% and 40% fermented base, illustrating the transition from a porous structure to a dense protein gel network (1000× magnification)

The control samples were characterized by the presence of large, heterogeneous protein aggregates weakly interconnected with each other, as well as an irregular porous structure with wide pores reaching diameters of 12-18 μm. This loose fibrous architecture reflects a limited degree of myofibrillar protein denaturation and insufficient interfibrillar coagulation, resulting in the formation of discontinuities within the gel network. The presence of these structural defects indicates low water-holding capacity and limited rheological performance of the control product.

Samples containing 30% fermented base exhibited a substantially more ordered microstructure, characterized by a more uniform pore distribution with reduced pore diameters of 6-10 μm, corresponding to an approximately 40% decrease in porosity compared to the control. Compaction of the protein matrix was accompanied by the formation of stable coagulation bridges between protein filaments and the emergence of a regular gel network, which contributed to improved mechanical stability. The smoother surface of protein fibers indicates partial proteolytic

modification of myofibrillar proteins induced by endogenous proteases and metabolites of lactic acid bacteria.

At a higher fermentation level of 40%, the most pronounced microstructural transformations were observed, manifested by the formation of dense, homogeneous, rounded protein domains with minimal porosity (3-5 μm). This compact organization indicates profound alterations in protein secondary and tertiary structures, accompanied by a high degree of gel network ordering. The resulting structure was characterized by the absence of visible network ruptures, enhanced water-holding capacity, and increased resistance to thermal disruption, which closely correlates with the highest WHC values and improved textural parameters obtained by texture profile analysis (TPA)

Thus, SEM visualization confirms that fermentation induces a transition from a loose, porous, and structurally unstable protein framework to a dense, elastic, and morphologically ordered gel matrix. These microstructural findings are in full agreement with the results of TPA analysis, water-holding capacity (WHC), pH dynamics, and FTIR spectroscopy, indicating a comprehensive restructuring of proteins driven by enzymatic and microbiological processes

Conclusion

The study confirms that controlled fermentation using shrimp homogenate and a multistrain microbial culture significantly improves the structural, rheological and microbiological properties of tilapia fish patties. Fermentation promoted protein matrix restructuring, reduced hardness, increased water-holding capacity and enhanced storage stability without chemical preservatives. The technology demonstrates strong potential for industrial implementation and development of functional and gerodietetic fish products.

References

1. FAO. The State of World Fisheries and Aquaculture 2022: Towards Blue Transformation. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2022. – 224 p. https://doi.org/10.4060/cc0461en.
2. Meurer F. Protein requirements in Nile tilapia (Oreochromis niloticus) during production and reproduction phases / F. Meurer, J. Novodworski, R.A. Bombardelli // Aquaculture and Fisheries. – 2024. – Vol. 9, № 1. – P. 23-35. https://doi.org/10.1016/j.aaf.2024.03.004.
3. Dried fish at the intersection of food science, economy, and culture: A global survey / B. Belton et al // Fish and Fisheries. – 2022. – Vol. 23, № 4. – P. 941-962.
4. Quality, functionality, and microbiology of fermented fish: A review / J. Zang et al // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. – 2020. – Vol. 60, № 7. – P. 1228-1242. https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1565491.
5. The contribution of microorganisms to the quality and flavor formation of Chinese traditional fermented meat and fish products / J. Mao et al // Foods. – 2024. – Vol. 13. – Art. 608. https://doi.org/10.3390/foods13040608.
6. Fermented fish products: Balancing tradition and innovation for improved quality / H. Li et al // Foods. – 2024. – Vol. 13, № 16. – Art. 2565. https://doi.org/10.3390/foods13162565.
7. Valorization of Nile tilapia (Oreochromis niloticus) fish head for a novel fish sauce by fermentation with selected lactic acid bacteria / P. Gao et al // LWT – Food Science and Technology. – 2020. – Vol. 129. – Art. 109539. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109539.
8. Novel insight into the formation and improvement mechanism of physical property in fermented tilapia sausage by cooperative fermentation of newly isolated lactic acid bacteria based on microbial contribution / Q. Cui et al // Food Research International. – 2024. – Vol. 187. – Art. 114456. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114456.
9. Improvement mechanism of volatile flavor in fermented tilapia surimi by cooperative fermentation / C. Li et al // Food Chemistry. – 2024. – Vol. 449. – Art. 139239.
10. Toldrá F. Proteolysis and texture evolution in fish products / F. Toldrá // Food Chemistry. – 2006. – Vol. 98. – P. 438-444.
11. Rustad T. Physical and chemical properties of protein seafood by-products / T. Rustad // Maximising the Value of Marine By-Products. Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition. Cambridge: Woodhead Publishing, 2007. – P. 3-21. https://doi.org/10.1533/9781845692087.1.3.
12. Protease activity and protein gelation / R. Ovissipour et al // Food Hydrocolloids. – 2012. – Vol. 27, № 2. – P. 335-343.

13. Kim S.K., Mendis E. Bioactive marine peptides: Properties and applications / S.K. Kim, E. Mendis // Food Research International. – 2006. – Vol. 39, № 4. – P. 383-393.
14. Seafood biopreservation by lactic acid bacteria / M. Ghanbari et al // Food Microbiology. – 2013. – Vol. 34, № 1. – P. 123-132.

Ж.К. Шадьярова[1]*, Д.Б. Курмангалиева[1], А.А. Дарибаева[1], Н.Б. Сарсембаева[2], С.С. Толеубекова[3]
[1]С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті,
010011, Қазақстан Республикасы, Астана қ., Жеңіс даңғылы, 62
[2]Қазақ ұлттық аграрлық зерттеу университеті,
050000, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Абай көшесі, 8
[3]Шәкәрім университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинка көшесі, 20А
*e-mail: zhazirashadyarova@gmail.com

ТИЛАПИЯДАН ДАЙЫНДАЛҒАН ФЕРМЕНТТЕЛГЕН БАЛЫҚ КОТЛЕТТЕРІ: КӨПДЕҢГЕЙЛІ БИОТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ, СПЕКТРОСКОПИЯЛЫҚ ЖӘНЕ МИКРОСТРУКТУРАЛЫҚ ТАЛДАУ

*Жұмыста тилапияның (*Tilapia nilotica*) бұлшықет тіні негізінде креветкалық гомогенатпен және* Streptococcus cremoris, Streptococcus faecalis *var.* liquefaciens, Lactobacillus fermentum *және* Escherichia coli *64G пробиотикалық штаммын қамтитын мультиштаммды микробтық дақылмен байытылған ферменттелген балық котлеттерін алудың инновациялық биотехнологиясы әзірленіп, ғылыми тұрғыдан негізделді. Өнімнің құрылымдық, реологиялық, спектрлік және микробиологиялық қасиеттері текстуралық профильді талдау (TPA), Фурье түрлендіргіш инфрақызыл спектроскопиясы (FTIR), сканерлеуші электрондық микроскопия (SEM) және статистикалық талдау (ANOVA) әдістері арқылы кешенді бағаланды. Ферментация қарқынды протеолизді және ақуыз матрицасының қайта құрылуын туындатып, өнім жёсткостының 27-34% төмендеуіне, когезивтілігі мен серпімділігінің артуына және ылғал ұстап тұру қабілетінің 12-18% жоғарылауына әкелді. FTIR нәтижелері ақуыздардың екіншілік құрылымының өзгергенін көрсетті, ал SEM тығыз және біртекті гельдік тордың қалыптасуын растады. Микробиологиялық зерттеулер жалпы микроб санының 1,5-2,0 реттік төмендеуін және ашытқы-зең микрофлорасының басылуын көрсетті. Технология функционалдық және геродиеталық тағам өндірісінде қолдануға жоғары әлеуетке ие.*

Түйін сөздер: *ферменттелген балық өнімдері; тилапия (Tilapia nilotica); асшаян гомогенаты; мультиштаммды ашытқы; протеолиз; текстуралық талдау (TPA); микробиологиялық тұрақтылық.*

Ж.К. Шадьярова[1]*, Д.Б. Курмангалиева[1], А.А. Дарибаева[1], Н.Б. Сарсембаева[2], С.С. Толеубекова[3]
[1]Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина,
010011, Республика Казахстан, г. Астана, проспект Жеңіс, 62
[2]Казахский национальный аграрный исследовательский университет,
050010, Республика Казахстан, г. Алматы, проспект Абая, 8
[3]Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, улица Глинки 20А
*e-mail: zhazirashadyarova@gmail.com

ФЕРМЕНТИРОВАННЫЕ РЫБНЫЕ КОТЛЕТЫ ИЗ ТИЛАПИИ: МНОГОУРОВНЕВЫЙ БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ, СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЙ И МИКРОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ

*В работе представлена разработка и научное обоснование инновационной биотехнологии получения ферментированных рыбных котлет на основе мышечной ткани тилапии (*Tilapia nilotica*), обогащённых креветочным гомогенатом и мультиштаммовой микробной культурой, включающей* Streptococcus cremoris, Streptococcus faecalis *var.* liquefaciens, Lactobacillus fermentum *и пробиотический штамм* Escherichia coli *64G. Проведена комплексная оценка структурных, реологических, спектроскопических и микробиологических характеристик продукта с использованием текстурного профильного анализа (TPA), инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье (FTIR), сканирующей электронной микроскопии (SEM) и статистического анализа (ANOVA). Ферментация индуцировала интенсивный протеолиз и перестройку белкового матрикса, что привело к снижению жёсткости на 27-34%, увеличению когезивности и упругости, а также росту влагосвязывающей способности на 12-18%. FTIR-анализ выявил перераспределение вторичной структуры белков, тогда как SEM подтвердил формирование плотной и однородной гелевой сети с уменьшенной пористостью. Микробиологические исследования показали снижение общего микробного числа на 1,5-2,0 порядка и подавление дрожжево-плесневой микрофлоры, что*

подтверждает природный биоконсервационный эффект ферментации и увеличение срока хранения. Сенсорная оценка показала улучшение сочности, текстуры и общей приемлемости продукта. Разработанная технология обладает высоким потенциалом промышленного внедрения в секторе функционального и геродиетического питания.

Ключевые слова: *ферментированные рыбные продукты, тилапия (Tilapia nilotica), креветочный гомогенат, мультиштаммовая закваска; протеолиз, текстурный анализ (TPA), микробиологическая стабильность.*

Авторлар туралы мәліметтер

Жазира Куспановна Шадьярова* – PhD, аға оқытушы, Көлік техника, технология және стандарттау, сертификаттау және метрология, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: zhazirashadyarova@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9379-5735.

Дина Бакыткожаевна Курмангалиева – техника ғылымдарының докторы, «Көлік техникасы және технологиялары, стандарттау, сертификаттау және метрология» ББББТ-ң профессор м.а., С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: d.kurmangaliyeva@kazatu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7583-7919.

Айгуль Алиакбаровна Дарибаева – PhD докторанты, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: aigul_daribaeva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-0052-948X.

Нуржан Билтебаевна Сарсембаева – ветеринария ғылымдарының докторы, «Ветеринариялық-санитариялық сараптама және гигиена» кафедрасының профессоры, Қазақ ұлттық аграрлық зерттеу университеті, Алматы, Қазақстан Республикасы, lady.nurzhan@inbox.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3501-3720

Сандугаш Сайлауовна Толеубекова – техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, «Биоинженерлік жүйелер» кафедрасы, Шәкәрім университеті, Семей қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: saltosha-sandu@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2658-9514.

Сведения об авторах

Жазира Куспановна Шадьярова* – PhD, старший преподаватель, ГОП «Транспортная техника и технологии, стандартизация, сертификация и метрология», Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, Республика Казахстан; e-mail: zhazirashadyarova@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9379-5735.

Дина Бакыткожаевна Курмангалиева – доктор технических наук, и.о. профессора ГОП «Транспортная техника и технологии, стандартизация, сертификация и метрология», Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г.Астана, Республика Казахстан; e-mail: d.kurmangaliyeva@kazatu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7583-7919.

Айгуль Алиакбаровна Дарибаева – PhD докторант, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, Республика Казахстан; e-mail: aigul_daribaeva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-0052-948X.

Нуржан Билтебаевна Сарсембаева – доктор ветеринарных наук, профессор кафедры «Ветеринарно-санитарной экспертизы и гигиены», Казахский национальный аграрный исследовательский университет, г. Алматы, Республика Казахстан; e-mail: lady.nurzhan@inbox.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3501-3720.

Сандугаш Сайлауовна Толеубекова – кандидат технических наук, ассоциированный профессор; кафедра «Биоинженерные системы», Шәкәрім университет, г. Семей, Республика Казахстан; e-mail: saltosha-sandu@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2658-9514.

Information about the authors

Zhazira Shadyarova* – PhD, Senior Lecturer, Group of Educational Programs «Transport Engineering and Technologies, Standardization, Certification and Metrology», S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana city, Republic of Kazakhstan; e-mail: zhazira_shadyarova@bk.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9379-5735.

Dina Kurmangaliyeva – Doctor of Technical Sciences, Acting Professor, Group of Educational Programs «Transport Engineering and Technologies, Standardization, Certification and Metrology», S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana city, Republic of Kazakhstan; e-mail: d.kurmangaliyeva@kazatu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7583-7919.

Aigul Daribayeva – PhD Doctoral Student, S.Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana city, Republic of Kazakhstan; e-mail: aigul_daribaeva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-0052-948X.

Nurzhan Sarsembayeva – doctor of veterinary sciences, professor of the Department of Veterinary Sanitary Examination and Hygiene, Kazakh National Agrarian Research University, Almaty city, Republic of Kazakhstan; e-mail: lady.nurzhan@inbox.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3501-3720.

Sandugash Toleubekova – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Bioengineering Systems, Shakarim University, Semey city, Republic of Kazakhstan; e-mail: saltosha-sandu@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2658-9514.

Received 08.01.2026
Revised 17.02.2026
Accepted 18.02.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-45

ҒТАХР: 34.35.51

CC BY 4.0
Check for updates

Ж.Қ. Оспанова[1,2*], Л.К. Асамбаева[2], Ж.Ш. Рахимбердиева[2,3], М.Д. Касимбекова[4]
[1]Орталық Азия Инновациялық Университеті,
160021, Қазақстан Республикасы, Шымкент қ., Мәделі Қожа көш., 137/1
[2]Шымкент университеті,
160031, Қазақстан Республикасы, Шымкент қ., Жібек Жолы көш., 131
[3]М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті,
160018, Қазақстан Республикасы, Шымкент қ., Тәуке хан даңғ., 5
[4]Оңтүстік Қазақстан Медицина Академиясы,
160019, Қазақстан Республикасы, Шымкент қ., Әл-Фараби алаңы, 1/1
*e-mail: zhannaospanova4@gmail.com

ЛЕҢГЕР ӨЗЕНІНІҢ СУ БИОЦЕНОЗДАРЫНА ФОСФОРҚҰРАМДЫ ҚАЛДЫҚТАРЫНЫҢ ӘСЕРІН БИОИНДИКАЦИЯЛАУ

Аңдатпа: *Бұл мақалада техногендік шығу тегі бар фосфор қосылыстарының қалдықтарының Қазақстанның оңтүстік өңіріндегі Леңгер өзенінің су экожүйесінің экологиялық жағдайына әсері зерттелді. Су үлгілері 2025 жылдың маусым айында антропогендік жүктеме деңгейі әртүрлі бес нүктеден алынды. Өзен суы мен тау жыныстарының техногендік үйінділерінен алынған үлгілер негізінде фосфор қалдықтарын 0,1%, 0,3%, 0,5% және 1,0% концентрацияларын қосу арқылы зертханалық тәжірибе жүргізілді; бақылау үлгілерінде басқа да қоспалар болған жоқ. Инкубация 22-24 °С температурада және табиғи жарық жағдайында 72 сағатқа созылды.*

Таксономиялық талдау барысында фитопланктон мен қарапайымдылардың Chlorophyta, Euglenophyta, Bacillariophyta, Cyanophyta және Protozoa бөлімдеріне жататын өкілдері анықталды. Жасыл балдырлардың ішінде Chlorella vulgaris пен Scenedesmus quadricauda басым болды, диатомды балдырлардан – Navicula vulpina мен Fragillaria austriaca, эвгленалықтардан – Euglena agilis пен Phacus brevicaudatus түрлері тіркелді. Үлгілерде сондай-ақ цианопрокариоттардың (Oscillatoria, Anabaena) және қарапайымдылардың (Paramecium, Arcella, Euplotes) өкілдері кездесіп, судың жоғары трофтылығын және органикалық ластануын көрсетті.

0,1-0,3% концентрацияларында Chlorella vulgaris пен Scenedesmus quadricauda белсенді дамыды, ал 0,5-1,0% кезінде түрлердің көпшілігінің тежелуі, судың мөлдірлігінің төмендеуі және органо-минералдық тұнбалардың түзілуі байқалды. Диатомды балдырлар фосфатты ластануға ең жоғары сезімталдық танытты.

Алынған нәтижелер көрсеткендей, фосфор қалдықтарының төмен концентрацияларында микробалдырлардың фотосинтетикалық белсенділігі артады, бұл олардың қоректік элементтер көзі ретінде түскен заттарды пайдалана алу қабілетін көрсетеді. Алайда концентрациялардың шекті деңгейге дейін жоғарылауы су қауымдастығының тұрақтылығының бұзылуына және биоценоздың деградациясына әкеледі. Осылайша, анықталған заңдылықтар микробалдырлар мен қарапайымдыларды Қазақстанның шағын өзен экожүйелеріндегі антропогендік әсер мен экологиялық жағдайдың сенімді биоиндикаторлары ретінде пайдалануға болатынын дәлелдейді.

Түйін сөздер: *Леңгер өзені; фосфор құрамды қалдықтар; микробалдырлар; қарапайым жәндіктер; биоиндикация; сапробтылық; экологиялық жағдай.*

©Ж.Қ. Оспанова, Л.К. Асамбаева, Ж.Ш. Рахимбердиева, М.Д. Касимбекова, 2026

Кіріспе

Қазақстанның оңтүстік өңіріндегі шағын өзендері, соның ішінде Леңгер өзені, өнеркәсіптік және тұрмыстық аралас ластану көздерінің әсеріне ұшырайды. Қала өнеркәсібі темірбетон бұйымдарын өндіретін кәсіпорындармен, кірпіш зауытымен, тігін және трикотаж фабрикаларымен, өнеркәсіптік көмір шахтасымен және басқа да нысандармен ұсынылған. Бұл кәсіпорындардың қызметі минералдық және органикалық текті қалдықтардың түзілуімен қатар жүреді, олар беткі ағын және жауын-шашын арқылы су айдындарына түсуі мүмкін. Мүмкін болатын ластаушылардың ішінде цементті, силикаты және фосфор құрамды қосылыстар ерекше орын алады, өйткені олар судың лайлылығын және сілтілілігін арттырады, еріген оттегі концентрациясын және ортаның электр өткізгіштігін өзгертеді. Мұндай процестер су биоценоздарының құрылымына әсер етіп, түрлік тепе-теңдіктің ластануға төзімді микробалдырлар мен қарапайым жәндіктерге түрлері түзіледі [1].

Көптеген зерттеулерде атап өтілгендей, эвтрофикация – биогендік ластанудың әсерінен жер үсті суларының деградациясының әмбебап процесі болып табылады. Фосфор мен азоттың артық түсуі фитопланктонның тез өсуіне, судың лайлануына, оттегі тапшылығына және ақырында биоценоздардың тұрақсыздануына әкеледі. Сонымен қатар, фосфат концентрациясының тіпті орташа ауытқулары да микробалдырлар мен қарапайым жәндіктер қауымдастықтарының құрылымындағы өзгерістерді қоздыруы мүмкін. Қоректік заттардың ұзақ уақыт түсуі органикалық заттардың жиналуына, мөлдірліктің төмендеуіне және автотрофты мен гетеротрофты формалардың арақатынасының өзгеруіне алып келетіні анықталған [2].

Қазіргі заманғы зерттеулер биогендік ластанудың су айдындарына әсері кезінде экожүйенің фосфаттар мен нитраттарға реакциясы сызықтық емес сипатқа ие екенін көрсетеді. Алғашқы кезеңдерде фотосинтездің күшеюі мен бастапқы өнімділіктің артуы байқалады, алайда жүктеменің өсуімен биоценоз тұрақтылығын жоғалтады, ал биологиялық әртүрлілік күрт азаяды. Осы тұрғыда қысқа мерзімді бейімделу реакциялары мен ұзақ мерзімді салдарларды ажырату маңызды, себебі соңғылары қарапайым трофикалық құрылымдардың қалыптасуымен көрінеді [3]. Мұндай процестер тек ірі су қоймаларына ғана емес, сонымен қатар өздігінен тазаруы қиындаған және су алмасу уақыты қысқа шағын өзендерге де тән.

Аймақтық бақылаулардың бірқатарында ауылшаруашылығы қызметі табиғи суларға фосфордың түсуінің негізгі көздерінің бірі екені анықталған. Тыңайтқыш енгізілген алқаптардан келетін беткі ағынсуларға еріген және қалқып жүрген фосфат түрлерін тасымалдайды, бұл судың химиялық құрамының өзгеруіне, pH деңгейінің, электр өткізгіштіктің және қалқыма заттар мөлшерінің артуына әкеледі. Мұндай өзгерістер биотаға тікелей әсер етіп, гидробионттардың тіршілік жағдайларын бұзады және олардың санын азайтады [4]. Қоректік заттардың шекті рұқсат етілген концентрациясынан асып кетуі кезінде микробалдырлар күшейген өсу реакциясын көрсетсе, ал қарапайым жәндіктердің қозғалысы баяулап, популяциялары азаяды – бұл құбылыстар экологиялық күйзелістің айқын көрсеткіші болып табылады.

Биогендік элементтердің жиналуы екіншілік процестерді күшейтеді: органикалық массаның өсуі, тотығу-тотықсыздану әлеуетінің өзгеруі және еріген оттегінің тапшылығы. Бұл деградацияның тұйық тізбегін қалыптастырады, онда органикалық жүктеменің артуы анаэробты процестердің күшеюіне, ал олар өз кезегінде оттегі тапшылығын одан әрі ушықтыруға алып келеді. Әдеби деректер дәл осы өзара байланыстар кешенді биогендік ластануға ұшыраған су айдындарына тән екенін растайды [5].

Фосфорлы қосылыстардың әсерінен су қауымдастықтарының құрылымының өзгеруі су экожүйелерін қалпына келтіру міндеттерімен тікелей байланысты. Қазіргі зерттеулерге сәйкес, биотехнологиялық әдістерді – табиғи сорбенттерді, деструктор-микроорганизмдерді және биостимуляторларды – қолдану судың құрамындағы қолжетімді фосфор мөлшерін азайтып, оның сапасын тұрақтандыруға көмектеседі [6]. Бұл тәсілдер ағын суларды тазартуға ғана емес, сонымен қатар биологиялық белсенділікті ішінара қалпына келтіруге мүмкіндік береді. Қазақстан жағдайында мұндай шешімдер маусымдық ауытқулар мен ауылшаруашылығы жүктемелеріне жоғары сезімтал шағын өзендер үшін ерекше өзектілікке ие.

Гидробиология тұрғысынан алғанда, су қауымдастығының антропогендік әсерге реакциясы кешенді түрде бағалануы тиіс. Ортадағы физика-химиялық параметрлер (pH, электрөткізгіштік, лайлылық, еріген оттегі концентрациясы) ластану деңгейінің жалпы көрсеткіштері болып табылады, алайда дәл биотаның құрамы мен динамикасы жүйенің нақты

тұрақтылық шектерін көрсетеді. Гидробиологиялық зерттеулердің негізгі қағидаларына сәйкес, биоценоздардың тұрақтылығы автотрофты және гетеротрофты буындардың өзара әрекеттесуіне байланысты, ал олардың біреуінің бұзылуы бүкіл құрылымның қайта қалыптасуына әкеледі [7].

Осылайша, Леңгер өзеніндегі фосфорқұрамды қалдықтарды зерттеу фосфат жүктемесінің деңгейі мен микробалдырлар мен қарапайым жәндіктердің түрлік құрамындағы өзгерістер арасындағы заңдылықтарды анықтауға бағытталған. Алынған деректер жүйенің тұрақты күйден тұрақсыз күйге ауысатын шекті концентрация мәндерін бағалауға және экологиялық күйзелістің индикаторлық белгілерін анықтауға мүмкіндік береді.

Леңгер өзені зерттеу нысаны ретінде оның шаруашылық және тау-кен өндірістік қызметке байланысты антропогендік әсер аймағында орналасуына байланысты таңдалды. Бұл аталған су нысанын жергілікті ластану көздерінің өзен экожүйесіне әсерін бағалау үшін репрезентативті объект ретінде қарастыруға мүмкіндік береді.

Материалдар мен әдістер

Зерттеу Қазақстанның оңтүстік өңірінде орналасқан Леңгер өзенінде жүргізілді – бұл белсенді өнеркәсіптік ықпал аймағынан өтетін шағын су арнасы. Үлгілер антропогендік жүктеме градиентін көрсететін бес нүктеден алынды:

– қалаға кіре беріс (42°10'48.4"N 69°54'48.2"E);
– көмірқалдықтарына жақын бөлік (42°10'59.1"N 69°52'18.1"E);
– қаланың орталық бөлігі (42°11'02.5"N 69°51'58.3"E);
– қалдықтар жанындағы жасанды су айдыны (42°11'23.4"N 69°52'05.8"E);
- қаладан шыға беріс (42.225252 N, 69.801069 E).

Әрбір нүктеден судың жоғарғы қабатынан (≈ 5 см) стерильді шыны ыдыстарға беткі үлгілер алынды. Қосымша түрде 2 және 4-нүктелерде түбіндегі шөгінділер (қалдықтар) жиналды, олар кейіннен минералды-фосфатты ластану көзі ретінде пайдаланылды. Үлгілер салқындатылған күйде тасымалданып, іріктелгеннен кейін 12 сағат ішінде талданды. Алынған сынамалар бір шыны ыдысқа біріктіріліп белсенді тұнба түзілді.

Сонымен қатар қара көмір қалдықтарының шөгінділерінен сынамалар алынды:

А – Тығыз қара қою түсті қалдықтар, көмірге ұқсас, пластинкалы, өзіне тән жылтырлығы бар, үйіндінің жанынан пайда болған жасанды көлшіктің айналасы қамыс (*Phragmites*) қаптаған;

В – сұрғылт түсті, кеуекті, орташа тығыздықтағы қалдықтар, шлаққа ұқсас, үйіндінің айналасында өсімдік жоқ.

Жоғарыда сипатталған 2 шөгіндінің 5 нүктесінен сынама алынып зертханалық жағдайда бір шыны ыдысқа араластырылды.

Жиналған қалдықтардан су суспензиясы дайындалып, ол өзен суының үлгілеріне 0,1%, 0,3%, 0,5% және 1,0% (м/көлем) концентрацияларында енгізілді. Бақылау үлгісі ластаушы зат қоспай алынған су болды. Осылайша, екі қара көмір қалдықтарының шөгінділерінен модельді түзілген концентрленген Ленгер өзенінің суына қоспасынан (соның ішінде бақылау үлгісі) – барлығы 9 тәжірибелік үлгі алынды.

Инкубация 25 ± 1°C температурада 24 сағат бойы, шашыраңқы жарықта жүргізілді. Мұндай тәсіл фосфор құрамды бөлшектер мен көмір қалдықтарында кездесетін қосалқы қоспалардың су микробиоценозына әсерін бағалауға мүмкіндік берді [8].

Микроскопиялық талдау ЛОМО (Микомед-5) биологиялық микроскопының көмегімен жүргізілді, ол ×10, ×40 және иммерсиялық ×100 объективтерімен жабдықталған. Жарықтандыру қарқындылығын реттеуге болатын орнатылған галоген шамымен қамтамасыз етілді.

Микроағзаларды анықтау морфологиялық белгілер бойынша жүргізілді, ол үшін тұщы су диатомды, эвгленді және жасыл балдырлардың, сондай-ақ инфузориялар мен талшықтылардың анықтауыштары пайдаланылды. Негізгі таксономиялық топтардың өкілдері есепке алынды: *Chlorophyta, Euglenophyta, Bacillariophyta, Cyanobacteria, Ciliophora, Rhizopoda.*

Ерекше назар түрлік әртүрліліктің өзгеруіне және *Cymbella sp.*сияқты мезосапробты суларға тән төзімді индикаторлық түрлердің пайда болуына аударылды [9].

Экожүйенің күйі биоиндикацияның сапалық әдісімен бағаланды, ол ластануға сезімтал және төзімді түрлердің арақатынасына негізделді. Нәтижелердің интерпретациясы су организмдерінің сапробтық жіктелу қағидаларына сәйкес жүргізілді – сандық индекстер

есептелмей, органикалық ластану деңгейін көрсететін индикаторлық түрлердің болуына қарай анықталды [10].

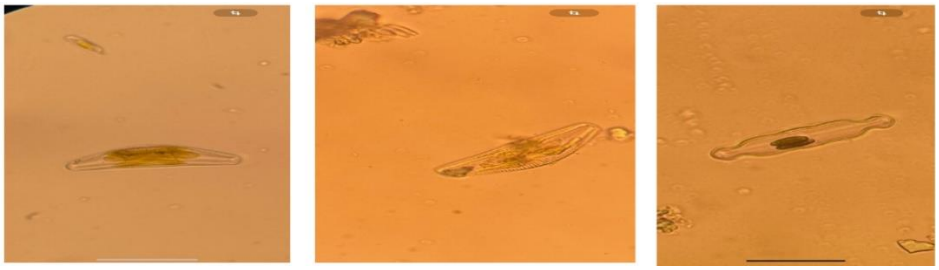
Микроскопиялық бақылау нәтижелері бойынша ластану концентрациясының артуы мен биоәртүрліліктің өзгеруі бағаланды: олигосапробты жағдайлардан мезосапробты жағдайларға өту, диатомды балдырлардың басым болуы және қозғалмалы қарапайым жәндіктердің санының азаюы тіркелді.

Эксперименттік деректердің статистикалық өңдеуі вариациялық статистиканың стандартты әдістерін қолдану арқылы жүргізілді. Нәтижелер орташа мән ± стандартты ауытқу түрінде ұсынылды; айырмашылықтардың сенімділігі $p < 0,05$ маңыздылық деңгейінде бағаланды.

Зерттеу әдістемесі Қазақстан Республикасының Экологиялық кодексінің талаптарына және қолданыстағы санитарлық-гигиеналық нормативтерге сәйкес жүргізілді. Барлық талдаулар су объектілерін экологиялық зерттеуге арналған жалпы қабылданған әдістемелік ұсынымдарды сақтай отырып орындалды.

Нәтижелер мен талқылау

Леңгер өзені алабында өнеркәсіптік және ауылшаруашылығы ағындарының болуы оны антропогендік қысымға ұшыраған су нысанының типтік мысалына айналдырады. Леңгер өзенінің арнасы бойында минералдық қалдықтардың жиналу учаскелері тіркелген – болжам бойынша, бұлар бетон және кірпіш өндірістерінің, сондай-ақ көмір шахтасының қызметі нәтижесінде түзілген тау жыныстары мен құрылыс шөгінділері. Мұндай қалдықтар минералды-фосфатты қосылыстардың көзі болып табылады және олар беткі ағын арқылы суға түсіп, экожүйенің химиялық және биологиялық сипаттамаларын өзгерте алады [10]. Зерттеу микробалдырлар мен қарапайым жәндіктердің түрлік құрылымындағы өзгерістерді анықтауға бағытталған, өйткені дәл осы топтар қоректік заттардың ауытқуларына аса сезімтал және тез жауап береді. Микроскопиялық организмдер жедел биоиндикаторлар болып табылады – олардың саны, морфологиясы және қозғалыс белсенділігі күрделі химиялық талдауларсыз-ақ ластану деңгейін бағалауға мүмкіндік береді. Жарық микроскопиясы кезінде диатомды балдырлар (Bacillariophyta) анықталды. (Сурет 1).



Сурет 1 – Диатомды балдырлардың (Bacillariophyta) жарық микроскопиясы кезіндегі микрофотосуреттері

Микроскопиялық бақылаулар нәтижесінде су биоценоздарының реакциясының дәрежесі мен сипаты үйінді көзінің түріне (А және Б) және тұнбаның концентрациясына тәуелді екені анықталды. Айқын айырмашылықтар ластаушы заттарды сол мезетте қосу кезінде және үш тәуліктен кейінгі жағдайлар арасында байқалды, бұл түрлердің бейімделу процестерінің динамикасын бақылауға мүмкіндік берді.

Бастапқы кезеңде (үлгілер дайындалған сәтте) бақылау үлгісінде микробалдырлар мен қарапайым жәндіктердің қалыпты арақатынасы байқалды: қозғалыстағы инфузориялар мен амебалар, сондай-ақ жасыл және диатомды балдырлар тіркелді.

Б үйіндісімен дайындалған үлгілерде негізгі морфологиялық топтар сақталғанымен, қозғалыстағы формалардың саны аздап төмендеген. Қарапайым жәндіктердің қозғалыс белсенділігі орташа деңгейде болды, кейбір үлгілерде қозғалыссыз даралар кездесті.

А үйіндісінің үлгілерінде керісінше, қозғалыстағы формалардың дерлік толық жоқтығы тіркелді. Қарапайым жәндіктер сирек кездесіп, көбісі белсенді емес күйде болды. Микробалдырлар негізінен *Chlorella* және *Scenedesmus* туыстарына жататын жеке жасушалар мен ұсақ колониялар түрінде анықталды, ал диатомды формалар (*Navicula*, *Fragilaria*) өте аз мөлшерде кездесті. Мұндай жағдай биоценоздың жедел стресс реакциясы ретінде түсіндіріледі және бұл минералды бөлшектер мен фосфор құрамды қосылыстардың уытты әсерімен байланысты болуы мүмкін [11].

Кесте1 – Фосфатты қоспалардың әртүрлі концентрацияларында микробалдырлар мен қарапайымдылардың таралуы

№	Таксономиялық топ және түр	Бақылау 0%	Ластаушы заттардың қоспаларының су биоценозына әсері (бір мезеттік көрсеткіші)								Ластаушы заттардың қоспаларының су биоценозына әсері (3-ші тәуліктен кейінгі көрсеткіші)							
			А 0,1 %	А 0,3 %	А 0,5 %	А 1,0 %	Б 0,1 %	Б 0,3 %	Б 0,5 %	Б 1,0 %	А 0,1 %	А 0,3 %	А 0,5 %	А 1,0 %	Б 0,1 %	Б 0,3 %	Б 0,5 %	Б 1,0 %
	Қарапайымдылар																	
1	*Euglena viridis*	+	+	+	+		+	+	+		+	+	+		+	+	+	+
2	*Euglena agilis*	+	+	+	+		+	+	+		+	+	+		+	+	+	
3	*Euglena proxima*	+																
4	*Katodinium sp.*	+	+	+	+		+	+			+	+	+		+	+	+	
5	*Trachelomonas armata*	+	+	+	+		+	+	+			+	+			+	+	
6	*Trachelomonas echinata*	+	+				+	+	+			+	+			+	+	
7	*Phacus brevicaudatus*	+	+				+	+	+			+	+		+	+		
8	*Phacus triqueter*	+	+	+	+		+	+	+		+	+	+		+	+		
9	*Lepocinclis popova*	+	+	+	+		+	+			+	+	+		+	+		
10	*Lepocinclis sp.*	+	+	+			+	+				+	+		+	+	+	
11	*Colacium vesiculosum*	+	+	+	+		+	+	+			+	+			+	+	
12	*Colacium huber*	+	+	+	+		+	+	+		+	+	+		+	+	+	
13	*Pinnularia microstauron*	+	+	+			+	+	+		+	+	+		+	+	+	
14	*Oxytricha sp.*	+	+	+	+		+	+	+		+	+	+		+	+	+	
15	*Amoeba limax*	+	+				+	+			+	+	+	+	+	+	+	+
16	*Oicomonas sp.*	+	+	+	+		+	+	+		+				+	+	+	
17	*Amphidinium steinii*	+	+	+	+		+	+	+		+				+	+	+	
18	*Paramecium caudatum*	+	+	+	+		+	+	+		+	+			+	+	+	+
19	*Colpoda steinii*	+	+	+	+		+	+			+	+	+		+	+	+	
20	*Stylonychia pustulata*	+	+	+	+		+	+					+		+		+	
21	*Vorticella sp.*	+	+	+			+	+	+		+	+	+		+		+	
22	*Euploteschar on*	+	+	+			+	+			+	+	+		+	+	+	
23	*Macrocyclops sp.*	+	+	+	+		+	+			+	+	+		+	+	+	
24	*Cyclops sp.*	+	+	+	+		+	+			+	+	+		+	+	+	+
	Балдырлар																	
1	*Chlorella vulgaris*	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
2	*Scenedesmus quadricauda*	+	+	+	+		+	+	+	+			+		+	+	+	+
3	*Pediastrum boryanum*	+	+	+	+		+	+			+				+	+	+	
4	*Oocystis lacustris*	+	+	+			+	+	+		+	+	+		+	+	+	
5	*Ulothrix zonata*	+	+	+			+	+			+	+	+		+	+	+	
6	*Spirogyra sp.*	+	+	+			+	+			+	+	+		+	+	+	
7	*Cladophora glomerata*	+	+	+			+	+	+		+	+	+		+	+	+	

№	Таксономиялық топ және түр	Бақылау 0%	Ластаушы заттардың қоспаларының су биоценозына әсері (бір мезеттік көрсеткіші)								Ластаушы заттардың қоспаларының су биоценозына әсері (3-ші тәуліктен кейінгі көрсеткіші)							
			А 0,1 %	А 0,3 %	А 0,5 %	А 1,0 %	Б 0,1 %	Б 0,3 %	Б 0,5 %	Б 1,0 %	А 0,1 %	А 0,3 %	А 0,5 %	А 1,0 %	Б 0,1 %	Б 0,3 %	Б 0,5 %	Б 1,0 %
8	*Ankistrodes musfalcatus*	+	+	+			+	+	+		+	+	+		+	+	+	
9	*Chlamydomonas sp.*	+	+	+			+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	
10	*Closterium sp.*	+	+	+	+		+	+	+		+	+	+		+	+	+	
11	*Navicula lanceolata*	+	+	+	+		+	+	+						+	+	+	
12	*Navicula hybrida*	+	+	+	+		+	+	+									
13	*Navicula simulate*	+	+	+			+	+	+									
14	*Cymbella affinis*	+	+	+	+		+	+	+		+	+	+		+	+	+	
15	*Fragilaria famelica*	+	+	+			+	+	+		+	+	+		+	+	+	
16	*Fragilaria austriaca*	+	+	+			+	+	+		+				+	+		
17	*Achnanthidiumpyrenaicum*	+	+	+			+	+	+						+	+		
18	*Diatoma vulgaris*	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+
19	*Amphoracoffeaeformis*	+	+	+			+	+	+		+	+	+		+	+	+	
20	*Lemnicola hungarica*	+	+	+			+	+	+		+				+	+		
21	*Aphanizomenon flosaquae*	+	+	+			+	+	+		+	+	+		+	+	+	
22	*Tolypothrix tenuis*	+	+	+			+	+	+									
23	*Nostoc pruniforme*	+	+	+	+		+	+	+		+				+	+	+	
24	*Oscillatoria chalybea*	+	+	+	+		+	+			+	+	+		+	+	+	
25	*Lecane bulla*	+	+	+	+		+	+										

Үшінші тәуліктен кейінгі жағдайда ұсталған үлгілерде микробиоценоз құрылымында елеулі өзгерістер байқалды. Б үйіндісімен дайындалған үлгілерде микробалдырлар мен қарапайым жәндіктердің санының артуы тіркелді; амебалар мен инфузориялардың белсенді формаларының пайда болуы олардың бастапқы тежелуден кейін тіршілік белсенділігін қалпына келтіре алғанын көрсетті. Бұл биоценоздың орташа деңгейдегі ластануға бейімделу қабілетін дәлелдейді. А үйіндісімен алынған үлгілерде де белсенділіктің ішінара қалпына келуі байқалды: бастапқы кезеңде болмаған амебалар мен инфузориялар қайта пайда болды. Дегенмен, жоғары концентрацияларда (0,5-1,0%) қалпына келу шектеулі болды, ал төмен концентрациялардағы (0,1-0,3%) үлгілерде *Chlorella sp.*балдырларының көбеюі айқын көрінді.

Барлық үлгілерде, диатомды балдырлар (*Navicula*, *Fragilaria*) сақталды, бұл олардың экологиялық икемділігінің жоғары екенін көрсетеді. Алайда олардың саны тұнба концентрациясы артқан сайын азайды. Жасыл балдырлар (*Chlorella*, *Scenedesmus*) неғұрлым төзімді болып шықты және барлық үлгілерде дерлік кездескен, тек А үйіндісінің 1%-дық нұсқасында олардың толық болмауы байқалды. Бұл жағдай фотосинтетикалық жүйе үшін шекті жүктеме деңгейін көрсетуі мүмкін. Үш тәуліктен кейін амебалар ең белсенді организмдер ретінде байқалды, олардың қозғалысы әрекеттері биоценоздың қалпына келу белгілері ретінде бағаланды [12].

Бақылау және тәжірибелік үлгілерді салыстыру нәтижесінде келесі үрдістер айқындалды:

Алғашқы сағаттарда – организмдердің тіршілік белсенділігінің күрт төмендеуі, әсіресе А үйіндісінің үлгілерінде;

Үш тәуліктен кейін – бейімделу белгілерінің пайда болуы және биоценоз құрылымының біртіндеп қалпына келуі;

Ең төзімді қауымдастықтар төмен концентрациялардағы (0,1-0,3%) үлгілерде, әсіресе Б нүктесінің сынамаларында байқалды.

Осылайша, алынған нәтижелер экожүйенің екі фазалы реакциясын айқын көрсетеді: бастапқы стресс кезеңі мен кейінгі бейімделу кезеңі. Бұл қорытындылар фосфорқұрамды қосылыстардың әсерінен су биоценоздары уақытша белсенділікті төмендетіп, кейін төзімді түрлердің есебінен қалпына келетіні туралы әдеби деректермен сәйкес келеді [13].

Алынған нәтижелер Леңгер өзенінің биоценозы қысқа мерзімді биогендік және минералды ластануға белгілі бір тұрақтылыққа ие екенін көрсетеді. А үйіндісінің әсері айқынырақ уыттылықпен сипатталады, бұл, мүмкін, құрамындағы сілтілі және фосфаты қосылыстардың жасушалық осмостық тепе-теңдікке әсер етуімен байланысты. Ал Б үйіндісі керісінше, жұмсақ әсер етеді және биоәртүрліліктің сақталуына мүмкіндік береді.Үш тәуліктен кейін организмдердің саны ғана емес, олардың трофикалық топтарының алуан түрлілігі де артты, бұл бейімделу биоценоздың өзін-өзі қалпына келтіру қабілетін дәлелдейді [14].

Осылайша, тәжирибе нәтижелері су жүйесінің өздігінен реттелу қабілетін көрсетеді, яғни қысқа мерзімді ластанудан кейін микробиологиялық көрсеткіштердің біртіндеп қалпына келуі байқалады[15]. Алынған деректер экожүйенің тұрақты күйден тұрақсыз күйге ауысатын шекті концентрацияларын анықтауға, сондай-ақ аймақтың шағын өзендеріне түсетін фосфаттық жүктемені биоиндикациялық бағалау критерийлерін әзірлеуге мүмкіндік береді.

Қорытынды

Жүргізілген зерттеу нәтижелері минералды фосфор құрамды үйінді тұнбаларының Леңгер өзенінің су биоценозының құрылымы мен белсенділігіне айтарлықтай әсер ететінін көрсетті. Зерттеу жұмысының алғашқы кезеңінде, әсіресе А үйіндісінің әсерінен, қарапайым жәндіктердің белсенділігі төмендеп, микробалдырлар саны азайған. Үш тәуліктен кейін биоактивтіліктің ішінара қалпына келуі, амебалар мен инфузориялардың пайда болуы және *Chlorella sp.* Балдырларының көбеюі тіркелді. Экожүйе екі фазалы реакция көрсетті – бастапқы стресс және кейінгі бейімделу кезеңдері, бұл биоценоздың орташа ластану деңгейінде (0,1-0,3%) өзін-өзі реттеу қабілетінің бар екенін, ал жоғары фосфаттық жүктемеге сезімтал екенін дәлелдейді. Алынған нәтижелер микробалдырлар мен қарапайым жәндіктерді өңірдің шағын өзендерінің экологиялық жағдайының биоиндикаторлары ретінде қолдануға болатынын растайды.

Әдебиеттер тізімі

1. Eutrophication: Causes, Consequencesand Controlsin Aquatic Ecosystems. Nature Education Knowledge Project (Scitable). Дата обращения: 8 октября 2025. https://www.nature.com/scitable/knowledge/library/eutrophication-causes-consequences-and-controls-in-aquatic-102364466/.
2. Indicators: Phosphorus. U.S. Environmental Protection Agency (EPA), 2013. 8 октября 2025. https://www.epa.gov/national-aquatic-resource-surveys/indicators-phosphorus.
3. Strokal, Vita, и AnastasiaHats. 2025. «Biogenic Pollution of theUnava River Waterbody» Scientific Reportsofthe National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine (aheadofprint). https://doi.org/10.31548/dopovidi/1.2025.09.
4. Rajkumar V. Effec to fAgricultural Activitieson Surface Water Quality of Kolthurand Sampambole Lakes of Medchal Malkajgiri District, Telangana India / V. Rajkumar, K. Shailaja, S. Gangadhar Rao // Environmental Reports. – 2024. https://doi.org/10.51470/er.2024.6.2.01.
5. Environmental Pollution Loadson Surface Water Chemistry and Potentially Ecological RisksofInl and Aquatic Ecosystemin South-Eastern State, Nigeria / E.A. Ubuoh, F.U. Nwogu, Cosmas Ofoegbu, P.C. Chikezie // Environmental Systems Research. – 2023. – № 12(1). https://doi.org/10.1186/s40068-023-00302-x.
6. Study of the Possibility of Biorecultivation of Soils Contaminatedwith Brown Coal Waste / A. Issayeva et al // Journal of Ecological Engineering. – 2024. – № 25(4). – P. 314-322. https://doi.org/10.12911/22998993/185294.
7. Минсаринова Б.Қ. Жалпы гидробиология: оқуқұралы / Б.Қ. Минсаринова, Б.Е. Есжанов. – 2017. – Алматы: Қазақуниверситеті.

8. Inhibition Effectsof Petroleum Products on Nitrogenand Phosphorous Removal / V. Dubovik et al // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2022. – № 981(042008). https://doi.org/10.1088/1755-1315/981/4/042008.
9. Biomonitoringand Bioassessment / Moog et al // B Riverine Ecosystem Management: Science for Governing Towards a Sustainable Future. – 2018. – P. 415-436. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-73250-3_19.
10. Identificationof River Water Pollution Based on Saprobic Index of Macrozoobenthosin Anggokoine River, Oheo Sub-District North Konawe District. 2025.
11. Ciliatesas Bioindicatorsof Water Quality: A Case Study in the Neotropical Regionand Evidence of Phylogenetic Signals (18S-rDNA) / Dias, Roberto Júnio Pedroso et al // Environmental Pollution. – 2021. – № 268 (Pt A). – Vol. 115760. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115760.
12. Protozoan Communities Serveas a Strong Indicatorof Water Quality in the Nile River / El-Tohamy et al // Scientific Reports. – 2024. – № 14 (July). –P. 16382. https://doi.org/10.1038/s41598-024-66583-z.
13. Analysis of Water Quality, Bioindicators, Contaminantsand Their CytogeneticImpactsin a Cerrado Reservoir / Benicio, Sarah Haysa et al // Revista Brasileirade Ciências Ambientais (aheadofprint). – 2025. https://doi.org/10.5327/z2176-94782115.
14. The Influence of Abiotic Factorson Organisms-Hydrobionts of Activated Sludge / Sh. Baimukasheva et al // Journal of Ecological Engineering. – 2023. – № 24(10). – P. 125-133. https://doi.org/10.12911/22998993/170165.
15. Rashed M.N. Photocatalytic Degradation of Rhodamine-B Dye Using Composite Preparedfrom Drinking Water Treatment Sludgeand Nano-TiO_2 / M.N. Rashed, M.A.E.-D. El-Taher, S.M.M. Fadlalla // Environmental Quality Management. – 2022. – № 31(3). – P. 175-185. https://doi.org/10.1002/tqem.21772.

Ж.Қ. Оспанова[1,2]*, Л.К. Асамбаева[2], Ж.Ш. Рахимбердиева[2,3], М.Д. Касимбекова[4]
[1]Центрально-Азиатский инновационный университет,
160021, Республика Казахстан, г. Шымкент, ул. Мадели Кожа, 137/1
[2]Шымкентский университет,
160031, Республика Казахстан, г. Шымкент, ул. Жибек Жолы, 131
[3]Южно-Казахстанский университет имени М. Ауэзова,
160018, Республика Казахстан, г. Шымкент, пр. Тауке хана, 5
[4]Южно-Казахстанская медицинская академия,
160019, Республика Казахстан, г. Шымкент, пл. Аль-Фараби, 1/1
*e-mail: zhannaospanova4@gmail.com

БИОИНДИКАЦИЯ ВЛИЯНИЯ ФОСФОРСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ НА ВОДНЫЕ БИОЦЕНОЗЫ РЕКИ ЛЕНГЕР

В статье исследовано влияние фосфорсодержащих отходов техногенного происхождения на экологическое состояние водной экосистемы реки Ленгер, расположенной в южном регионе Казахстана. Отбор проб воды осуществлялся в июне 2025 года на пяти участках, характеризующихся различным уровнем антропогенной нагрузки. Лабораторные эксперименты проводились с использованием образцов речной воды и техногенных породных отвалов с добавлением фосфорсодержащих остатков в концентрациях 0,1%, 0,3%, 0,5% и 1,0%; контрольные образцы не содержали дополнительных примесей. Инкубация осуществлялась в течение 72 часов при температуре 22-24 °C в условиях естественного освещения.

В ходе таксономического анализа были выявлены представители фитопланктона и простейших, относящиеся к отделам Chlorophyta, Euglenophyta, Bacillariophyta, Cyanophyta и Protozoa. Среди зелёных водорослей доминировали Chlorella vulgaris и Scenedesmus quadricauda; диатомовые водоросли были представлены преимущественно видами Navicula vulpina и Fragillaria austriaca; эвгленовые водоросли – Euglena agilis и Phacus brevicaudatus. В пробах также отмечено присутствие цианопрокариот (Oscillatoria, Anabaena) и простейших (Paramecium, Arcella, Euplotes), что свидетельствует о высоком трофическом статусе водоёма и наличии органического загрязнения.

При концентрациях 0,1-0,3% наблюдалось активное развитие Chlorella vulgaris и Scenedesmus quadricauda, тогда как при 0,5-1,0% отмечались угнетение роста большинства видов, снижение прозрачности воды и формирование органо-минеральных осадков. Наибольшую чувствительность к фосфатному загрязнению проявили диатомовые водоросли.

Полученные результаты показывают, что при низких концентрациях фосфорсодержащих отходов фотосинтетическая активность микроводорослей возрастает, что отражает их способность использовать поступающие вещества в качестве источников питания. Однако повышение концентраций до пороговых значений приводит к нарушению устойчивости водных сообществ и деградации биоценоза. Таким образом, выявленные закономерности подтверждают возможность использования микроводорослей и простейших в качестве надёжных биоиндикаторов антропогенного воздействия и экологического состояния малых речных экосистем Казахстана.

Ключевые слова: *река Ленгер; фосфорсодержащие отходы; микроводоросли; простейшие; биоиндикация; сапробность; экологическое состояние.*

Zh.K. Ospanova[1,2]*, L.K. Asambaeva[2], Zh.Sh. Rakhimberdieva[2,3], M.D. Kassimbekova[4]
[1]Central Asian Innovation University,
160021, Republic of Kazakhstan, Shymkent, 137/1 Madeli Kozha St.
[2]Shymkent University,
160031, Republic of Kazakhstan, Shymkent, 131 Zhibek Zholy St.
[3]M. Auezov South Kazakhstan University,
160018, Republic of Kazakhstan, Shymkent, 5 Tauke Khan Ave.
[4]South Kazakhstan Medical Academy,
160019, Republic of Kazakhstan, Shymkent, 1/1 Al-Farabi Square
*e-mail: zhannaospanova4@gmail.com

BIOINDICATION OF THE EFFECT OF PHOSPHORUS-CONTAINING WASTES ON AQUATIC BIOCENOSES OF THE LENGER RIVER

This article investigates the impact of technogenic phosphorus-containing waste on the ecological condition of the aquatic ecosystem of the Lenger River, located in the southern region of Kazakhstan. Water samples were collected in June 2025 from five sites characterized by different levels of anthropogenic load. Laboratory experiments were conducted using river water samples and technogenic waste rock materials with the addition of phosphorus-containing residues at concentrations of 0.1%, 0.3%, 0.5%, and 1.0%; control samples did not contain any additional impurities. Incubation was carried out for 72 hours at a temperature of 22-24°C under natural light conditions.

Taxonomic analysis revealed representatives of phytoplankton and protozoa belonging to the divisions Chlorophyta, Euglenophyta, Bacillariophyta, Cyanophyta, and Protozoa. Among green algae, Chlorella vulgaris and Scenedesmus quadricauda predominated; diatoms were represented mainly by Navicula vulpina and Fragillaria austriaca; euglenophytes included Euglena agilis and Phacus brevicaudatus. Samples also contained cyanoprokaryotes (Oscillatoria, Anabaena) and protozoa (Paramecium, Arcella, Euplotes), indicating high trophic status and organic pollution of the water.

At concentrations of 0.1-0.3%, active development of Chlorella vulgaris and Scenedesmus quadricauda was observed, whereas at 0.5-1.0% most species exhibited growth inhibition, decreased water transparency, and the formation of organo-mineral sediments. Diatom algae showed the highest sensitivity to phosphate contamination.

The obtained results demonstrate that low concentrations of phosphorus-containing wastes enhance the photosynthetic activity of microalgae, indicating their ability to utilize these substances as nutrient sources. However, increasing concentrations to threshold levels lead to destabilization of aquatic communities and degradation of the biocenosis. Thus, the revealed patterns confirm that microalgae and protozoa can be effectively used as reliable bioindicators of anthropogenic impact and ecological status in small river ecosystems of Kazakhstan**.**

Key words: Lenger River, phosphorus-containing wastes, microalgae, protozoa, bioindication, saprobity, ecological status.

Авторлар туралы мәліметтер

Жанна Хожановна Оспанова* – биология ғылымдарының кандидаты, PhD, доцент м.а.; Орталық Азия Инновациялық Университеті; Шымкент университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: zhannaospanova4@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-3752-7853.

Лаззат Каликбаевна Асамбаева – биология ғылымдарының кандидаты, аға оқытушы, Шымкент университеті, Шымкент қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: asambayeva.lazzat@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-2081-0935.

Жанар Шерахметовна Рахимбердиева – М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті; Шымкент университеті, Шымкент қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: rakhimberdiyeva80@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9752-5986.

Мереке Даулетбековна Касимбекова – PhD, фармацевтік өндірістің технологиясы кафедрасының доцент м.а., «Оңтүстік Қазақстан Медицина академиясы» АҚ, Шымкент қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: k.m.dauletbekovna@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6865-2003.

Информация об авторах

Жанна Хожановна Оспанова* – кандидат биологических наук, PhD, исполняющая обязанности доцента; Центрально-Азиатский инновационный университет; Шымкентский университет, г. Шымкент, Республика Казахстан; e-mail: zhannaospanova4@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-3752-7853.

Лаззат Каликбаевна Асамбаева – кандидат биологических наук, старший преподаватель, Шымкентский университет, Республика Казахстан; e-mail: asambayeva.lazzat@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-2081-0935.

Жанар Шерахметовна Рахимбердиева – Южно-Казахстанский университет имени М. Ауэзова; Шымкентский университет, г. Шымкент, Республика Казахстан; e-mail: rakhimberdiyeva80@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9752-5986.

Мереке Даулетбековна Касимбекова – PhD, исполняющая обязанности доцента кафедры технологии фармацевтического производства, Южно-Казахстанская медицинская академия, г. Шымкент, Республика Казахстан; e-mail: k.m.dauletbekovna@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6865-2003.

Information about the authors

Zhanna Khozhanovna Ospanova* – Candidate of Biological Sciences (PhD), Acting Associate Professor, Central Asian Innovation University; Shymkent University, Shymkent, Republic of Kazakhstan; e-mail: zhannaospanova4@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-3752-7853.

Lazzat Kalikbaevna Asambaeva – Candidate of Biological Sciences, Senior Lecturer; Shymkent University, Republic of Kazakhstan; e-mail: asambayeva.lazzat@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-2081-0935.

Zhanar Sherakhmetovna Rakhimberdieva – M. Auezov South Kazakhstan University; Shymkent University, Republic of Kazakhstan; e-mail: rakhimberdiyeva80@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9752-5986.

Mereke Dauletbekovna Kassimbekova – PhD, Acting Associate Professor of the Department of Pharmaceutical Production Technology, South Kazakhstan Medical Academy, Shymkent, Republic of Kazakhstan; e-mail: k.m.dauletbekovna@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6865-2003.

Редакцияға енуі 05.01.2026
Өңдеуден кейін түсуі 24.02.2026
Жариялауға қабылданды 25.02.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-46

CC BY 4.0
Check for updates

ҒТАХР: 65.53.03

Ә.М. Айтпан[1], Э.К. Асембаева[1*], А.Е. Рябова[2], А.Ж. Божбанов[1], А.Б. Есенова[1]
[1]Алматы технологиялық университеті
050012, Қазақстан Республикасы, Алматы қаласы, Төле би көшесі 100
[2]Бүкілресейлік сүт өнеркәсібі ғылыми-зерттеу институты
115093, Ресей, Мәскеу қаласы, Лусиновская көшесі 35
*e-mail: asembayevae@bk.ru

ZIZIPHUS JUJUBA MILL. ЖЕМІСТЕРІНІҢ ҰНТАҒЫ – ФУНКЦИОНАЛДЫҚ ӨСІМДІК ИНГРЕДИЕНТІ

Аңдатпа: *Бұл мақаладағы зерттеу жұмысы Ziziphus jujuba Mill. (унаби, зизифус) жемістерінен алынған ұнтақты функционалдық өсімдік ингредиенті ретіндегі тағамдық және биологиялық құндылығын кешенді бағалауға арналған. Зерттеу нысаны ретінде Алматы облысы, Шелек ауданында өсірілген зизифус жемістері пайдаланылды. Жемістер 45 °С температурада дегидратацияланып, ұнтақ түрінде өңделді.*

Ұнтақтың физика-химиялық құрамы стандартталған әдістер бойынша анықталды: ылғалдылығы 6,31%, көмірсу мөлшері 67,12%, тағамдық талшықтар 8,66%, ақуыз 5,62% және май 3,63% құрады. Төмен ылғалдылық деңгейі ұнтақтың сақтау тұрақтылығын арттыратыны

©Ә.М. Айтпан, Э.К. Асембаева, А.Е. Рябова, А.Ж. Божбанов, А.Б. Есенова, 2026

анықталды. В тобы дәрумендері мен С дәрумені капиллярлық электрофорез әдісімен, ал минералдық құрамы атомды-адсорбциялық спектрометрия арқылы талдау жүргізілді.

Алынған нәтижелер зизифус ұнтағының калийге бай (657,38 мг/100 г), сондай-ақ кальций, фосфор, магний және темірдің елеулі мөлшерін қамтитынын көрсетті. С дәрумені (39,57 мг/100 г) мен флавоноидтардың (0,74%) жоғары деңгейі оның айқын антиоксиданттық әлеуетін дәлелдейді.

Алынған деректер Ziziphus jujuba жемістерінің ұнтағын функционалдық тағам өнімдері мен биологиялық белсенді қоспалар өндірісінде қолдануға перспективалы өсімдік тектес ингредиент ретінде қарастыруға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: *Ziziphus jujuba, зизифус, жеміс ұнтағы, функционалдық тағам ингредиенті, физика-химиялық көрсеткіштер, биологиялық белсенді заттар, флавоноидтар.*

Кіріспе

Унаби, зизифус немесе қытай құрмасы деген атаулармен белгілі *Ziziphus jujuba* Mill. *Rhamnaceae* тұқымдасына жататын және Шығыс пен Орталық Азия аймақтарында кеңінен өсірілетін бағалы жеміс дақылы болып табылады. Соңғы жылдары бұл өсімдікке деген ғылыми қызығушылық оның күрделі химиялық құрамы мен көпқырлы биологиялық белсенділігін айқындайтын ғылыми деректердің айтарлықтай артуымен байланысты күшейе түсті. *Z. jujuba* жемістері фенолды қосылыстарға, флавоноидтарға, полисахаридтерге, тритерпенді құрылымды қосылыстарға, сондай-ақ аскорбин қышқылына бай болып келеді. Аталған биологиялық белсенді компоненттер жемістің функционалдық тағамдық, пребиотикалық және фармакологиялық қасиеттерін айқындайды [1-4].

Заманауи эксперименттік зерттеулер Z. jujuba құрамындағы биологиялық белсенді компоненттердің айқын антиоксиданттық және қабынуға қарсы әсерге ие екенін, сондай-ақ иммундық жауапты модуляциялауға және метаболикалық үдерістердің реттелуіне қатысатынын көрсетеді. Клиникалық сынаққа дейінгі зерттеулерде жеміс экстракттарының бос радикалдық тізбекті реакцияларды бәсеңдетіп, эндогендік антиоксиданттық жүйелердің белсенділігін арттыру нәтижесінде тотығу күйзелісін төмендететіні анықталған. Сонымен қатар, Z. jujuba экстракттарының қабыну үдерісіне қатысатын медиаторлардың түзілуін бәсеңдетуге ықпал ететіні дәлелденген [1, 5-8].

Өсімдіктің биологиялық әлеуеті туралы қосымша мәліметтерді молекулалық-генетикалық және пластомдық зерттеулер қамтамасыз етеді. Аталған зерттеу тәсілдері түрішілік өзгергіштікті бағалауға, сондай-ақ өсімдік шикізатын стандарттаудың ғылыми негіздерін айқындауға мүмкіндік береді [2].

Z. jujuba жемістерін жаңа піскен күйінде қолдану олардың сақтау тұрақтылығының төмендігімен шектеледі. Қоршаған орта жағдайында сақтау барысында жемістердің жарамдылық мерзімі, әдетте, үш айдан аспайды, ал төмен температурада сақтау аскорбин қышқылының деградациясымен және антиоксиданттық белсенділіктің төмендеуімен қатар жүреді. Осыған байланысты жемістерді кептірілген ұнтақ түріне өңдеу биологиялық белсенді компоненттердің тұрақтылығын арттыруға және өнімді тағамдық әрі нутрицевтикалық индустрияларда қолдану аясын кеңейтуге бағытталған ұтымды технологиялық тәсіл ретінде қарастырылады [9].

Қазіргі уақытта Z. jujuba жемістерінен ұнтақ алу үшін дегидратацияның әртүрлі әдістері, соның ішінде күн көзінде кептіру, микротолқынды және лиофильді кептіру кеңінен қолданылады. Әдеби деректерді талдау микротолқынды кептіру әдісінің фенолды қосылыстар мен жалпы антиоксиданттық белсенділікті сақтауда баламалы тәсілдермен салыстырғанда анағұрлым тиімді екенін көрсетеді. Нәтижесінде полифенолдар мен флавоноидтардың жоғары концентрациясымен сипатталатын, айқын функционалдық әлеуетке ие өнім алынады [9, 10].

Z. jujuba жемістерінің ұнтағы құрамында болатын фенолды қосылыстар мен флавоноидтар оттегінің белсенді түрлерін бейтараптандыру қабілетін көрсетеді және қабынулық әрі иммундық реакциялардың реттелуіне қатысады. Аталған қасиеттер бұл өсімдік тектес ингредиентті созылмалы тотығу күйзелісімен байланысты патологиялық жағдайлардың алдын алу мақсатында қолданудың перспективалылығын айқындайды [1, 11]. Сонымен қатар, эксперименттік зерттеулер көрсеткендей, *Z. jujuba* ұнтағын тағам өнімдерінің рецептурасына қосу олардың физика-химиялық, реологиялық және органолептикалық қасиеттеріне жағымды әсер етеді, бұл жағдайда биологиялық белсенділіктің төмендеуі байқалмайды [9].

Осылайша, Ziziphus jujuba жемістерінің ұнтағы биологиялық белсенді заттардың жоғары функционалдық қасиеттеріне ие перспективалы табиғи көзі болып табылады. Оның

антиоксиданттық қасиеттерін, тағамдық құндылығын және технологиялық сипаттамаларын кешенді бағалау, сондай-ақ стандарттау және сапаны бақылау тәсілдерін әзірлеу қазіргі заманғы зерттеулердің өзекті бағыттары болып саналады [9].

Зерттеу мақсаты: *Ziziphus jujuba* Mill. жемістерінің ұнтағын жоғары биологиялық белсенділікке ие функционалдық өсімдік ингредиенті ретінде кешенді бағалау.

Зерттеу нысаны мен әдістері.

Зерттеу нысаны ретінде Алматы облысы, Шелек ауданында өсетін зизифус (*Ziziphus jujuba Mill*) жемістері алынды (сурет 1). Ең алдымен жемістер алдын-ала жуылып, сүйегінен ажыратылды. Сүйектен ажырып екіге бөлінген зизифус жемісі электрлік азық-түлік кептіргіште (дегидраторда) 45° С температурада 12 сағат кептіреді. Жемістерді дегидратациялау үшін 45 °С температураның таңдалуы биологиялық белсенді қосылыстардың, әсіресе аскорбин қышқылы мен фенолды компоненттердің термотұрақтылығын сақтау қажеттілігімен негізделді. Әдеби деректерге сәйкес, 50-60 °С-тан жоғары температурада С дәруменінің ыдырау жылдамдығы артады, ал 40 °С-тан төмен температураларда кептіру уақытының ұзаруы өнімде қалдық ылғалдылықтың сақталуына және сақтау тұрақтылығының төмендеуіне әкелуі мүмкін [6, 9]. Кептірілген *Ziziphus jujuba* жемістері Retsch GM 200 зертханалық пышақты диірменде шамамен 1-2 минут ұнтақталды. Ұнтақталған *Ziziphus jujuba* жемісінің шикізаты 0,5 мм тесігі бар електен өткізілді.



А Б

Сурет 1 – *Ziziphus jujuba Mill* жемісі (А) мен ұнтағы (Б)

Ziziphus jujuba жемістеріндегі ақуыздың массалық үлесін Кьельдал әдісі арқылы анықталды. Бұл әдіс азот мөлшерін анықтауға негізделген және тағамдық өнімдерде жалпы ақуыз құрамын есептеуде кеңінен қолданылады.

Майдың массалық үлесі Сокслет әдісі бойынша анықталды, ол органикалық еріткіштерді пайдалана отырып, үлгіден майлы заттарды бөліп алуға мүмкіндік береді.

Көмірсудың массалық үлесі перманганатометриялық әдіспен калий перманганатын қолдана отырып есептелді, бұл жалпы көмірсу құрамын сандық тұрғыда анықтауға мүмкіндік береді.

Зерттелетін үлгілердегі ылғалдың массалық үлесі МЕМСТ Р 54951-2012 стандартына сәйкес стандартты гравиметриялық әдіспен анықталды, онда үлгілерді тұрақты массаға жеткенше кептіреді.

Тағамдық талшықтың массалық үлесі МЕМСТ 31675-2012 стандартына сәйкес ферментативті-гравиметриялық әдіспен анықталды].

В тобы дәрумендері (B_1, B_2, B_3, B_5, B_6) және С дәруменінің мөлшері МЕМСТ 31483-2012 стандартына сәйкес капиллярлық электрофорез әдісімен «Капель-105» талдау аторы арқылы анықталды [13].

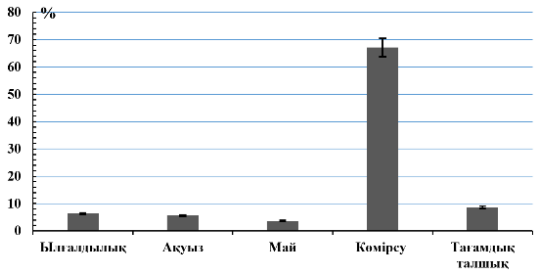
Зерттелетін үлгілердің минералдық құрамы МЕМСТ 32343-2013 стандартына сәйкес атомды-адсорбционды спектрометриялық әдісімен зерттелді.

Флавоноидтардың құрамын спектрофотометриялық әдіспен стандартты калибровка тәуелділіктерін қолдана отырып анықталды.

Кешенді талдау барысында орындалған барлық физика-химиялық және биохимиялық талдаулар Алматы технологиялық университеті жанындағы Тамақ қауіпсіздігін ғылыми-зерттеу институтының заманауи құралдармен жабдықталған аккредиттелген зертханаларында қолданыстағы нормативтік құжаттар мен стандартталған әдістемелерге сәйкес жүргізілді.

Зерттеу нәтижелері және талқылау

Зерттеу мақсатына сәйкес Ziziphus jujuba Mill. жемістерінің ұнтағы жоғары биологиялық белсенділікке ие функционалдық өсімдік ингредиенті ретінде кешенді түрде бағаланды. Зерттеу барысында ұнтақтың негізгі физика-химиялық көрсеткіштеріне талдау жүргізілді, нәтижелері 2-суретте келтірілген.



Сурет 2 – *Ziziphus jujuba* ұнтағының физика-химиялық көрсеткіштерінің массалық үлесі, %

Физика-химиялық көрсеткіштерді зерттеу нәтижелері көрсеткендей, *Ziziphus jujuba* ұнтағы төмендегідей негізгі компоненттерге ие: ылғалдылық – 6,31 ± 0,02 %, ақуыз – 5,62 ± 0,01 %, май – 3,63 ± 0,01 %, көмірсу – 67,12 ± 0,85 %, тағамдық талшық – 8,66 ± 0,08 %.

Салыстырмалы талдау көрсеткендей, Rashwan et al. (2020) зерттеуінде *Ziziphus jujuba* жемісінің құрамында ақуыз 4,8-6,0%, май 3,5-4,0%, көмірсу 60-70% және тағамдық талшық 7-9% аралығында өзгеретіндігі анықталған [10]. Бұл біздің алынған мәліметтермен толық сәйкес келеді, әсіресе көмірсу мен тағамдық талшық көрсеткіштері. Elaloui et al. (2023) жұмысына сәйкес, зизифус ұнтағының ылғалдылығы 5-7% аралығында болып, микротолқынды кептіру кезінде антиоксиданттық белсенділікті сақтауға мүмкіндік береді [9]. Бұл біздің нәтижелердегі ылғалдылықпен тікелей сәйкес келеді (6,31%).

Ақуыз және май көрсеткіштері бойынша біздің талдау нәтижелеріміз Rashwan et al. (2020) және Elaloui et al. (2023) зерттеулерімен салыстырғанда аздап жоғары немесе төмен болуы кептіру технологиясы мен ұнтақтың алынаған бастапқы шикізатының ерекшеліктеріне байланысты болуы мүмкін [10, 11].

Тағамдық талшықтардың мөлшері (8,66%) басқа ғалымдардың жұмыстарымен салыстырғанда ұқсас диапазонда болып, бұл ұнтақтың ішек микрофлорасына жағымды әсері мен сіңімділігін жақсартатындығын көрсетеді [9, 10]. Сонымен қатар, ылғалдылықтың төмен болуы ұнтақтың сақтау мерзімін ұзартуға мүмкіндік береді, ал көмірсу мен талшықтың жоғары мөлшері функционалды өнімдерде қолдану үшін маңызды көрсеткіш болып табылады.

Зерттеу барысында *Ziziphus jujuba* жемісінің ұнтағының құрамындағы В тобындағы дәрумендер мен негізгі минералды элементтердің мөлшері анықталды, нәтижелері 1,2-кестерлерде келтірілген. В тобы дәрумендерінің мөлшері МЕМСТ 31483-2012 талаптарына сәйкес «Капель-105» капиллярлық электрофорез талдау аторының көмегімен жүргізілді.

Кесте 1 – *Ziziphus jujuba* ұнтағындағы В тобының дәрумендері (мг/100г**)**

Дәрумендер (мг/100г)				
B_1 (тиамин)	B_2 (рибофлавин)	B_3 (ниацин)	B_5 (пантотен қышқылы)	B_6 (пиридоксин)
0,054±0,011	0,108±0,045	2,43±0,486	0,083±0,015	0,216±0,043

Кесте 2 – *Ziziphus jujuba* ұнтағындағы минералды элементтер (мг/100г)

Минералды элементтер	Массалық үлесі мг/100г
Калий (K)	657,38±12,49
Кальций (Ca)	53,11±0,74
Магний (Mg)	25,69±0,39
Натрий (Na)	10,81±0,16
Фосфор (P)	62,25±0,93
Темір (Fe)	1,92±0,029
Мырыш (Zn)	0,14±0,002

Зерттелген *Ziziphus jujuba* ұнтағында В тобы дәрумендерінің мөлшері 0,054-2,43 мг/100 г аралығында өзгеретіні анықталды.

B_1 дәруменінің мөлшері 0,054±0,011 мг/100г құрады. Бұл көрсеткіш өсімдік текті ұнтақталған өнімдер үшін тән деңгейде және көмірсу алмасуын қамтамасыз етудегі тиаминнің қосымша көзі бола алатынын көрсетеді. B_2 дәруменінің мөлшері 0,108±0,045 мг/100г деңгейінде анықталды, бұл оның энергия алмасуына және тотығу-тотықсыздану процестеріне қатысуын қамтамасыз ететінін дәлелдейді. B_3 дәрумені ең жоғары концентрацияда болды – 2,43±0,486 мг/100г. Бұл *Ziziphus jujuba* ұнтағының В тобы дәрумендері ішіндегі негізгі үлесті ниацин алатынын көрсетеді. Ниациннің жоғары мөлшері жасушалық тыныс алу процестеріне, НАД және НАДФ коферменттерінің түзілуіне қатысуымен маңызды. B_5 дәруменінің мөлшері 0,083±0,015 мг/100г құрады. Бұл дәрумен коэнзим А құрамына кіріп, май қышқылдарының, ақуыздар мен көмірсулардың алмасуында маңызды рөл атқарады. B_6 дәруменінің мөлшері 0,216±0,043 мг/100г деңгейінде анықталып, аминқышқылдарының метаболизміне қатысатын биологиялық белсенді компонент ретінде сипатталады.

Жалпы алғанда, *Ziziphus jujuba* ұнтағы В тобы дәрумендерінің кешенін қамтитын өнім болып табылады, әсіресе ниациннің салыстырмалы түрде жоғары концентрациясымен ерекшеленеді. Дәрумендердің сақталуы ұнтақтың төмен ылғалдылығы мен өңдеу технологиясымен байланысты болуы мүмкін.

Талдау нәтижелері көрсеткендей *Ziziphus jujuba* ұнтағы жоғары концентрацияда минералды элементтерді қамтиды. Ең жоғары концентрация калийге (K) тиесілі болды – 657,38 ± 12,49 мг/100г. Калий жасушаішілік осмостық қысымды реттеуде, жүрек-қантамыр және жүйке жүйесінің қалыпты қызметін қамтамасыз етуде маңызды элемент болып табылады. Зизифус ұнтағындағы калийдің жоғары мөлшері оны калийге бай функционалдық өнім ретінде қарастыруға мүмкіндік береді.

Фосфордың (P) мөлшері 62,25±0,93 мг/100г, ал кальцийдің (Ca) мөлшері 53,11±0,74 мг/100г мөлшерінде болды. Бұл элементтер сүйек тінінің түзілуінде, энергия алмасу процестерінде және жасушалық құрылымдардың тұрақтылығын сақтауда маңызды рөл атқарады. Кальций мен фосфордың бірлескен болуы зизифус ұнтағының минералдық тепе-теңдігін арттырады.

Магнийдің (Mg) мөлшері 25,69±0,39 мг/100г құрады. Магний көптеген ферменттердің кофакторы болып табылады және көмірсу, ақуыз, липид алмасу процестеріне қатысады. Оның жеткілікті деңгейі зизифус ұнтағының биологиялық құндылығын арттырады.

Натрийдің (Na) мөлшері салыстырмалы түрде төмен (10,81±0,16 мг/100г). Төмен натрий мөлшері калийдің жоғары мөлшерімен үйлесіп, жүрек-қантамыр жүйесіне оң әсер етуі мүмкін.

Микроэлементтер ішінде темір (Fe) мөлшері 1,92±0,029 мг/100г болды, бұл гемоглобин түзілуіне және оттегіні тасымалдауға қажетті элемент ретінде зизифус ұнтағының тағамдық маңызын арттырады. Мырыштың (Zn) мөлшері 0,14±0,002 мг/100г құрап, ферменттік жүйелердің, иммундық жауаптың және ақуыз синтезінің қалыпты жүруіне ықпал етеді.

Жалпы алғанда, *Ziziphus jujuba* ұнтағы калийге бай, кальций, фосфор және магний сияқты маңызды макроэлементтерді, сондай-ақ темір мен мырыш секілді микроэлементтерді қамтитын табиғи минералдық кешен болып табылады.

Ziziphus jujuba жемістерінің ұнтағындағы биологиялық белсенді заттардың құрамы оның функционалдық және антиоксиданттық қасиеттерін айқындайтын негізгі факторлардың бірі болып табылады. Әсіресе аскорбин қышқылы мен флавоноидтардың мөлшері ұнтақтың тотығу үдерістерін тежеуге және тағамдық құндылығын арттыруға ықпал етуі мүмкін. Осы көрсеткіштер бойынша алынған эксперименттік деректер төмендегі 3-кестеде берілген.

Кесте 3 – *Ziziphus jujuba* ұнтағындағы биологиялық белсенді заттар

Көрсеткіштер	*Ziziphus jujuba*
С дәрумені, мг /100 г	39,57±0,08
Флавоноидтар, %	0,74±0,01

Ziziphus jujuba жемістерінің ұнтағында С дәруменінің мөлшері 39,57 ± 0,08 мг/100г мөлшерінде анықталды, бұл өңделген өсімдік шикізаты үшін салыстырмалы түрде жоғары көрсеткіш болып табылады. Аскорбин қышқылының мұндай мөлшері ұнтақтың антиоксиданттық қасиетін арттырып, оның функционалдық тағам ингредиенті ретіндегі маңызын көрсетеді.

Флавоноидтардың мөлшері 0,74 ± 0,01 % құрап, Ziziphus jujuba ұнтағының фенолды табиғаттағы биологиялық белсенді қосылыстарға бай екенін дәлелдейді. Флавоноидтар мен С дәруменінің бірлескен болуы ұнтақтың тотығу-тотықсыздану үдерістерін тежеуге қабілетті екенін көрсетіп, оны функционалдық және нутрицевтикалық өнімдерде қолданудың перспективалылығын негіздейді.

Қорытынды. Қорытындылай келе, жүргізілген зерттеу нәтижелері *Ziziphus jujuba Mill.* жемістерінің ұнтағының жоғары тағамдық құндылыққа және биологиялық белсенді заттардың елеулі мөлшеріне ие екенін көрсетті. Физика-химиялық құрамының, дәрумендік және минералдық кешенінің теңгерімділігі оны функционалдық тағам өнімдері мен биологиялық белсенді қоспалар өндірісінде қолдануға перспективалы өсімдік тектес ингредиент ретінде сипаттайды. Алынған деректер зерттелген ұнтақтың технологиялық тұрғыдан жарамды екенін және тағам өнеркәсібінде кеңінен пайдалануға негіз бар екенін дәлелдейді.

Ұнтақтың төмен ылғалдылығы сақтау тұрақтылығын қамтамасыз етсе, көмірсу, тағамдық талшық, калий және антиоксиданттық қосылыстардың жоғары мөлшері оны сүт өнімдері, нан-тоқаш және кондитерлік өнімдер, функционалдық сусындар, құрғақ қоспалар мен нутрицевтикалық өнімдер өндірісінде тиімді қолдануға мүмкіндік береді.

Әдебиеттер тізімі

1. A literature review of the pharmacological effects of jujube / D. Zhu et al // Foods. – 2024. – Vol. 13, № 2. – P. 193. https://doi.org/10.3390/foods13020193.
2. A comparative plastomic analysis of Ziziphus jujuba var. spinosa (Bunge) Hu ex HF Chow and implication of the origin of Chinese jujube / S. Du et al // AoB Plants. – 2023. – Vol. 15, № 2. – P. plad006. https://doi.org/10.1093/aobpla/plad006.
3. Physicochemical properties and prebiotic activities of polysaccharides from Zizyphus jujube based on different extraction techniques / X. Zou et al // International Journal of Biological Macromolecules. – 2022. – Vol. 223. – P. 663-672. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.11.057.
4. Metagenomic analysis of gut microbiota modulatory effects of jujube (Ziziphus jujuba Mill.) polysaccharides in a colorectal cancer mouse model / X. Ji et al // Food & function. – 2020. – Vol. – № 1. – P. 163-173. https://doi.org/10.1039/C9FO02171J.
5. Effects of jujube (Ziziphus jujuba mill.) fruit extracts on oxidative stress: A systematic review and meta-analysis of rodent studies / D. Zhu et al // Food Science & Nutrition. – 2024. – № 8. – P. 5312-5328. https://doi.org/10.1002/fsn3.4234/
6. Сухарева И.А. Перспективы применения биологических свойств зизифуса в лечении и профилактике ряда заболеваний / И.А. Сухарева, Э.Ш. Мустафаева, И.И. Фомочкина // Таврический медико-биологический вестник. – 2022. – Т. 25, № 4. – С. 75-81. https://doi.org/10.29039/2070-8092-2022-25-4-75-81.
7. Фармакогностическое изучение плодов Ziziphus Jujuba Mill / Ю.В. Асатуров и др. // Медико-фармацевтический журнал «Пульс». – 2023. – Т. 25, № 6. – С. 58-67. http://dx.doi.org//10.26787/nydha-2686-6838-2023-25-6-58-67.
8. Химический состав, биологическая активность и перспективы медицинского применения плодов зизифуса настоящего / Е.Б. Никифорова и др. // Вопросы биологической, медицинской и фармацевтической химии. – 2023. – Т. 26(8) – С. 3-11. https://doi.org/10.29296/25877313-2023-08-01.
9. Effect on Ziziphus jujuba Mill. fruit powders embedded on physicochemical properties, biological activities, and rheologic quality of cake / M. Elaloui et al // Food Science & Nutrition. – 2023. – Vol. 11, № 6. – P. 2942-2955. https://doi.org/10.1002/fsn3.3276.
10. Jujube fruit: A potential nutritious fruit for the development of functional food products / A.K. Rashwan et al // Journal of Functional Foods. – 2020. – Vol. 75. – P. 104205. https://doi.org/10.1016/j.jff.2020.104205.
11. Characterization of epicathechin contents in the Ziziphus spina-christi L. root extracts using LC-MS analyses and their insecticidal potential / M. Elaloui et al // Plant Biosystems-An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology. – 2021. – Vol. 155, № 4. – P. 685-690. https://doi.org/10.1080/11263504.2020.1779837.
12. The grade of dried jujube (Ziziphus jujuba Mill. cv. Junzao) affects its quality attributes, antioxidant activity, and volatile aroma components / Z. Wu et al // Foods. – 2023. – Vol. 12, № 5. – P. 989. https://doi.org/10.3390/foods12050989.

References

1. A literature review of the pharmacological effects of jujube / D. Zhu et al // Foods. – 2024. – Vol. 13, № 2. – R. 193. https://doi.org/10.3390/foods13020193. (In English).
2. A comparative plastomic analysis of Ziziphus jujuba var. spinosa (Bunge) Hu ex HF Chow and implication of the origin of Chinese jujube / S. Du et al // AoB Plants. – 2023. – Vol. 15, № 2. – R. plad006. https://doi.org/10.1093/aobpla/plad006. (In English).
3. Physicochemical properties and prebiotic activities of polysaccharides from Zizyphus jujube based on different extraction techniques / X. Zou et al // International Journal of Biological Macromolecules. – 2022. – Vol. 223. – R. 663-672. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.11.057. (In English).
4. Metagenomic analysis of gut microbiota modulatory effects of jujube (Ziziphus jujuba Mill.) polysaccharides in a colorectal cancer mouse model / X. Ji et al // Food & function. – 2020. – Vol. – № 1. – R. 163-173. https://doi.org/10.1039/C9FO02171J. (In English).
5. Effects of jujube (Ziziphus jujuba mill.) fruit extracts on oxidative stress: A systematic review and meta-analysis of rodent studies / D. Zhu et al // Food Science & Nutrition. – 2024. – № 8. – R. 5312-5328. https://doi.org/10.1002/fsn3.4234/. (In English).
6. Sukhareva I.A. Perspektivy primeneniya biologicheskikh svoistv zizifusa v lechenii i profilaktike ryada zabolevanii / I.A. Sukhareva, EH.SH. Mustafaeva, I.I. Fomochkina // Tavricheskii mediko-biologicheskii vestnik. – 2022. – T. 25, № 4. – S. 75-81. https://doi.org/10.29039/2070-8092-2022-25-4-75-81. (In Russian).
7. Farmakognosticheskoe izuchenie plodov Ziziphus Jujuba Mill / YU.V. Asaturov i dr. // Mediko-farmatsevticheskii zhurnal «Pul'S». – 2023. – T. 25, № 6. – S. 58-67. http://dx.doi.org//10.26787/nydha-2686-6838-2023-25-6-58-67. (In Russian).
8. Khimicheskii sostav, biologicheskaya aktivnost' i perspektivy meditsinskogo primeneniya plodov zizifusa nastoyashchego / E.B. Nikiforova i dr. // Voprosy biologicheskoi, meditsinskoi i farmatsevticheskoi khimii. – 2023. – T. 26(8) – S. 3-11. https://doi.org/10.29296/25877313- 2023-08-01. (In Russian).
9. Effect on Ziziphus jujuba Mill. fruit powders embedded on physicochemical properties, biological activities, and rheologic quality of cake / M. Elaloui et al // Food Science & Nutrition. – 2023. – Vol. 11, № 6. – R. 2942-2955. https://doi.org/10.1002/fsn3.3276. (In English).
10. Jujube fruit: A potential nutritious fruit for the development of functional food products / A.K. Rashwan et al // Journal of Functional Foods. – 2020. – Vol. 75. – R. 104205. https://doi.org/10.1016/j.jff.2020.104205. (In English).
11. Characterization of epicathechin contents in the Ziziphus spina-christi L. root extracts using LC-MS analyses and their insecticidal potential / M. Elaloui et al // Plant Biosystems-An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology. – 2021. – Vol. 155, № 4. – R. 685-690. https://doi.org/10.1080/11263504.2020.1779837. (In English).
12. The grade of dried jujube (Ziziphus jujuba Mill. cv. Junzao) affects its quality attributes, antioxidant activity, and volatile aroma components / Z. Wu et al // Foods. – 2023. – Vol. 12, № 5. – R. 989. https://doi.org/10.3390/foods12050989. (In English).

А.М. Айтпан[1], Э.К. Асембаева[1]*, А.Е. Рябова[2], А.Ж. Божбанов[1], А.Б. Есенова[1]

[1]Алматинский технологический университет

050012, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Толе би, 100

[2]Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности,

115093, Россия, г. Москва, ул. Люсиновская 35

*e-mail: asembayevae@bk.ru

ПОРОШОК ПЛОДОВ *ZIZIPHUS JUJUBA* MILL. КАК ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ РАСТИТЕЛЬНЫЙ ИНГРЕДИЕНТ

В данной статье представлены результаты исследования, посвящено комплексной оценке пищевой и биологической ценности порошка, полученного из плодов Ziziphus jujuba Mill. (унаби, зизифус), как функционального растительного ингредиента. В качестве объекта исследования использовались плоды Ziziphus jujuba, выращенные в Шелекском районе Алматинской области. Плоды подвергали дегидратации при температуре 45°С с последующим измельчением до порошкообразного состояния.

Физико-химический состав порошка определяли с использованием стандартизированных методов: массовая доля влаги составила 6,31%, углеводов – 67,12%, пищевых волокон – 8,66%, белка – 5,62% и жира – 3,63%. Установлено, что низкое содержание влаги способствует повышению стабильности порошка при хранении. Витамины группы В и витамин С определяли методом капиллярного электрофореза, а минеральный состав – методом атомно-абсорбционной спектрометрии.

Результаты показали, что порошок зизифуса характеризуется высоким содержанием калия (657,38 мг/100 г), а также значительными количествами кальция, фосфора, магния и железа. Высокие уровни витамина С (39,57 мг/100 г) и флавоноидов (0,74%) подтверждают его выраженный антиоксидантный потенциал.

Полученные данные позволяют рассматривать порошок плодов Ziziphus jujuba как перспективный растительный ингредиент для использования в производстве функциональных пищевых продуктов и биологически активных добавок.

Ключевые слова: Ziziphus jujuba*, унаби, порошок плодов, функциональный пищевой ингредиент, физико-химические показатели, биологически активные вещества, флавоноиды.*

A.M. Aitpan[1], E.K. Assembayeva[1*], A.E. Ryabova[2], A. Bozhbanov[1], A.B. Yessenova [1]
Almaty Technological University,
050012, Republic of Kazakhstan, Almaty, Tole Bi street 100
All-Russian Dairy Research Institute,
115093, Russia, Moscow, Lyusinovskaya street 35
*e-mail: asembayevae@bk.ru

ZIZIPHUS JUJUBA MILL. FRUIT POWDER AS A FUNCTIONAL PLANT INGREDIENT

The research presented in this article is devoted to a comprehensive evaluation of the nutritional and biological value of powder obtained from Ziziphus jujuba Mill. (jujube) fruits as a functional plant-based ingredient. Fruits grown in the Shelek district of the Almaty region were used as the research object. The fruits were dehydrated at a temperature of 45 °C and processed into powder form.

The physicochemical composition of the powder was determined using standardized methods: moisture content was 6.31%, carbohydrates 67.12%, dietary fiber 8.66%, protein 5.62%, and fat 3.63%. The low moisture content was found to contribute to improved storage stability of the powder. B-group vitamins and vitamin C were analyzed by capillary electrophoresis, while the mineral composition was determined by atomic absorption spectrometry.

The results showed that jujube powder is rich in potassium (657.38 mg/100 g) and contains significant amounts of calcium, phosphorus, magnesium, and iron. The high levels of vitamin C (39.57 mg/100 g) and flavonoids (0.74%) confirm its pronounced antioxidant potential.

The obtained data indicate that Ziziphus jujuba fruit powder can be considered a promising plant-based ingredient for use in the production of functional food products and dietary supplements.

Key words: *Ziziphus jujuba, jujube, fruit powder, functional food ingredient, physicochemical properties, biologically active compounds, flavonoids.*

Авторлар туралы мәліметтер

Әсем Мухамбетқызы Айтпан – 2 курс докторанты, Алматы технологиялық университеті, «Тағамдық биотехнология» кафедрасы, Алматы, Қазақстан; e-mail: asem.aitpan@bk.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7512-601X.

Эльмира Куандыковна Асембаева* – PhD, Алматы технологиялық университеті, «Тағамдық биотехнология» кафедрасы, Алматы, Қазақстан; e-mail: asembayevae@bk.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7964-7736.

Анастасия Евгеньевна Рябова – техника ғылымдарының кандидаты, Бүкілресейлік сүт өнеркәсібі ғылыми-зерттеу институтының ғылыми қызметкері, Мәскеу қ., Ресей; e-mail: a_ryabova@vnimi.org. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5712-2020.

Алихан Жаксыбекович Божбанов – биология ғылымдарының кандидаты, Алматы технологиялық университеті, «Тағамдық биотехнология» кафедрасы, Алматы, Қазақстан; e-mail: bozhbanov2011@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/ 0000-0003-2139-4523.

Айдана Болатовна Есенова – техника ғылымының магистрі, Алматы технологиялық университеті, «Тағам өнімдерінің технологиясы» кафедрасы, Алматы, Қазақстан; e-mail: essenova_06.07@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6101-1446.

Сведения об авторах

Асем Мухамбетовна Айтпан – докторант 2 курса, Алматинский технологический университет, кафедра «Пищевая биотехнология», Алматы, Казахстан; e-mail: asem.aitpan@bk.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7512-601X.

Эльмира Куандыковна Асембаева* – PhD, Алматинский технологический университет, кафедра «Пищевая биотехнология», Алматы, Казахстан; e-mail: asembayevae@bk.ru. ORCID: https://orcid.org / 0000-0001-7964-7736.

Анастасия Евгеньевна Рябова – кандидат технических наук, научный сотрудник ФГАНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности», Москва, Россия; e-mail: a_ryabova@vnimi.org. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5712-2020.

Алихан Жаксыбекович Божбанов – кандидат биологических наук, Алматинский технологический университет, кафедра «Пищевая биотехнология», Алматы, Казахстан, e-mail: bozhbanov2011@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/ 0000-0003-2139-4523.

Айдана Болатовна Есенова – магистр технических наук, Алматинский технологический университет, кафедра «Технология продуктов питания», Алматы, Казахстан; e-mail: essenova_06.07@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6101-1446.

Information about the authors

Asem Mukhambetovna Aitpan – 2nd year doctoral student, Almaty Technological University, Department of Food Biotechnology, Almaty, Kazakhstan; e-mail: asem.aitpan@bk.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7512-601X.

Elmira Kuandykovna Assembayeva* – PhD, Almaty Technological University, Department of Food Biotechnology, Almaty, Kazakhstan; e-mail: asembayevae@bk.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7964-7736.

Anastasia Evgenievna Ryabova – Candidate of Technical Sciences, Researcher at the All-Russian Scientific Research Institute of the Dairy Industry, Moscow, Russia; e-mail: a_ryabova@vnimi.org. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5712-2020.

Alikhan Bozhbanov – candidate of Biological Sciences, Almaty Technological University, Department of «Food Technology», Almaty, Kazakhstan; e-mail: bozhbanov2011@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/ 0000-0003-2139-4523.

Aidana Bolatovna Yessenova – master of Engineering Science, Almaty Technological University, Department of «Food technology «, Almaty, Kazakhstan; e-mail: 0000-0002-6101-1446.

Редакцияға енуі 05.01.2026
Өңдеуден кейін түсуі 26.02.2026
Жариялауға қабылданды 27.02.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-47

ҒТАХР: 68.41.29

CC BY 4.0
Check for updates

Ж.М. Атамбаева[1], Ж.С. Есимбеков[2], Г.А. Капашева[2]*
[1]Шәкәрім Университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қаласы, Глинки көшесі 20 А
[2]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, ЖАСЫЛ ҚАРАҚҰМЫҚ ЖӘНЕ СҰЛЫ ДӘНДЕРІН ӨНУ ҮРДІСІНДЕГІ ФИЗИКА-ХИМИЯЛЫҚ КӨРСЕТКІШТЕРІН ЗЕРТТЕУ

Аңдатпа: *Бұл зерттеу жұмысы бидай, жасыл қарақұмық және сұлы дәндерін өндіру барысында олардың физика-химиялық қасиеттерінің өзгерісін жан-жақты зерттеуге арналған. Зерттеудің негізгі мақсаты – өнген дәндердің сапалық және функционалды көрсеткіштерін бағалап, олардың тағамдық құндылығын арттыру және биологиялық белсенділігі жоғары өнімдер алу мүмкіндігін ғылыми негіздеу болып табылады.*

Зерттеу барысында дәндердің су белсенділігі, pH көрсеткіші, ылғалдылығы, органолептикалық сипаттамалары және функционалды-технологиялық қасиеттері анықталды. Сонымен қатар, өнген дәндерге сублимациялық кептіру әдісі қолданылып, ұнтақ түріндегі өнімдердің физика-химиялық және технологиялық көрсеткіштері зерттелді. Нәтижелерге сәйкес, жасыл қарақұмықтың су белсенділігі ең жоғары (0,9905) болып, оның массасының 200-ден 309

©Ж.М. Атамбаева[1], Ж.С. Есимбеков[2], Г.А. Капашева, 2026

граммға дейін өскені байқалды. Бұл дәннің сақтау тұрақтылығының жоғары және ылғалды жақсы сіңіретін қасиетінің көрсеткіші болып табылады. Сонымен қатар, бидай мен сұлы дәндері де белгілі бір технологиялық артықшылықтар көрсетті.

Зерттеу нәтижелері өсімдік шикізатын тиімді пайдалану бағытындағы жаңа технологияларды жетілдіруге, сондай-ақ тағам өнеркәсібінде функционалды және биологиялық құндылығы жоғары өнімдерді дамытуға үлкен үлес қосады. Бұл өнімдер тағамдық қоспа немесе табиғи ингредиент ретінде кеңінен қолданылуға мүмкіндік береді, сонымен қатар олардың қолданылуы өнімдердің сапасы мен қауіпсіздігін арттырады.

Түйін сөздер: *жасыл қарақұмық, бидай, сұлы өскіндері, су белсенділігі, ылғал ұстау қабілеті, мұздатып кептіру.*

Кіріспе

Өнген дәндер – бұл табиғи өнім, құрамында пайдалы заттар табиғи күйінде кездеседі. Өну үрдісінде дәннің құрамындағы табиғи ферменттер белсеніп, күрделі қосылыстарды қарапайым түрге дейін ыдыратады, бұл олардың ағзада жеңіл сіңуіне мүмкіндік береді. Өскіндерді үнемі тұтыну зат алмасуды жақсартады, иммундық жүйені нығайтады, қартаюды баяулатады, дәрумендер мен минералдардың жетіспеушілігін толықтырады [1].

Ағзаға сіңуіне кедергі келтіретін зиянды заттардың (мысалы, фитин қышқылы мен фермент ингибиторлары) мөлшері азайып [2, 3], ал пайдалы заттардың май қышқылдары мен флавоноидтардың мөлшері артады [4]. Дәнді өңдеудің әртүрлі әдістері ішінде өну антиоксиданттық белсенділікті арттырудың ең тиімді тәсілдерінің бірі болып саналады. Бұл әсіресе тотығу стрессімен байланысты аурулар диабет, семіздік және жүрек аурулары кезінде өте маңызды [5]. Өну дәндердің тағамдық құндылығын арттырады және жылумен өңделгеннен кейін де олар өнбеген дәндерге қарағанда пайдалы болып қала береді [6]. Өскіндердегі барлық пайдалы заттар табиғи мөлшерде кездеседі және олар ағзаға зиян келтірмей сіңеді, ал кейбір дәрі-дәрмектерден айырмашылығы ол қауіпсіз болып табылады. Өскіндердегі ферменттер күрделі қосылыстарды қарапайым түрге айналдырып, ағзада олардың тез сіңуін қамтамасыз етеді [1].

Дәннің химиялық құрамы оның тағамдық құндылығын айқындайтын маңызды қоректік заттарды қамтиды. Мысалы, бидай дәнінде 14,0% ылғал, 13,5% ақуыз және 2,7% май бар [7]. Негізгі дәрумендер (B, B2, B6, PP, H, C, A, E) алейрон қабатында және дәннің ұрығында шоғырланған. Минералдық заттар фосфор, калий, магний, кальций және кремний оксидтері түрінде кездеседі, олардың жалпы мөлшері 1,5-2,5% [8].

Қарақұмықта бағалы дәнді дақылдардың бірі болып табылады: оның құрамында 14,0% ылғал, 12,6% ақуыз және 2,6% май бар. Бұл дақылдар өсімдік тектес ақуыз бен майдың жақсы көздері, сондай-ақ функционалды және диеталық өнімдер өндірісінде кеңінен қолданылады. Қарақұмық жармасы ақуызға, B, PP және E дәрумендеріне бай, сонымен қатар рутин (P дәруменінің көзі) бар. Оның құрамында калий, магний, фосфор, темір, мыс және йод көп [9]. Қарақұмық ақуыздары аминқышқылдық құрамы жағынан теңестірілген және құрамында лизин мен треонин сияқты алмастырылмайтын аминқышқылдар бар. Қарақұмық рациондағы аминқышқылдардың теңдестірілуін қамтамасыз етеді, ал оның ақуызы адам ағзасында оңай сіңіріледі [10]. Биологиялық құндылығы жағынан қарақұмық ақуызы құрғақ сүттің (92,3%) және тауық жұмыртқасының (81,4-99,3%) ақуыздарына жақын [11]. Қарақұмық майларында алмастырылмайтын май қышқылдары мен E дәрумені бар, бұл қарақұмық жармасын ұзақ сақтауға мүмкіндік береді [12].

Сұлы жоғары майлылығымен сипатталады 6,2%, ылғалдылығы 13,5% және ақуыз мөлшері 10,0%. Сұлы өнімдерінің құрамында B тобы дәрумендері, макро- және микроэлементтер, сондай-ақ β-глюканды қоса алғанда тағамдық талшықтар бар. Сұлы ақуызы алмастырылмайтын аминқышқыл лизинге бай, ал ақуыз құрамының негізгі бөлігін глютелиндер құрайды, одан кейін проламиндер мен глобулиндер [9].

Өну үрдісінен кейін дәндегі ақуыздар адам ағзасы үшін әлдеқайда сіңімді бола түседі. Алмастырылмайтын аминқышқылдар құрамы бойынша өнген дәндер жануар текті ақуыздарға жақындай түсіп, олардың тағамдық құндылығы артады [8]. Өну барысында ақуыздық құрам өзгереді: лизин, триптофан және валин сияқты маңызды аминқышқылдар мөлшері артады [13]. Сондай-ақ B, C, E дәрумендерінің, ферменттер мен антиоксиданттардың мөлшері көбейеді. Зерттеулерге сәйкес, өнген қарақұмық жоғары антиоксиданттық белсенділікке және пайдалы заттардың биожетімділігіне ие болады [14].

Жалпы алғанда, дәнді дақылдарды өндіру олардың тағамдық құндылығын арттырады, себебі дәрумендер мен аминқышқылдардың мөлшері көбейеді. Өнген дәндер ағзаға жеңіл сіңіп, иммундық жүйені нығайтады, зат алмасуды жақсартады және қартаю процестерін баяулатады. Сонымен қатар, өнген дәндер функционалды тамақтанудың бағалы өнімі және түрлі аурулардың алдын алудың тиімді құралы болып табылады.

Осы жұмыстың мақсаты – бидай, жасыл қарақұмық және сұлы дәндерінің өну процесіндегі физика-химиялық көрсеткіштерінің өзгерісін зерттеу.

Зерттеу материалдары мен әдістері

Зерттеу нысандары ретінде әртүрлі өну кезеңдеріндегі бидай, жасыл қарақұмық және сұлы дәндері алынды.

Эксперимент жүргізу әдістемесі

Бидай, жасыл қарақұмық және сұлы дәндерінің физика-химиялық көрсеткіштерін зерттеу үшін келесі әдістеме қолданылды. Дәндер алдын ала 1:2 қатынасында (100 г дәнге 200 мл су) бөлме температурасында (20-25°С) қараңғы жерде 6-8 сағатқа жібітілді. Содан кейін суы төгіліп, дәндер таза сумен жуылды. Өсіру үшін дәндер 1,5-2 см қалыңдықта ылғалдандырылған дәкеге біркелкі жайылып, үстінен тағы бір қабат дәке жабылды, ал су ағып кетуі үшін ыдыс еңкейтіліп орналастырылды. Өсіру температурасы 20-25°С деңгейінде ұсталды. Әр 8-10 сағат сайын дәндер жуылып, қажет болған жағдайда бүріккішпен ылғалдандырылып отырды. Өсіру ұзақтығы 24-48 сағатқа дейін созылып, бидай мен сұлыда 1-2 мм ұзындықтағы өскіндер, ал қарақұмықта түбіршелер пайда болғанға дейін жалғасты. Өсіру аяқталған соң дәндер қайта жуылып, дәкемен сүзіліп кептірілді.

Кептіру алдында дәндер -35…-40°С температурада кемінде 4 сағатқа дейін мұздатылды. Кейіннен олар сублимациялық кептіргіш камерада +35…+40°С температурада және төмен қысымда (0,1 мбар-ға дейін) 18-24 сағат бойы ылғалдылығы 5%-дан төмен болғанға дейін кептірілді. Кептірілген үлгілер бөлме температурасына дейін салқындатылып, диірменде ұнтақталып, герметикалық контейнерлерге салынып сақтауға жіберілді.

Су белсенділігін анықтау

Судың белсенділік көрсеткіші (aw) италиялық LabTouch-aw аспабы арқылы анықталды [15].

pH анықтау

Ортаның белсенді қышқылдығы (pH) потенциометриялық әдіспен Seven2GoTM pH-метрімен анықталды. Электрод дайындалған ерітіндіге батырылып, аспап шкаласындағы pH мәні тіркелді. Ерітінді ұнтақталған өнім мен судан (1:10 қатынасында) дайындалды. pH мәні 20 °С температурада 30 минут тұндырғаннан кейін өлшенді [16].

Органолептикалық бағалау

Органолептикалық бағалау МЕСТ 10967-2019 стандартына сәйкес жүргізілді [17].

Ылғалдылықты анықтау

Ылғалдылық көрсеткіші ЭВЛАС-2М ылғал анализаторы (Ресей) арқылы анықталды [18].

Функционалды-технологиялық қасиеттерді анықтау

Дәннің функционалды-технологиялық қасиеттері ылғалды ұстау қабілеті (ЫҰҚ) және майды ұстау қабілеті (МҰҚ) – [19] әдістемесіне сәйкес анықталды.

Статистикалық талдау

Өлшем нәтижелерінің статистикалық өңдеуі Microsoft Excel 2016 бағдарламасы арқылы жүргізілді. Нәтижелер сенімді болып саналды, егер $p \leq 0,05$ мәніне сәйкес келсе. Мәліметтер орташа мән ± стандарттық ауытқу түрінде берілді.

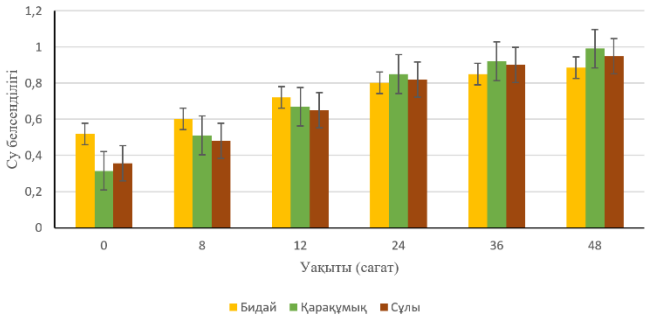
Зерттеу нәтижелері және оларды талқылау.

Су белсенділігін зерттеу

Су белсенділігі – биологиялық және химиялық реакцияларға қатысатын бос ылғал мөлшерін сипаттайтын көрсеткіш. Бұл параметр судың микроорганизмдердің дамуына және әртүрлі химиялық үдерістердің жүруіне қаншалықты қолжетімді екенін көрсетеді [20]. 1-суретте бидай, қарақұмық және сұлы дәндерінің өнгіш процесі кезінде су белсенділігінің өзгеру нәтижелері келтірілген.

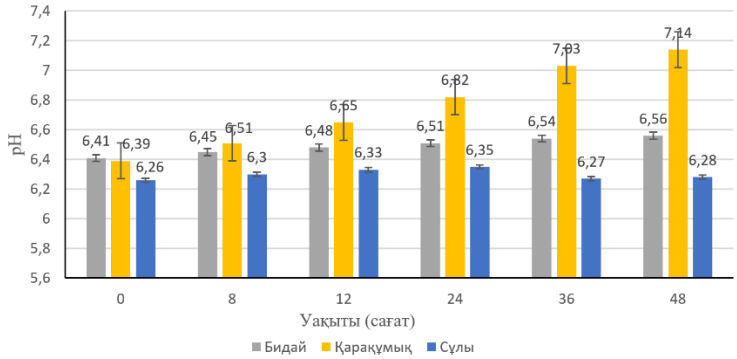
Өну үрдісі барысында бидай, қарақұмық және сұлы дәндеріндегі су белсенділігі біртіндеп артады. Бастапқы, бақылау нүктесінде, бұл көрсеткіштер ең төмен болды. Алайда 48 сағат ішінде су белсенділігі ең жоғары деңгейге жетті. Әсіресе, қарақұмықта айтарлықтай

өзгеріс байқалды, оның су белсенділігі 0,9905-ке дейін өсті. Мұндай өзгерістер дәннің өну кезінде ылғалды қарқынды сіңіруімен түсіндіріледі, себебі бұл өсу үдерістерін іске қосу үшін қажет.



Сурет 1 – Бидай, қарақұмық және сұлы дәндеріндегі су белсенділігінің өзгеруі (өну үрдісінде)

2-суретте бидай, қарақұмық және сұлы дәндеріндегі pH деңгейінің 48 сағаттық өну процесінде өзгеруі көрсетілген.



Сурет 2 – Бидай, қарақұмық және сұлы дәндеріндегі pH деңгейінің 48 сағаттық өну үрдісіндегі өзгерісі

Өну кезінде бидай мен қарақұмықтың pH деңгейі артқаны байқалды, әсіресе қарақұмықта 7,14-ке дейін болды. Бұл орта сілтілі бола бастағанын көрсетеді. Ал сұлыда, керісінше, pH деңгейі айтарлықтай өзгерген жоқ. Мұндай айырмашылық әр дәнде түрлі биохимиялық процестер жүретінін дәлелдейді.

Зерттеу барысында дән массасының өзгеруі төмендегі 1-кестеде көрсетілген:

Кесте 1 – Өнуден бұрын және кейін дән массасының өзгерісі.

№	Шикізат атауы	Өнуге дейінгі массасы (г)	Өнуден кейінгі массасы (г)
1	Бидай	100	106,4
2	Қарақұмық	200	309,0
3	Сұлы	100	125,1

Өну нәтижесінде дәндер су сіңіріп, ішкі биологиялық үдерістердің белсенуіне байланысты массасы артады. Бидай массасы 100 г-нан 106,4 г-ға, қарақұмық 200 г-нан 309 г-ға, ал сұлы 100 г-нан 125,1 г-ға дейін ұлғайды.

3-суретте өндіру кезеңінде бидай, қарақұмық және сұлы өскіндерінің орташа ұзындығының өзгерісі көрсетілген.



Сурет 3 – 48 сағаттан кейінгі бидай, қарақұмық және сұлының өнген дәндерінің сыртқы көрінісі

Дәндерді өндіру үрдісінде өскіндердің ұзындығының өзгеруі 2-кестеде көрсетілген. Өнудің бастапқы 8 сағатынан кейін-ақ барлық үлгілерде өскіндердің өсуі байқалды.

Кесте 2 – Дән өскіндерінің ұзындығы 8 және 48 сағаттан кейін (см)

№	Өнім атауы	Дәндердің жалпы саны	8 сағаттан кейінгі өскіндердің орташа ұзындығы (мм)	48 сағаттан кейінгі өскіндердің орташа ұзындығы (мм)
1	Бидай	10	8	13,3
2	Қарақұмық	10	7	13,5
3	Сұлы	10	12	17,4

48 сағат өткен соң ең ұзын өскіндер орта есеппен 17,4 мм-ге дейін жеткені сұлыда байқалды. Қарақұмық пен бидайда өскіндер қысқа болып, тиісінше 13,5 мм және 13,3 мм болды. Бұл сұлының басқа астық түрлеріне қарағанда тез өніп жетілетінін көрсетеді.

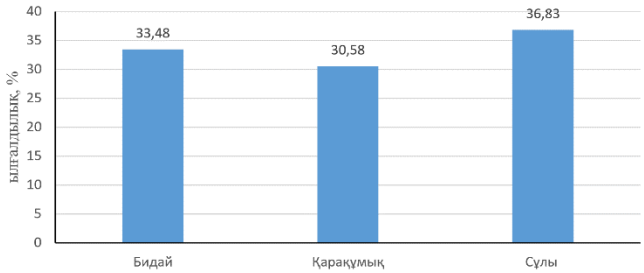
Бидай, қарақұмық және сұлы дәндері өну барысында олардың сыртқы түрі, иісі және басқа да органолептикалық қасиеттерінде өзгерістер болды (кесте 3-ке қараңыз).

Кесте 3 – Дәннің өну кезіндегі органолептикалық көрсеткіштері (8 сағаттан 48 сағатқа дейін)

Уақыты (сағат)	Дәндер	Түсі	Иісі	Біркелкілігі
8	Бидай	ашық қоңыр түсті	әлсіз, тән иісі бар	тығыз әрі біркелкі құрылымды
	Қарақұмық	ашық жасыл-қоңыр түсті	бейтарап иісі бар	тығыз әрі біркелкі
	Сұлы	ашық сары түсті	әлсіз, табиғи иісі бар	тығыз және біркелкі
12	Бидай	Сарғылт	жеңіл тәтті иіс	құрылымы біртекті
	Қарақұмық	Ақшыл жасыл	әлсіз бөгде иіс байқалады	құрылымы сәл біртексіз
	Сұлы	Сарғылт	жаңа (таза) иіс	құрылымы біртекті
24	Бидай	ашық-қоңыр	Орташа айқындалған	Сәл борпылдақ
	Қарақұмық	Ашық жасыл	Әлсіз, өзіне тән	біртекті
	Сұлы	сарғылт	Өнген дәнге тән жеңіл иіс	біртекті
36	Бидай	Қоңыр	Өзіне тән, сәл қышқыл	Бос құрылымды
	Қарақұмық	Сары-жасыл	бөгде иісі бар	Сәл біртекті емес
	Сұлы	Сары	Бос құрылымды	Орташа, өзіне тән
48	Бидай	Қою-қоңыр	Сәл қышқыл	Жұмсақ, бос құрылымды
	Қарақұмық	Ашық-жасыл	Қышқыл	үгілмелі
	Сұлы	Сары	Өнген дәнге тән иіс	жұмсақ

Өну үрдісі барысында дәндердің түсі біртіндеп өзгерді ашық қоңыр және сары түстен қанығырақ реңкке дейін. Өздеріне тән, кейде сәл қышқылдау иіс пайда болды. Дәндердің құрылымы бұрынғыдай біртекті болмады, бұл әсіресе 36-48 сағат өну уақытынан кейін айқын байқалды.

Өну үрдісінен кейін дәннің ылғалдылығы айтарлықтай артты. Ең жоғары көрсеткіш сұлыда 36,83 % болса, бидайда 33,48 %, ал қарақұмықта – 30,58% байқалды. Бұл өсіп шығу кезінде дәндердің белсенді түрде ылғалды сіңіруімен түсіндіріледі (сурет 4).



Сурет 4 – Өнуден кейінгі дәннің ылғалдылығы

4-кестеде бидай, қарақұмық және сұлы дәндерінің сублимациялық кептіруден кейінгі су белсенділігін өлшеу нәтижелері көрсетілген. Ең төмен су белсенділігі қарақұмықта 0,0393, бұл оның құрамында еркін ылғал аз екенін және өнімнің жақсы сақталатынын білдіреді. Бидайда бұл көрсеткіш – 0,2247, сұлыда – 0,0633 болды. Бұл дәндердің жақсы кептірілгенін және олардың құрамында артық ылғалдың жоқтығын көрсетеді

Кесте 4 – Бидай, қарақұмық және сұлы дәндерінің сублимациялық кептіруден кейінгі су белсенділігі

№	Өнім атауы	Су белсенділігі
1	Бидай	0,2247
2	Қарақұмық	0,0393
3	Сұлы	0,0633

Өнген дәндерді сублимациялық кептіру

5-кестеде сублимациялық кептіруден кейін бидай, қарақұмық және сұлы дәндеріндегі ылғал жоғалту пайызы көрсетілген.

Кесте 5 – Дәндерді сублимациялық кептіруден кейінгі ылғал жоғалтуы

№	Өнім атауы	Құрғату алдындағы масса (г)	Құрғатқаннан кейінгі масса (г)	Ылғал жоғалтуы (%)
1	Бидай	63,2	55,6	12
2	Қарақұмық	138,2	117	15,3
3	Сұлы	51,3	45,5	11,3

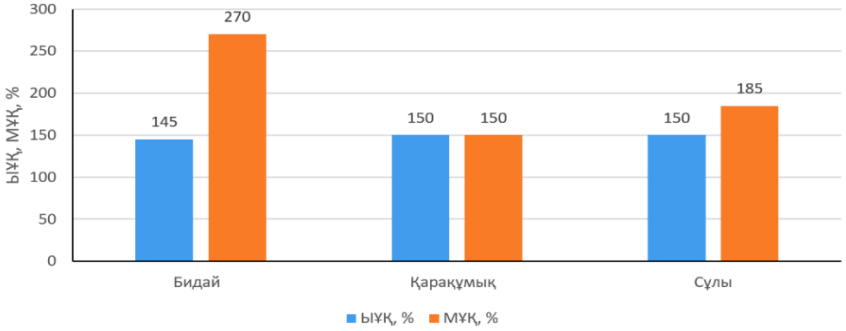
Қарақұмық ең көп 15,3% ылғал жоғалтады, ал бидай мен сұлы тиісінше 12% және 11,3% ылғал жоғалтады. Бұл нәтижелер кептіруден бұрынғы дәндердің ылғалдылығы мен құрылымының әртүрлі екенін көрсетеді, бұл технологиялық өңдеу кезінде ескерілуі маңызды болып табылады.

Сублимациялық кептірілгеннен кейін дәнді дақылдардың өнген өскіндері әртүрлі органолептикалық қасиеттер көрсетті. Бидай мен сұлы құрғақ сыртқы түрі мен тығыз консистенциясын сақтады, дәндері шашылмайды, құрылымы біртекті. Ал қарақұмық керісінше, морт және біртекті емес болып кетті, басқанда дәндері үгітіліп қалды. Барлық үлгілерде бөгде иіссіз, өзіне тән иіс болды (6-кесте).

Кесте 6 – Сублимациялық кептіруден кейін дәнді дақылдардың өскіндерінің органолептикалық көрсеткіштері

Дәндер	Сыртқы көрінісі	Консистенциясы	Иісі	Біртектілігі
Бидай	ұнтақталмайды, құрғақ	Өзгерген жоқ, өте құрғақ	Бөгде иіссіз, өзіне тән	біртекті
Қарақұмық	ашық түсті, қысып қарағанда үгілмелі	Өзгерді, сынғыш	Бөгде иіссіз, өзіне тән	біртекті емес
Сұлы	Үгілмелі емес, құрғақ	Өзгерген жоқ, өте құрғақ	Бөгде иіссіз, өзіне тән	біртекті

5-суретте өнген дәннің ылғалды және майды қаншалықты ұстай алатыны көрсетілген. Қарақұмық пен сұлы шамамен 150 % ылғалды ұстай алса, ал бидай – 270% майды ұстай алды. Өнген дәндер әрі қарай қолдануға тиімді, жақсы технологиялық қасиеттерге ие болып табылады.



Сурет 5 – Өнген дәндердің ылғалды және майды ұстау қабілеті

Ғылыми нәтижелерді талқылау

С. Первин, С. Ахтар және т.б авторлардың еңбектерінде (2024ж) өндіру үрдісі бидай құрамының жақсаруына әкелетіні көрсетілген, яғни ақуыз, күл (минералдар) және тағамдық талшықтар мөлшері артады, таниндер мен фитаттар азаяды, ал антиоксиданттық белсенділік өседі [20]. Сол сияқты С.М. Боргонова, Ф. Пасини және т.б авторлардың жұмыстарында (2023ж) өндіру үрдісі зиянды (антитамақтық) қосылыстарды азайтып, бос фенолды қосылыстардың, пептидтердің және антиоксиданттық белсенділіктің артуына әсер ететіні анықтаған [21]. Осы ғылыми жұмыстар нәтижесіне сәйкестігі расталады. Яғни, зерттеу нәтижесінде өнген дәндердің су белсенділігінің артуы, ылғалды жақсы ұстау қабілеті және массаның ұлғаюы байқалды, әсіресе қарақұмықта. Бұл өндіру ферментативтік үрдістерді белсендіріп, дәннің тағамдық және технологиялық құндылығын арттыратынын дәлелдейді.

Қорытынды

Бұл зерттеудің мақсаты – бидай, жасыл қарақұмық және сұлы дәндерінің өндіру барысында физика-химиялық қасиеттерінің өзгерісін зерттеп, олардың функционалды тағам өнімдері ретінде қолдану мүмкіндігін анықтау болды. Зерттеу әдістері ретінде су белсенділігін, pH деңгейін, масса өсімін, ылғалды және майды ұстау қабілетін өлшеу, органолептикалық көрсеткіші, сондай-ақ сублимациялық кептіру әдісі қолданылды. Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, өнген дәндердің су белсенділігі артты, әсіресе бұл жасыл қарақұмықта (0,9905) байқалды. Сонымен қатар оның масса өсімі де ең жоғары болды. Сублимациялық кептіру өнімдердің сақтау тұрақтылығын арттырды. Бидай мен сұлы да технологиялық артықшылықтарға ие болды.

Осыдан келетін тұжырым өнген дәндерді функционалды тағам ретінде пайдалану мүмкіндігі бар, бұл олардың биологиялық құндылығын арттырып, тағам өнімдерінің сапасын жақсартуға ықпал етеді. Алдағы уақытта бұл технологияларды тағам өндірісінде енгізу өнім ассортиментін кеңейтіп, халықтың денсаулығын жақсартуға мүмкіндік береді.

Әдебиеттер тізімі

1. Бутенко Л.И. Исследования химического состава пророщенных семян гречихи, овса, ячменя и пшеницы / Л.И. Бутенко, Л.В. Лигай // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 4. – С. 1128-1133.
2. Biotechnological tools for cereal and pseudocereal dietary fibre modification in the bakery products creation – advantages, disadvantages and chal-lenges / A.Torbica et al // Trends in Food Science & Technology. – 2022. – Vol. 129. – P. 194-209. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.09.018.
3. Plant sprout foods: biological activities, health benefits, and bioavailability / J. Geng et al // Journal of Food Biochemistry. – 2022. – Vol. 46, № 3. – P. 3777. https://doi.org/10.1111/jfbc.13777.
4. Oxidative stability of baby dehydrated purees formulated with different oils and germinated grain flours of quinoa and maranth / D. Jiménez et al // LWT. – 2020. – Vol. 127. – P. 109229. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109229.
5. Effect of different pretreatments on anti-oxidant activity of oats grown in the Himalayan region / A. Shah et al // Journal of Food Science and Technology. – 2022. – Vol. 59. – P. 3464-3473. https://doi.org/10.1007/s13197-021-05336-6.
6. Effects of germination on nutritional composition of waxy wheat / P.V. Hung et al // Journal of the Science of Food and Agriculture. – 2011. – № 92. – P. 667-672. https://doi.org/10.1002/jsfa.4628.
7. Казаков Е.Д. Биохимия зерна и продуктов его переработки / Е.Д. Казаков, В.Л. Кротович, 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Агропромиздат, 1989. – 336 с.
8. Зуев Е.В. Пшеница / Е.В. Зуев // Большая российская энциклопедия [Электронный ресурс]. – URL: https://bigenc.ru (дата обращения: 16.07.2025).
9. Казаков, Е.Д. Биохимия зерна и продуктов его переработки / Е.Д. Казаков, В.Л. Кретович. – М.: Агропромиздат, 1989. – 368 с.
10. Казаков Е.Д. Зерноведение с основами растениеводства / Е.Д. Казахков. – М.: Колос, 1973. – 288 с.
11. Казаков Е.Д. Биохимия зерна и продуктов его переработки / Е.Д. Казаков, В.Л. Кретович. – М.: Колос, 1980. – 319 с.
12. Кретович В.Л. Биохимия растений / В.Л. Кретович. – М.: Высшая школа, 1980. – 445 с.

13. Зенькова М.Л. Влияние процесса проращивания зерен злаковых культур на их пищевую ценность / М.Л. Зенькова, А.В. Акулич // Теоретические аспекты хранения и переработки сельхозпродукции. – 2021. – № 3. – С. 26-56. https://doi.org/10.36107/sfpp.2021.207.
14. Bae H.-G. Antioxidant and anti-obesity effects of in vitro digesta of germinated buckwheat / H.-G. Bae, M.-J. Kim // Food Science and Biotechnology. – 2022. – Vol. 31. – P. 879-892. https://doi.org/0.1007/s10068-022-01086-z.
15. ГОСТ ISO 21807-2015. Микробиология пищевой продукции и кормов. Определение активности воды. – Введ. 2017-07-01. – М.: Стандартинформ, 2016. – 3 с.
16. СТ РК ИСО 2917-2009. Мясо и мясные продукты. Определение pH. Контрольный метод. – Введ. 2010-07-01. – Астана: Госстандарт Республики Казахстан, 2010. – 16 с.
17. ГОСТ 10967-2019. Зерно. Методы определения запаха и цвета. – Введ. 2020-09-01. – М.: Стандартинформ 2019. – 3 с.
18. ГОСТ 13586.5-2015. Зерно. Метод определения влажности. – Введ. 2016-07-01. – М.: Стандартинформ 2019. – 3 с.
19. Щербаков В.Г. Белки масличных семян: монография / В.Г. Щербаков, В.Г. Лобанов, А.Д. Минакова. – Краснодар: Изд. КубГТУ, 2010. – 185 с.
20. Comparative assessment of nutritional, antioxidant, physicochemical, and rheological characteristics of whole and sprouted wheat flour / C. Pepveen et al // LWT. – 2024. – Vol. 209. – Article 116679. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.116679.
21. Effect of Sprouting on Biomolecular and Antioxidant Features of Common Buckwheat (Fagopyrum esculentum) / A. Barbiroli et al // Foods. – 2023. – Vol. 12, № 10. – Article 2047. https://doi.org/10.3390/foods12102047.

References

1. Butenko L.I. Issledovaniya khimicheskogo sostava proroshchennykh semyan grechikhi, ovsa, yachmenya i pshenitsy / L.I. Butenko, L.V. Ligai // Fundamental'nye issledovaniya. – 2013. – № 4. – S. 1128-1133. (In Russian).
2. Biotechnological tools for cereal and pseudocereal dietary fibre modification in the bakery products creation – advantages, disadvantages and chal-lenges / A.Torbica et al // Trends in Food Science & Technology. – 2022. – Vol. 129. – P. 194-209. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.09.018. (In English).
3. Plant sprout foods: biological activities, health benefits, and bioavailability / J. Geng et al // Journal of Food Biochemistry. – 2022. – Vol. 46, № 3. – P. 3777. https://doi.org/10.1111/jfbc.13777. (In English).
4. Oxidative stability of baby dehydrated purees formulated with different oils and germinated grain flours of quinoa and maranth / D. Jiménez et al // LWT. – 2020. – Vol. 127. – P. 109229. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109229. (In English).
5. Effect of different pretreatments on anti-oxidant activity of oats grown in the Himalayan region / A. Shah et al // Journal of Food Science and Technology. – 2022. – Vol. 59. – P. 3464-3473. https://doi.org/10.1007/s13197-021-05336-6. (In English).
6. Effects of germination on nutritional composition of waxy wheat / P.V. Hung et al // Journal of the Science of Food and Agriculture. – 2011. – № 92. – R. 667-672. https://doi.org/10.1002/jsfa.4628. (In English).
7. Kazakov E.D. Biokhimiya zerna i produktov ego pererabotki / E.D. Kazakov, V.L. Krotovich, 2-e izd., pererab. i dop. – M.: Agropromizdat, 1989. – 336 s. (In Russian).
8. Zuev E.V. Pshenitsa / E.V. Zuev // Bol'shaya rossiiskaya ehntsiklopediya [Ehlektronnyi resurs]. – URL: https://bigenc.ru (data obrashcheniya: 16.07.2025). (In Russian).
9. Kazakov, E.D. Biokhimiya zerna i produktov ego pererabotki / E.D. Kazakov, V.L. Kretovich. – M.: Agropromizdat, 1989. – 368 s. (In Russian).
10. Kazakov E.D. Zernovedenie s osnovami rastenievodstva / E.D. Kazakhkov. – M.: Kolos, 1973. – 288 s. (In Russian).
11. Kazakov E.D. Biokhimiya zerna i produktov ego pererabotki / E.D. Kazakov, V.L. Kretovich. – M.: Kolos, 1980. – 319 s. (In Russian).
12. Kretovich V.L. Biokhimiya rastenii / V.L. Kretovich. – M.: Vysshaya shkola, 1980. – 445 s. (In Russian).

13. Zen'kova M.L. Vliyanie protsessa prorashchivaniya zeren zlakovykh kul'tur na ikh pishchevuyu tsennost' / M.L. Zen'kova, A.V. Akulich // Teoreticheskie aspekty khraneniya i pererabotki sel'khozproduktsii. – 2021. – № 3. – S. 26-56. https://doi.org/10.36107/sfpp.2021.207. (In Russian).
14. Bae H.-G. Antioxidant and anti-obesity effects of in vitro digesta of germinated buckwheat / H.-G. Bae, M.-J. Kim // Food Science and Biotechnology. – 2022. – Vol. 31. – P. 879-892. https://doi.org/0.1007/s10068-022-01086-z. (In English).
15. GOST ISO 21807-2015. Mikrobiologiya pishchevoi produktsii i kormov. Opredelenie aktivnosti vody. – Vved. 2017-07-01. – M.: Standartinform, 2016. – 3 s. (In Russian).
16. 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).
17. GOST 10967-2019. Zerno. Metody opredeleniya zapakha i tsveta. – Vved. 2020-09-01. – M.: Standartinform 2019. – 3 s. (In Russian).
18. GOST 13586.5-2015. Zerno. Metod opredeleniya vlazhnosti. – Vved. 2016-07-01. – M.: Standartinform 2019. – 3 s. (In Russian).
19. Shcherbakov V.G. Belki maslichnykh semyan: monografiya / V.G. Shcherbakov, V.G. Lobanov, A.D. Minakova. – Krasnodar: Izd. KuBGTU, 2010. – 185 s. (In Russian).
20. Comparative assessment of nutritional, antioxidant, physicochemical, and rheological characteristics of whole and sprouted wheat flour / S. Rerveen et al // LWT. – 2024. – Vol. 209. – Article 116679. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.116679. (In English).
21. Effect of Sprouting on Biomolecular and Antioxidant Features of Common Buckwheat (Fagopyrum esculentum) / A. Barbiroli et al // Foods. – 2023. – Vol. 12, № 10. – Article 2047. https://doi.org/10.3390/foods12102047. (In English).

Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ауыл шаруашылығы министрлігі (грант № BR24892775) қаржыландырады.

Ж.М. Атамбаева[1], Ж.С. Есимбеков[2], Г.А. Капашева[2]*.
[1]Шәкәрім Университеті,
071412, Республика Казахстан, город Семей, улица Глинки, 20 А
[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

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ В ПРОЦЕССЕ ПРОРАЩИВАНИЯ ЗЕРЕН ПШЕНИЦЫ, ЗЕЛЁНОЙ ГРЕЧКИ И ОВСА

Аннотация: *Данная исследовательская работа посвящена комплексному изучению изменений физико-химических свойств зерен пшеницы, зеленой гречки и овса в процессе их проращивания. Основная цель исследования – научное обоснование возможности получения функциональных продуктов с высокой пищевой ценностью путем оценки качественных и функциональных показателей пророщенных зерен.*

В ходе исследования определялись активность воды, показатель pH, влажность, органолептические характеристики и функционально-технологические свойства зерен. Также применялся метод сублимационной сушки пророщенных зерен, изучались физико-химические и технологические свойства порошкообразных продуктов. Согласно полученным результатам, активность воды у зеленой гречки была самой высокой (0,9905), при этом масса увеличилась с 200 до 309 граммов. Это свидетельствует о высокой сохранности и хорошей влагопоглощающей способности зерна. Пшеница и овес также продемонстрировали определённые технологические преимущества.

Результаты исследования способствуют совершенствованию новых технологий эффективного использования растительного сырья, а также развитию функциональных и биологически ценных продуктов в пищевой промышленности. Эти продукты могут широко применяться в качестве пищевых добавок или натуральных ингредиентов, повышая качество и безопасность конечной продукции.

Ключевые слова: *пророщенная зелёная гречка, пшеница, овёс, активность воды, влагоудерживающая способность, сублимационная сушка.*

Zh.M. Atambayeva[1], Zh.S. Yesimbekov[2], G.A. Kapasheva[1]*
[1]Shakarim University,
071412, Republic of Kazakhstan, Semey city, Glinki street 20 A
[2]Kazakh Scientific Research Institute of Processing and Food Industry (Semey branch),
071410, Republic of Kazakhstan, Semey, 29 Baitursynova str.
*e-mail: gena.89.89@mail.ru

STUDY OF PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES DURING THE GERMINATION OF WHEAT, GREEN BUCKWHEAT, AND OAT GRAINSANNOTATION

Annotation: *This research work is dedicated to a comprehensive study of the changes in the physicochemical properties of wheat, green buckwheat, and oat grains during germination. The main objective of the study is to scientifically justify the possibility of obtaining functional products with high nutritional value by assessing the qualitative and functional indicators of germinated grains.*

During the study, water activity, pH level, moisture content, organoleptic characteristics, and functional-technological properties of the grains were determined. Additionally, the method of sublimation drying of germinated grains was applied, and the physicochemical and technological properties of the powdered products were examined. According to the results, green buckwheat showed the highest water activity (0.9905), and its mass increased from 200 to 309 grams. This indicates high storage stability and good moisture absorption capacity of the grain. Wheat and oats also demonstrated certain technological advantages.

The study results contribute to improving new technologies for the efficient use of plant raw materials, as well as to the development of functional and biologically valuable products in the food industry. These products can be widely used as dietary supplements or natural ingredients, enhancing the quality and safety of the final products.

Key words: *sprouted green buckwheat, wheat, oats, water activity, moisture-holding capacity, freeze-drying.*

Автор туралы ақпарат

Жибек Манаповна Атамбаева – аға оқытушы, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы, Семей қаласы; e-mail: zh.atambayeva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7899-870X.

Жәнібек Серікбекұлы Есимбеков – қауымдастырылған профессор, PhD; «Қазақ қайта өңдеу және тағам өнеркәсіптері ғылыми зерттеу институты» ЖШС Семей филиалы, Қазақстан Республикасы, Семей қ.; 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.; e-mail: gena.89.89@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-0735-9783.

Сведения об авторах

Жибек Манаповна Атамбаева – ст. преподаватель, Шәкәрім Университет, Республика Казахстан, город Семей; e-mail: zh.atambayeva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7899-870X.

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.

Information about the authors

Zhibek Manapovna Atambayeva – senior lecturer, NAO"Vashkurim University", Republic of Kazakhstan, Semey; e-mail: zh.atambayeva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7899-870X.

Zhanibek Serikbekovich Yessimbekov – assoc. Professor, PhD, Kazakh Research Institute of Processing and Food Industry (Semey Branch), Republic of Kazakhstan, Semey; 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.

Редакцияға енуі 05.01.2026
Жариялауға қабылданды 03.03.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-48

ҒТАХР: 65.65.03

BY 4.0
Check for updates

Б.М. Хамитова[1]*, А.Р. Тасполтаева[1], Ж.Б. Калдыбекова[1], Б.М. Искаков[2], М.Т. Мурсалыкова[3]

[1]М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті,
160012, Қазақстан Республикасы, Шымкент қ., Тауке хан даңғылы, 5
[2]С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті,
010011, Қазақстан Республикасы, Астана қ., Жеңіс даңғылы, 62
[3]Шәкәрім университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинки көшесі, 20 А
*e-mail: barno-007@mail.ru

БАҚША ӨСІМДІКТЕРІ ТҰҚЫМДАРЫНАН ӨСІМДІК МАЙЫН АЛУ МҮМКІНДІГІН ЗЕРТТЕУ

Аңдатпа: *Өсімдік майлары мен оларға негізделген өнімдер соңғы бірнеше жылда Қазақстан халқының тамақтану рационының негізгі бөлігіне айналды. Күнбағыс майымен қатар, Қазақстанда өндірілетін өсімдік майларының қатарына рапс, мақсары, жүгері және мақта майлары кіреді. Елімізде өсімдік майларының ассортименттерін кеңейту үшін сирек кездесетін және дәстүрлі емес майлы дақылдарды, соның ішінде қауын мен асқабақтың майлы дақылдарын өңдеудің жоғары тиімді технологияларын әзірлеу және енгізу маңызды. Мақалада өсімдік майын алу үшін бақша өнімдерін пайдалану мүмкіндігі қарастырылған. Нәтижесінде бақша тұқымдарынан өсімдік майларын өндіру технологиялары жасалынды. Өсімдік майларын алу бойынша жұмыста май және май өнеркәсібіне арналған дәстүрлі емес шикізат: қауын және асқабақ тұқымдары пайдаланылды. Асқабақ тұқымдарының химиялық құрамы мен физика-химиялық көрсеткіштері зерттелінген. Қауын мен асқабақ тұқымдарынан суық сығымдау арқылы алынған майдың физика-химиялық қасиеттері анықталды. Қауын мен асқабақ тұқымдарынан алынған майларды зерттеу нәтижесінде олардың сапа көрсеткіштері стандарт бойынша тазартылмаған күнбағыс майының ең жоғары сұрыпына сәйкес келетіні анықталды. Сондықтан қауын және асқабақ тұқымдарын өңдеу өсімдік майларының ассортиментін кеңейтуге мүмкіндік береді.*

Сонымен қатар, бақша дақылдарының тұқымдарын қайта өңдеу ауыл шаруашылығы шикізатын кешенді пайдалануға жағдай жасайды. Бұл бағыттағы зерттеулер отандық май өнеркәсібінің шикізаттық базасын кеңейтіп, импортқа тәуелділікті төмендетуге ықпал етеді. Қауын және асқабақ тұқымдарынан алынған майлар тағамдық мақсатта ғана емес, функционалдық және профилактикалық өнімдер өндірісінде де қолданылуы мүмкін. Осылайша, дәстүрлі емес майлы шикізатты пайдалану ғылыми және өндірістік тұрғыдан өзекті болып табылады.

Түйін сөздер: *майлы тұқымдар, құрамында майы бар қалдықтар, полиқанықпаған май қышқылдары, фитохимиялық қосылыстар, қауын тұқымдары, асқабақ тұқымдары, майды сығымдау.*

Кіріспе

Қазақстан Республикасында өсірілетін негізгі майлы дақылдарға күнбағыс, соя және рапс жатады, олар жалпы майлы дақыл өндірісінің шамамен 97%-ын құрайды. Басқа майлы дақылдардың – зығыр, қыша, майкене, жиренқұлақ (рыжик) және сурипица тұқымдары салыстырмалы түрде аз көлемде өндіріледі. Майлы дақылдардан басқа, ұн және жарма өндірісі кезінде бөлінетін дәнді дақылдардың тұқымдарын, сондай-ақ жүзім, шабдалы, өрік және бадам дәндері, қызанақ, асқабақ және қарбыз тұқымдары сияқты тамақ өндірісінен алынған майлы қалдықтарды май өндіру үшін пайдалануға болады. Олар қанықпаған май қышқылдарының көзі болып табылады және ағзаға майда еритін дәрумендерді сіңіруге көмектеседі. Өсімдік майлары шикізат құрамы, тазарту дәрежесі және технологиялық процесі бойынша әртүрлі боліп келеді, сонымен қатар елімізде өсімдік майларын өсімдік майларын өндіру үшін шикізат базасын дамытуға жеткілікті әлеует бар [1].

Қазіргі уақытта Қазақстан Республикасында 1980 жылдары басталған майлы дақылдардың капиллярлық-кеуекті құрылымын зерттеуге негізделген майлы дақылдарды өңдеудің озық технологияларын әзірлеуде. Бұл өсімдік майларын тұқымдық сақтау, алу және сақтау саласындағы барлық технологияларды түбегейлі қайта қараудың ғылыми негізін

©Б.М. Хамитова, А.Р. Тасполтаева, Ж.Б. Калдыбекова, Б.М. Искаков, М.Т. Мурсалыкова, 2026

жасауға мүмкіндік берді. Бірқатар кәсіпорындар майларды инертті газдарды пайдаланып, тотығудан қорғау технологиясын қазірдің өзінде қолданып жатыр. Қарбыз, асқабақ, жүзім және амарант сияқты май және май өнеркәсібі үшін дәстүрлі емес шикізаттан май алу технологиясы барған сайын кең таралуда, олар тек тағамдық пайдаға ғана емес, сонымен қатар биологиялық белсенді және фармакологиялық қасиеттерге де ие. Зығыр және қарасора сияқты «ұмытылған» тағамдық майларды өндіру де қайта жандануда [2].

Майлы тұқымдардың құрамында фитохимиялық қосылыстар кешені бар екенін атап өткен жөн, сапалық және сандық құрамы оларды кең ауқымды терапиялық әсерлері бар биологиялық белсенді қоспаларды өндіруге арналған шикізат көзі ретінде қарастыруға мүмкіндік береді. Биологиялық белсенді қоспаларды өндіруге арналған ең перспективалы және технологиялық тұрғыдан дайындалған дақылдарға: соя, күнбағыс, зығыр, балқарағай, мақсары, люпин, амарант, шырғанақ; дәнекті жеміс тұқымдары - жүзім, қызанақ, шабдалы, өрік жатады. Сояның оң антиканцерогендік әсері соядағы фитохимиялық заттардың, атап айтқанда, изофлавондардың болуымен байланысты екені анықталды. Соңғы уақытқа дейін тағамдық талшықтар диетаның балласты заттары болып саналды. Қазіргі уақытта сояны тұтыну тазартылған тағамдарды қабылдаумен байланысты көптеген «өркениет ауруларын» емдеуде ұсынылады. Олардың тамақтанудағы жетіспеушілігі ағзаның қоршаған орта әсеріне төзімділігінің төмендеуіне де әкелді [3].

Құрамы бойынша әртүрлі майларда биологиялық белсенді заттардың болуы жаңа тәсілдің дамуына әкелді: теңдестірілген май қышқылдары мен триглицеридтер профильдері, майда еритін витаминдердің оңтайлы мөлшері бар өсімдік майы қоспаларын жасау және линолен қышқылы мен эйкозантен қышқылы сияқты қышқылдарды қосу. Бұл майларды қолдану семіздік, атеросклероз, тромбоз, генетикалық зақымдану, көру қабілетінің бұзылуы және басқа да аурулардың алдын алуға және емдеуге көмектеседі [4]

Физиологиялық тұрғыдан алғанда, сұйық және қатты майлар ақуыздар мен көмірсулармен қатар адам рационының құрамдас бөлігі болып табылады. Майлардың тағамдық құндылығы олардың май қышқылдарының құрамына және триглицеридтер молекуласындағы май қышқылдарының орналасу ерекшеліктеріне байланысты анықталады. Май қышқылдары көміртек тізбегінің ұзындығы, қос байланыстардың саны мен орналасуы, сондай-ақ олардың кеңістіктік конфигурациясы бойынша бір-бірінен ерекшеленеді. Бұл құрылымдық айырмашылықтар май қышқылдарының биологиялық, физикалық және химиялық қасиеттерін айқындайды [5, 6].

Организмдегі атқаратын негізгі қызметтеріне қарай липидтерді үш негізгі топқа бөлуге болады: қор (резервтік), құрылымдық және қорғаныс липидтер [7].

Құрылымдық липидтер организмнің тіршілік әрекетінде маңызды рөл атқарады және негізінен жасушалық деңгейдегі зат алмасу (метаболизм) процестеріне қатысады. Олардың құрамында полиқанықпаған май қышқылдарының үлесі жоғары, бұл өз кезегінде жасуша мембраналарының икемділігі мен өткізгіштігін қамтамасыз етеді. Құрылымдық липидтер барлық биологиялық мембраналардың негізгі компоненті бола отырып, мембраналық құрылымның тұрақтылығын және сұйықтық қасиетін реттейді. Сонымен қатар, олар белгілі бір ақуыздардың (мысалы, рецепторлар мен тасымалдаушы ақуыздардың) функциональдық белсенділігі жүзеге асуы үшін қажетті липидтік матрица түзеді [8, 9].

Мембраналардың физикалық, физика-химиялық және биологиялық қасиеттері тікелей олардың липидтік құрамына тәуелді. Әрбір липидтік топтың май қышқылдарының ұзындығы, қаныққандық дәрежесі және кеңістіктік конфигурациясы мембрана бетінен тұтқырлығына, өткізгіштігіне және ақуыз-липидтік өзара әрекеттесу сипатына әсер етеді [10]. Осылайша, липидтік құрамдағы аздаған өзгерістердің өзі жасуша мембранасының функционалдық күйіне және жалпы метаболикалық процестердің тиімділігіне елеулі ықпал етуі мүмкін.

Зерттеу материалдары мен әдістері.

Бұл зерттеуде қауын мен асқабақ тұқымдарының химиялық құрамы және олардан алынған майлардың физика-химиялық қасиеттері зерттелінді. Липидті және ақуызды кешеннің, аминқышқылдарының және көмірсулардың құрамының физика-химиялық сипаттамалары МЕСТ 52110-2003 бойынша, токоферолдардың мөлшері МЕСТ 30417-96 бойынша анықталды.

Асқабақтың құрамында өт бөлінуін күшейтетін және оның құрамын жақсартатын заттар бар. Сонымен қатар, май бауырға пайдалы, оны қалпына келтіреді және қабынудың алдын алады. Сондай-ақ, оның ас қорыту жүйесіне пайдалы әсер ететін жараларды жазу қасиеттері

бар, ал В дәрумендері асқазан қышқылдығын қалыпқа келтіреді. Асқабақ дәнінің майында B_1, B_2, B_6, С, Р, Е, РР бірегей дәрумендерінің бай кешені бар; биологиялық белсенді заттардың табиғи теңгерімді топтары: фосфолипидтер, токоферолдар, каротиноидтар, флавоноидтар, қаныққан және қанықпаған май қышқылдары, минералды қосылыстар, микроэлементтер және басқа да пайдалы заттар [11, 13]. Асқабақ тұқымдарын зерттеу, оның құрамында ақуыздардың, майлардың, тағамдық талшықтардың, органикалық қышқылдардың, минералды заттар мен дәрумендердің айтарлықтай көп мөлшерін қамтитынын көрсетті. Асқабақ тұқымдарының химиялық құрамы 1-кестеде келтірілген.

Кесте 1 – Асқабақ тұқымдарының химиялық құрамы (100 г үшін)

Көрсеткіштер	Мөлшері	Дәрумендер	Мөлшері	Минеральды заттар	Мөлшері
Су	84,4 г	А дәрумені	228 мкг	Натрий	3,87 мг
Ақуыздар	24,6 г	B_3 дәрумені	0,55 мг	Калий	147 мг
Майлар	31,9 г	B_5 дәрумені	0,47 мг	Кальций	23,4 мг
Көмірсулар	13,5 г	B_6 дәрумені	0,11 мг	Магний	535,1 мг
Тағамдық талшықтар	4,3 г	B_9 дәрумені	14,0 мкг	Мыс	1,39 мг
Күл	4,9 г	К дәрумені	51,4 мкг	Селен	5,6 мкг
Органикалық қышқылдар	0,1 г	Е дәрумені	0,9 мг	Мырыш	7,45 мг
Қант	1,48 г	С дәрумені	2,3 мг	Темір	14,96 мг
Калориялық құрамы	541 кКал	РР дәрумені	5,27 мг	Фосфор	1174,0 мг

Асқабақ тұқымдары гипертония және қант диабетімен ауыратындар үшін де пайдалы: олар қан қысымын тұрақтандырады және қандағы қант деңгейін төмендетеді. Сонымен қатар, асқабақ тұқымдары жақсы диуретик және холеретикалық әсерге ие. Мырышқа бай, олар есте сақтау қабілетін нығайтады, ми қызметін жақсартады және шаршауды басады.

Өсімдік майларындағы май қышқылдарының толық спектрі балалардың дамуында, ересектерде қартаю процесін баяулатуда және бірқатар аурулардың алдын алуда және емдеуде маңызды рөл атқарады [14].

Қауын тұқымының өнімділігі 1,5%-ға дейін жетеді, ал өңдеу маусымындағы қауын тұқымдарының жалпы өнімділігі 3000 тоннаға дейін жетеді. Қауын тұқымдары – құрғақ зат негізінде 33%-дан 35%-ға дейін липидтер мен 35%-дан 36%-ға дейін ақуыздардан тұратын перспективалы майлы дақыл шикізаты. Сондықтан, қауын тұқымын өңдеу жануарлар майлары басым халықтың салауатты тамақтануы үшін, сондай-ақ жоғары ақуызды өнімдер өндіру үшін маңызды болып табылатын 85%-ға дейін қанықпаған май қышқылдары бар линол өсімдік майларының кеңейтілген ауқымын алуға мүмкіндік береді [15]. Қауын тұқымдарының химиялық құрамы 2-кестеде көрсетілген.

Кесте 2 – Қауын тұқымдарының химиялық құрамы

Көрсеткіш атаулары	Көрсеткіш мағынасы	
	Тұқымы	Тұқым ядросы
Ылғал мен ұшқыш заттардың массалық үлесі, %	53,9	5,13
Жалпы ақуыз мөлшері, %	20,9	37,9
Майлылығы, %	23,6	54,7
Жалпы күлділігі, %	2,89	4,4

Жаңа піскен қауын тұқымдарында ылғалдылық пен жалпы күл мөлшері 53,9% және 2,89% болды. Тұқымдардағы майдың мөлшері қабықтың болуына байланысты өте жоғары, 23,6%-дан 54,7%-ға дейін болды. Жалпы ақуыз мөлшері де жоғары болды, тұқымдар үшін 20,9%-ға және дәндер үшін 37,9%-ға жетті.

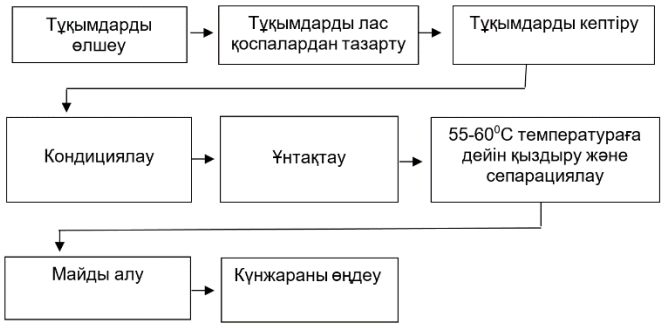
Қауын дәнінің майы липемия мен гемостазды реттейтін, метаболикалық процестерді белсендіретін және орталық жүйке жүйесі мен көру жүйесіндегі мембраналық құрылымдарға әсер ететін полиқанықпаған май қышқылдарына бай.

Май терінің қоректенуін жақсартады, косметикада, әсіресе жас дақтарын емдеу үшін қолданылады. Ол тек жоғары сапалы кремдер мен косметикалық майларда кездеседі [4].

Қауын дәнінің майы - емдік және профилактикалық агент, оның құрамында жүрек-қан тамырлары ауруларының қаупін азайтуға, қандағы холестерин деңгейін төмендетуге және

бауырда май жиналуын азайтуға көмектесетін көптеген дәрумендер мен биологиялық белсенді заттар бар. Ол шаштың түсуінің алдын алады және асқазан-ішек жолдары мен жүйке жүйесіне пайдалы әсер етеді. Қауын майы дәрілік, профилактикалық, аспаздық және косметикалық мақсаттарда қолданылады [16].

Қауын мен асқабақ тұқымдарынан май алу үшін суық сығымдау әдісі қолданылды. Бұл мақалада суық сығу әдісін қолдана отырып, қауын мен асқабақ тұқымдарынан өсімдік майын алудың технологиялық схемасы ұсынылған. Осы технологиялық схемаға сәйкес, майлы дақылдардан алынатын шикізат қабылданады, өлшенеді, өңдеуге дайындалады, қоспалардан тазартылады және қауын тұқымдары үшін 7-11% және асқабақ тұқымдары үшін 8-10% ылғалдылыққа дейін кептіріледі. Кептіру майлы дақылдарды термиялық өңдеуге арналған бұрандалы құрылғыда, алдымен 50^0С-тан 55^0С-қа дейінгі температурада 2-3 минут, содан кейін 60^0С-тан аспайтын температурада 20-23 минут бойы 7%-дан 11%-ға дейінгі ылғалдылықта жүзеге асырылады. Содан кейін алынған май кондицияланып және ұнтақтауға жіберіледі. Ұнтақтау жарманың гетерогенді қоспасын алу үшін дискілік ұсатқышты пайдаланып, жүзеге асырылады. Ұсақталған қауын тұқымдарын престеу бастапқыда 50^0С-тан аспайтын температурада жүзеге асырылады, содан кейін престеу циклі аяқталғанға дейін температура 8-10 секунд бойы 55^0С және 60^0С аралығында сақталады.



Сурет 1 – Қауын мен асқабақ тұқымдарынан май алудың технологиялық схемасы

Зерттеу нәтижелері және оларды талқылау

Қауын мен асқабақ тұқымдарынан суық сығымдау арқылы алынған майдың физика-химиялық қасиеттері [17] әдістерін қолдану арқылы анықталды және нәтижелері 3-кестеде келтірілген.

Кесте 3 – Қауын мен асқабақ тұқымдарынан суық сығымдау арқылы алынған майлардың негізгі физика-химиялық қасиеттері

Көрсеткіш атауылары	Көрсеткіш мағынасы	
	Қауын тұқымдарынан алынған май	Асқабақ тұқымдарынан алынған май
20^0С температурадағы тығыздық, г/см^3	0,917	0,910
Сыну көрсеткіші, 20D	1,4756	1,4697
Қышқылдық саны, мг КОН/г	1,01	0,67
Йод саны	117,0	103,5
Сабынданбайтын заттардың мөлшері, %	1,04	5,4
Бос май қышқылдарының құрамы, %	0,63	0,39
Түс саны, мг йод	6,0	36,0
Пероксид саны, ммоль белсенді оттегі/кг	8,5	9,7
Ылғал мен ұшқыш заттардың массалық үлесі, %	1,05	0,47
β-каротинге шаққанда каротиноидтардың жалпы мөлшері, мг%	13,47	10,9
α-токоферолдарға шаққанда токоферолдардың жалпы мөлшері, мг%	43,86	127,0

3-кестеден суық сығымдау арқылы алынған қауын және асқабақ майларының құрамында қышқылдығы төмен, ең жоғары сортты күнбағыс майының қышқыл санынан аспайтын маңызды тамақ өнімі бар екенін көруге болады. Бұл майлардың құрамында майдың биологиялық құндылығын арттыратын каротиноидтар мен токоферолдар да бар.

Қорытынды

Осылайша, қауын мен асқабақ тұқымдарынан алынған майлардың құрамында пайдалы компоненттері көп: майда еритін дәрумендер, фитостеролдар, антиоксиданттар. Асқабақ пен қауын тұқымдарынан алынған майлар кез келген термиялық өңдеуге ұсынылмайды; оларды дербес және дәстүрлі майлармен қоспа түрінде, көкөніс салаттарына тұздық ретінде және бұқтырылған көкөністерге, етке және балыққа тамшылатып құю ретінде қолдануға болады.

Әдебиеттер тізімі

1. Гусев Е.А. Анализ производства и потребления разных типов растительного масла в Республике Казахстан. / Е.А. Гусев, С.Ф. Колосова // Сборник материалов конференции «Единство, образования, науки и инноваций». – 2011. – С. 162-168.
2. Семена тыквы – функциональный ингредиент для создания новых продуктов питания / К.С. Ежова и др. // Современные проблемы науки и образования. 2015. – № 2, Часть 3. – С. 20-26.
3. Химический состав масел семян некоторых бахчевых культур Астраханской области, выделенных методом сверхкритической флюидной экстракции / В.Б. Ковалев и др. // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 12-1. – С. 54-57.
4. Таранова Е.С. Основы интенсификации производства бахчевых культур в условиях Нижнего Поволжья / Е.С. Таранова, Н.В. Тютюма // Теоретические и прикладные проблемы агропромышленного комплекса. – 2012. – № 1. – С. 28-32.
5. Николайчук Л.В. Целебные растительные масла (лекарства домашней аптеки). / Л.В. Николайчук, Э.В. Николайчук, О.Н. Головейко. – Ростов н/Д: Феникс, 2007. – 320 с.
6. Касьянов Г.И. Технология переработки плодов и семян бахчевых культур / Г.И. Касьянов, В.В. Деревенко, Е.П. Франко. – Краснодр: Экоинвест, 2010. – 148 с.
7. Мирзоев Г.Х. Совершенствование технологии получения растительного масла и высокопротеинового жмыха из семян дыни / Г.Х. Мирзоев, В.В. Деревенко, А.В. Тагаков // Известия вузов. Пищевая технология. – 2014. – № 4. – С. 93-95.
8. Джингилбаев С.С. Совершенствование процесса переработки семян на растительное масло методом холодного отжима / С.С. Джингилбаев, А.Е. Кайрбаева // Материалы республ.научно-практ.конф. «Наука. Образование. Молодежь». – 2016. – С. 214-216.
9. Инновационная технология получения деликатесных растительных масел и высокопротеиновых продуктов из масличных семян бахчевых культур Текст] / В.В. Деревенко др. // VIII-я Международная конференция масложировой комплекс России «Новые аспекты развития», Москва МПА, 2014. – С. 30-31.
10. Титков В.И. Совершенствование агротехники бахчевых культур в степной зоне Южного Урала / В.И. Титков, В.В. Безуглов // Земледелие. – 2006. – № 6. – С. 35-36.
11. Курьянова Н.Х. Товароведение и экспертиза пищевых жиров: методические указания к выполнению лабораторных работ для студентов / Н.Х. Курьянова. – Димитровград: Технологический институт (филиал) ФГОУ ВПО «УГСХА», 2018. – 84 с.
12. Amulu N.F., Amulu P.E., Mbah G.O., Ude C.N. Comparative Study of the Effects of Process Parameters on the Yield of Oil from Melon Seed (Cococynthis citrullus) and Coconut Fruit (Cocos nucifera). http://waet.org/author/patrick-eamulu.
13. Горлов И.Ф. Технология получения масла тыквенного и его биологическая ценность. / И.Ф. Горлов, Т.В. Каренгина, Л.Н. Чабан // Хранение и перераб. сельхоз. сырья. – 1997. – № 4. – С. 25-26.
14. Дорофеева В.Ф. Руководство по апробации бахчевых культур / В.Ф. Дорофеева. – М.: Агропромиздат, 1985. – 385 с.
15. Determination of selected physical properties of Egusi melon (Citrullus colocynthis lanatus) seeds / Y.M. Bande et al // Journal of basic & applied sciences. – 2016. – Vol.8. – P. 257-265/
16. Деревенко В.В. Физико-механические характеристики семян дыни сорта «Амири» / В.В. Деревенко, Г.Х. Мирзоев, Е.А. Калиенко // Известия вузов. Пищевая технология. – 2013. – № 5-6. – С. 112-113/
17. Лабораторный практикум по технологии производства растительных масел / В.М. Копейковский и др. – М.: Агропромиздат, 1990. – 192 с.

References

1. Gusev E.A. Analiz proizvodstva i potrebleniya raznyh tipov rastitel'nogo masla v Respublike Kazahstan. / E.A. Gusev, S.F. Kolosova // Sbornik materialov konferencii «Edinstvo, obrazovaniya, nauki i innovaciJ». – 2011. – S. 162-168. (In Russian).
2. Semena tykvy – funkcional'nyj ingredient dlya sozdaniya novyh produktov pitaniya / K.S. Ezhova i dr. // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. 2015. – № 2, Chast' 3. – S. 20-26. (In Russian).
3. Himicheskij sostav masel semyan nekotoryh bahchevyh kul'tur Astrahanskoj oblasti, vydelennyh metodom sverhkriticheskoj flyuidnoj ehkstrakcii / V.B. Kovalev i dr. // Fundamental'nye issledovaniya. – 2015. – № 12-1. – S. 54-57. (In Russian).
4. Taranova E.S. Osnovy intensifikacii proizvodstva bahchevyh kul'tur v usloviyah Nizhnego Povolzh'ya / E.S. Taranova, N.V. Tyutyuma // Teoreticheskie i prikladnye problemy agropromyshlennogo kompleksa. – 2012. – № 1. – S. 28-32. (In Russian).
5. Nikolajchuk L.V. Celebnye rastitel'nye masla (lekarstva domashnej apteki). / L.V. Nikolajchuk, EH.V. Nikolajchuk, O.N. Golovejko. – Rostov n/D: Feniks, 2007. – 320 s. (In Russian).
6. Kas'yanov G.I. Tehnologiya pererabotki plodov i semyan bahchevyh kul'tur / G.I. Kas'yanov, V.V. Derevenko, E.P. Franko. – Krasnodr: Ehkoinvest, 2010. – 148 s. (In Russian).
7. Mirzoev G.H. Sovershenstvovanie tehnologii polucheniya rastitel'nogo masla i vysokoproteinovogo zhmyha iz semyan dyni / G.H. Mirzoev, V.V. Derevenko, A.V. Tagakov // Izvestiya vuzov. Pishchevaya tehnologiya. – 2014. – № 4. – S. 93-95. (In Russian).
8. Dzhingilbaev S.S. Sovershenstvovanie processa pererabotki semyan na rastitel'noe maslo metodom holodnogo otzhima / S.S. Dzhingilbaev, A.E. Kajrbaeva // Materialy respubl.nauchno-prakt.konf. «Nauka. Obrazovanie. Molodezh'». – 2016. – S. 214-216. (In Russian).
9. Innovacionnaya tehnologiya polucheniya delikatesnyh rastitel'nyh masel i vysokoproteinovyh produktov iz maslichnyh semyan bahchevyh kul'tur Tekst] / V.V. Derevenko dr. // VIII-ya Mezhdunarodnaya konferenciya maslozhirovoj kompleks Rossii «Novye aspekty razvitiYA», Moskva MPA, 2014. – S. 30-31. (In Russian).
10. Titkov V.I. Sovershenstvovanie agrotehniki bahchevyh kul'tur v stepnoj zone Yuzhnogo Urala / V.I. Titkov, V.V. Bezuglov // Zemledelie. – 2006. – № 6. – S. 35-36. (In Russian).
11. Kur'yanova N.H. Tovarovedenie i ehkspertiza pishchevyh zhirov: metodicheskie ukazaniya k vypolneniyu laboratornyh rabot dlya studentov / N.H. Kur'yanova. – Dimitrovgrad: Tehnologicheskij institut (filial) FGOU VPO «UGSHA», 2018. – 84 s. (In Russian).
12. Amulu N.F., Amulu P.E., Mbah G.O., Ude C.N. Comparative Study of the Effects of Process Parameters on the Yield of Oil from Melon Seed (Cococynthis citrullus) and Coconut Fruit (Cocos nucifera). http://waet.org/author/patrick-eamulu. (In English).
13. Gorlov I.F. Tehnologiya polucheniya masla tykvennogo i ego biologicheskaya cennost'. / I.F. Gorlov, T.V. Karengina, L.N. Chaban // Hranenie i pererab. sel'hoz. syr'ya. – 1997. – № 4. – S. 25-26. (In Russian).
14. Dorofeeva V.F. Rukovodstvo po aprobacii bahchevyh kul'tur / V.F. Dorofeeva. – M.: Agropromizdat, 1985. – 385 s. (In Russian).
15. Determination of selected physical properties of Egusi melon (Citrullus colocynthis lanatus) seeds / Y.M. Bande et al // Journal of basic & applied sciences. – 2016. – Vol.8. – R. 257-265. (In Russian).
16. Derevenko V.V. Fiziko-mehanicheskie harakteristiki semyan dyni sorta «AmirI» / V.V. Derevenko, G.H. Mirzoev, E.A. Kalienko // Izvestiya vuzov. Pishchevaya tehnologiya. – 2013. – № 5-6. – S. 112-113. (In Russian).
17. Laboratornyj praktikum po tehnologii proizvodstva rastitel'nyh masel / V.M. Kopejkovskij i dr. – M.: Agropromizdat, 1990. – 192 s. (In Russian).

Б.М. Хамитова[1]*, А.Р. Тасполтаева[1], Ж.Б. Калдыбекова[1], Б.М. Искаков[2], М.Т. Мурсалыкова[3]

[1]Южно-Казахстанский университет им. М. Аэзова,
160012, Республика Казахстан, г. Шымкент, пр. Тауке хана, 5
[2]Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина,
010011, Республика Казахстан, г. Астана, пр. Женис, 62
[3]Шәкәрім университет, 071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А
*e-mail: barno-007@mail.ru

ИЗУЧЕНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ ИЗ СЕМЯН БАХЧЕВЫХ КУЛЬТУР

Растительные масла и продукты на их основе в последние годы стали важной составляющей рациона питания населения Казахстана. Наряду с подсолнечным маслом, к числу растительных масел, производимых в стране, относятся рапсовое, сафлоровое, кукурузное и хлопковое масла. В целях расширения ассортимента растительных масел в республике важное значение имеет разработка и внедрение высокоэффективных технологий переработки редких и нетрадиционных масличных культур, в том числе семян дыни и тыквы.

В статье рассмотрена возможность использования бахчевых культур для получения растительного масла. В результате были разработаны технологии производства растительных масел из семян бахчевых культур. В работе по получению растительных масел использовалось нетрадиционное для масложировой промышленности сырьё – семена дыни и тыквы. Исследованы химический состав и физико-химические показатели семян тыквы.

Определены физико-химические свойства масел, полученных методом холодного отжима из семян дыни и тыквы. В результате исследований установлено, что показатели качества масел из семян дыни и тыквы соответствуют требованиям стандарта для нерафинированного подсолнечного масла высшего сорта. В связи с этим переработка семян дыни и тыквы позволяет расширить ассортимент растительных масел.

Кроме того, переработка семян бахчевых культур способствует комплексному использованию сельскохозяйственного сырья. Исследования в данном направлении позволяют расширить сырьевую базу отечественной масложировой промышленности и снизить зависимость от импортных ресурсов. Масла, полученные из семян дыни и тыквы, могут применяться не только в пищевых целях, но и при производстве функциональных и профилактических продуктов. Таким образом, использование нетрадиционного масличного сырья является актуальным с научной и производственной точек зрения.

Ключевые слова: *масличные семена, маслосодержащие отходы, полиненасыщенные жирные кислоты, фитохимические вещества, семена дыни, семена тыквы, отжим масла.*

B. Khamitova[1]*, A. Taspoltayeva[1], Zh. Kaldybekova[1],
B. Iskakov[2], M. Mursalykova[3]
[1]M. Auezov' South-Kazakhstan University,
160012, Republic of Kazakhstan, Shymkent, Tauke Khan Ave., 5
[2]S. Seifullin Kazakh Agro Technical Research University,
010011, Republic of Kazakhstan, Astana, Zhenis avenue, 62
[3]Shakarim University,
071412, Republic of Kazakhstan, Semey, Glinka str. 20 A
*e-mail: barno-007@mail.ru

STUDYING THE POSSIBILITY OF OBTAINING VEGETABLE OILS FROM MELON SEEDS

Vegetable oils and products based on them have become an essential component of the dietary pattern of the population of Kazakhstan in recent years. Along with sunflower oil, the vegetable oils produced in Kazakhstan include rapeseed, safflower, corn, and cottonseed oils. In order to expand the range of vegetable oils in the country, it is important to develop and implement highly efficient technologies for processing rare and non-traditional oil-bearing crops, including melon and pumpkin seeds.

The article considers the possibility of using cucurbit crops for the production of vegetable oils. As a result, technologies for producing vegetable oils from cucurbit seeds were developed. In the production of vegetable oils, non-traditional raw materials for the oil and fat industry, namely melon and pumpkin seeds, were used. The chemical composition and physicochemical parameters of pumpkin seeds were investigated.

The physicochemical properties of oils obtained by cold pressing of melon and pumpkin seeds were determined. The study of oils derived from melon and pumpkin seeds showed that their quality indicators comply with the standards for the highest grade of unrefined sunflower oil. Therefore, the processing of melon and pumpkin seeds makes it possible to expand the assortment of vegetable oils.

In addition, the processing of cucurbit seeds contributes to the integrated utilization of agricultural raw materials. Research in this area helps to expand the raw material base of the domestic oil and fat industry and reduce dependence on imports. Oils obtained from melon and pumpkin seeds can be used not only for food purposes but also in the production of functional and preventive food products. Thus, the use of non-traditional oil-bearing raw materials is relevant from both scientific and industrial perspectives.

Key words: *oil seeds, oil-containing residues, polyunsaturated fatty acids, phytochemicals, melon seeds, pumpkin seeds, oil pressing.*

Сведения об авторах

Барна Махаматовна Хамитова* – кандидат технических наук, ассоциированный профессор; Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова, Республика Казахстан, Шымкент; e-mail: barno-007@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8377-3938.

Айбала Рысбековна Тасполтаева – кандидат технических наук, доцент, Южно-Казахстанский университет им. М.Ауэзова, Республика Казахстан, Шымкент; e-mail: aibala.taspoltaeva.69@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0286-4721.

Жанат Байжановна Калдыбекова – кандидат технических наук, ассоциированный профессор; Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова, Республика Казахстан, Шымкент; e-mail: zkaldybekova@mail.ru. ORCiD: https://orcid.org/0000-0003-2906-9098.

Бауыржан Мырзабекович Искаков – PhD, старший преподаватель группы образовательных программа «Производство продуктов питания», Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, город Астана, Республика Казахстан; e-mail: baissemey@bk.ru. ORCiD: https://orcid.org/0000-0002-7939-0210.

Майгуль Тауржановна Мурсалыкова – PhD, постдокторант, Шәкәрім университет, Республика Казахстан, город Семей; e-mail: maigul_85@mail.ru. ORCiD: https://orcid.org/0000-0001-5904-9544.

Information about the authors

Barna Khamitova* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, M. Auezov South-Kazakhstan University, Republic of Kazakhstan, Shymkent; e-mail: barno-007@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8377-3938.

Aibala Taspoltayeva – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, M. Auezov South-Kazakhstan University, Republic of Kazakhstan, Shymkent; e-mail: aibala.taspoltaeva.69@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0286-4721.

Zhanat Kaldybekova – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, M. Auezov South-Kazakhstan University, Republic of Kazakhstan, Shymkent; e-mail: zkaldybekova@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2906-9098.

Bauyrzhan Iskakov – PhD, Senior lecturer, Food Production Educational Program Group, Kazakh Agrotechnical research university named after S. Seifullin, Astana, Republic of Kazakhstan; e-mail: baissemey@bk.ru. ORCiD: https://orcid.org/0000-0002-7939-0210.

Maigul Mursalykova – PhD, postdoctoral fellow, Shakarim University, Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: maigul_85@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5904-9544.

Авторлар туралы мәліметтер

Барна Махаматовна Хамитова* – техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор; М. Әуезов атындағы Оңтүстік-Қазақстан университеті, Қазақстан Республикасы, Шымкент; e-mail: barno-007@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8377-3938.

Айбала Рысбекқызы Тасполтаева – техника ғылымдарының кандидаты, доцент, М. Әуезов атындағы Оңтүстік-Қазақстан университеті, Қазақстан Республикасы, Шымкент; e-mail: aibala.taspoltaeva.69@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0286-4721.

Жанат Байжановна Калдыбекова – техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: zkaldybekova@mail.ru. ORCiD: https://orcid.org/0000-0003-2906-9098.

Бауыржан Мырзабекович Искаков – PhD, «Азық-түлік өнімдерінің өндірісі» білім беру бағдарламалар тобының аға оқытушысы, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қаласы, Қазақстан Республикасы; e-mail: baissemey@bk.ru. ORCiD: https://orcid.org/0000-0002-7939-0210.

Майгуль Тауржановна Мурсалыкова – PhD, Шәкәрім университеті, постдокторанты, Қазақстан Республикасы, Семей қ.; e-mail: maigul_85@mail.ru. ORCiD: https://orcid.org/0000-0001-5904-9544.

Редакцияға енуі 06.01.2026
Өңдеуден кейін түсуі 11.03.2026
Жариялауға қабылданды 11.03.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-49

ҒТАХР: 65.39.03

CC BY 4.0
Check for updates

К.Ж. Амирханов*, А.А. Даутова, С.К. Касымов, Ж. Калибекқызы, Э.К. Окусханова
Шәкәрім университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинки к-сі, 20 А
e-mail: aspirant57@mail.ru

ФУНКЦИОНАЛДЫҚ ЖӘНЕ ТӨМЕН КАЛОРИЯЛЫ ЕТ ӨНІМДЕРІ

Андатпа: *Мақалада функционалдық және төмен калориялы ет өнімдерін әзірлеудің қазіргі заманғы бағыттары, әдістемелері және ғылыми зерттеулері жан-жақты қарастырылған. Бұл бағыттың өзектілігі халық арасында дұрыс тамақтануға қызығушылықтың артуы, сондай-ақ тағам өнімдерінің қауіпсіздігіне қойылатын талаптардың күшеюімен түсіндіріледі. Зерттеу барысында май, холестерин және нитриттерді азайту мәселелері талданды, сондай-ақ өнімдерді омега-3 полиқанықпаған май қышқылдарымен, өсімдік текті ақуыздармен, пробиотиктер, пребиотиктер, коллаген, инулин және басқа да функционалдық қоспалармен байыту мүмкіндіктері зерттелді. Сонымен қатар, әртүрлі технологиялық тәсілдер қарастырылды: өсімдік майларын қолдану, ақуыз гидролизаттарын енгізу, екі фазалы эмульсиялар жасау және инновациялық өндірістік әдістерді пайдалану. Бұл әдістердің өнімнің құрылымдық, микробиологиялық, органолептикалық және тағамдық сапасына әсері кешенді түрде бағаланды. Алынған нәтижелер функционалдық ингредиенттердің ет өнімдерінің биологиялық құндылығын, дәмдік және тұтынушылық қасиеттерін жақсартатынын, калорияны төмендетуге, өнімнің тұрақтылығы мен сапасын арттыруға мүмкіндік беретінін көрсетті. Зерттеу төмен калориялы және функционалдық ет өнімдерін өндірудің практикалық маңыздылығын, сондай-ақ оларды өнеркәсіптік өндірісте қолданудың перспективаларын нақты дәлелдейді.*

Түйін сөздер: *функционалдық тағам өнімдері, ет өнімдері, төмен калориялы өнімдер, омега-3, пробиотиктер, коллаген, инулин, өсімдік текті ақуыздар.*

Кіріспе

Соңғы бірнеше онжылдықта халық арасында дұрыс тамақтануға, қанықкан майларды және калориясы жоғары өнімдерді аз тұтынуға деген қызығушылық тұрақты түрде артып келеді. Еуропа, АҚШ және Азия елдерінде халықтың денсаулығын жақсартуға бағытталған ұлттық бағдарламалар жүзеге асырылуда, олардың ішінде тағамдағы май мөлшерін азайту және функционалдық әрі төмен калориялы ет өнімдерін өндіру бойынша шаралар қарастырылған [1-3].

Дәстүрлі ет өнімдері май, холестерин, натрий және нитриттерге бай, бұл олардың функционалдық қасиеттерін және қоректік құндылығын шектейді. Осы мәселені шешу үшін қазіргі заманда мынадай әдістер қолданылады:

- Жануарлық майдың бір бөлігін өсімдік майларымен алмастыру;
- Ақуыз гидролизаттары мен тағамдық клетчатканы пайдалану;
- Өнімдерді омега-3 ПМҚ, пробиотиктер және пребиотиктермен байыту;
- Екі фазалы эмульсиялар және инновациялық технологиялық сұлбаларды енгізу.

Осы зерттеудің міндеті – функционалдық және төмен калориялы ет өнімдеріне қатысты қазіргі ғылыми деректерді жүйелеу, әртүрлі ингредиенттердің физико-химиялық, микробиологиялық және сенсорлық көрсеткіштерге әсерін бағалау.

Зерттеу әдістері

Зерттеу қазіргі заманғы ғылыми әдебиеттер мен халықаралық стандарттарға сүйене отырып жүргізілді. Негізгі ақпарат көздері 2019-2025 жылдар аралығындағы ғылыми мақалалар, патенттер, халықаралық тағам технологиясы журналының мәліметтері [4-6], сондай-ақ ДДСҰ мен ЕО ұсынымдары негізінде талданды.

Сонымен қатар зерттеуде:

- функционалдық ингредиенттердің ет өнімдерінің физико-химиялық және микробиологиялық қасиеттеріне әсері;
- дәрумендер, минералдар және биологиялық белсенді заттардың биожетімділігі;
- өнімдердің органолептикалық көрсеткіштер сипаттамасы мен сақтау мерзімі зерттелді.

©К.Ж. Амирханов, А.А. Даутова, С.К. Касымов, Ж. Калибекқызы, Э.К. Окусханова, 2026

Бұл әдістер өнімнің қауіпсіздігі мен тағамдық құндылығын арттыру үшін нақты ғылыми негіздер жасауға мүмкіндік береді.

1. Май мен холестеринді азайту

Көптеген елдерде жануарлық майдың бір бөлігін өсімдік майларымен және эмульсиялармен алмастыру бойынша зерттеулер жүргізілуде. Испанияда сыровяленые өнімдерде холестерин деңгейін төмендету мақсатында соя ақуызы мен сумен дайындалған оливковое май эмульсиясы қолданылды. Нәтижелер көрсеткендей, свининаның 55%-ға дейін алмастырылуы pH, судың белсенділігі және органолептикалық көрсеткіштерге әсер етпейді, бірақ май қышқылдарының құрамын жақсартады. Оптималды нұсқа – 25% алмастыру, ол өнімнің дәмі мен текстурасын сақтайды [1].

Испандық ғалымдар төмен майлы Болонская шұжығының рецептурасын ұсынды, онда шошқа етінің бір бөлігі зығыр май және теңіз балдырларының майы (Algaeoil) эмульсиясымен алмастырылды. Шұжық өнімі α-линолен қышқылы және докозагексаен қышқылы (ДГК) арқылы байытылды, бұл оның нутрицевтикалық құндылығын арттырып, калорияны 85 ккал/100 г-ға дейін төмендетіп, ω-6/ω-3 қатынасын 0,4 сақтады [2].

Оңтүстік Кореяда шошқаның қыртыс майы өсімдік майларымен алмастыру сосискалардың ылғал ұстамдылығын арттырады және холестерин мөлшерін азайтады, алайда тым үлкен алмастыру өнімнің беріктігі мен құрылымына теріс әсер етеді [3].

2. Функционалдық ингредиенттерді қолдану

Клетчатка: тағамдық құндылықты арттырады, калорияны төмендетеді, текстураны жақсартады. Цитрус клетчаткасы, қызылша және асқабақ пюресі колбаса өнімдерінің функционалдығын жақсартуда тиімді [5].

Пробиотиктер мен пребиотиктер: Lactobacillus, Bifidobacterium, Propionibacterium және Saccharomyces cerevisiae ішек микрофлорасына оң әсер етіп, иммунитетті жақсартады [9].

Коллаген: гидролизделген коллаген ылғал ұстамдылығын арттырады, құрылымды жақсартады және калорияны төмендетеді [10].

Инулин: майды алмастырады, өнімнің тығыздығын арттырады, гелдік тор қалыптастырады, колбаса текстурасын жақсартады [4, 5].

3. Эмульсиялар және екі фазалы жүйелер қолдану мүмкіндіктері: май мөлшерін азайту; бөтен дәмдерді жою; компоненттерді қорғау; өнімнің құрылымы мен тұрақтылығын жақсарту [8, 9].

4. Отандық және ресейлік зерттеулер

Ресейде калориясы төмен шұжықтарды калорияны 20-30% азайту зерттелген, органолептикалық қасиеттер сақталған. Қазақстанда бұл сегмент дамудың бастапқы сатысында, заманауи технологияларды енгізу функционалдық ет өнімдерінің ассортиментін кеңейтеді [4, 10].

Зерттеу нәтижелері

Майды өсімдік майлары (зәйтүн, зығыр, жүгері, күнбағыс) және инулин арқылы алмастыру калорияны 20-35% төмендетеді, органолептикалық қасиеттерді сақтайды. Ақуыз гидролизаттары мен коллаген ылғал ұстамдылығын және ақуыз құрамын арттырады. Пробиотиктер мен пребиотиктер ішек микрофлорасына оң әсер етіп, өнімнің функционалдығын қамтамасыз етеді. Екі фазалы эмульсиялар майды 15-20% алмастырады және құрылым тұрақтылығын арттырады. Сенсорлық бағалау көрсеткендей, оптималды алмастырулар өнімнің дәмі, құрылымы және түсін дәстүрлі деңгейде сақтайды.

Қазіргі функционалдық және төмен калориялы ет өнімдерін әзірлеудің заманауи тәсілдері:

- май, холестерин, натрий және нитриттерді азайту;
- омега-3, пробиотиктер, пребиотиктер, коллаген және клетчаткамен байыту;
- өсімдік майлары, инулин, ақуыз гидролизаттары және эмульсияларды пайдалану.

Функционалдық ингредиенттер етпен өзара әрекеттесіп, биологиялық жетімділікке, сенсорлық және технологиялық қасиеттерге әсер етеді. Майды алмастыру мөлшерін оңтайландыру маңызды, бұл өнімнің құрылымы мен дәмін сақтау үшін қажет.

- Майды азайту үшін өсімдік майлары, инулин және ақуыз гидролизаттарын қолдану;
- Функционалдығын арттыру үшін клетчатка, коллаген, пробиотиктер және пребиотиктер қосу;

- Калорияны төмендету және текстураны жақсарту үшін екі фазалы эмульсияларды пайдалану;
- Сенсорлық қасиеттерді әр кезеңде бағалау;
- ДДСҰ ұсынымдарына сәйкес технологияларды өндіріс желілеріне енгізу.

Қорытынды

Функционалдық және төмен калориялы ет өнімдері заманауи ет өңдеу кәсіпорындары үшін перспективалық бағыт болып табылады. Май, холестерин және натрийді азайту өнімнің биологиялық құндылығын арттырады және дұрыс тамақтану принциптеріне сәйкес келеді. Клетчатка, омега-3, коллаген, пробиотиктер және пребиотиктер өнімнің функционалдығын қамтамасыз етеді. Екі фазалы эмульсиялар, ақуыз гидролизаттары және инулин майды алмастырып, калорияны төмендетеді, органолептикалық қасиеттерді бұзбайды. Болашақ зерттеулер рецептураларды оңтайландыруға, функционалдық ингредиенттердің тұрақтылығын және қолжетімділік деңгейін арттыруға бағытталуы тиіс.

Әдебиеттер тізімі

1. Development of Healthier and Functional Dry Fermented Sausages: Present and Future / N. Sirini et al // Foods. – 2022. – Vol. 11, № 8. https://doi.org/10.3390/foods11081128.
2. Разработка технологии мясорастительных колбасных изделий диетического назначения / Е.Ю. Ухина и др. // Технологии и товароведение сельскохозяйственной продукции. – 2019. – № 2(13). – С. 87-90.
3. Performance of reduced fat-reduced salt fermented sausage with added microcrystalline cellulose, resistant starch and oat fiber using the simplex design / J.M. Santos et al // Meat Science. – 2021. – Vol.175. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2021.108433.
4. Effect of regenerated cellulose fiber on the physicochemical properties and sensory characteristics of fat-reduced emulsified sausage / Y. Zhao et al // LWT – Food Science and Technology. – 2018. – Vol.97. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.06.053.
5. Ахметова В.Ш. Функционалдық тамақтануға арналған құрама ет өнімінің технологиясы / В.Ш. Ахметова, Н.С. Машанова // Семей қаласының Шәкәрім атындағы мемлекеттік университетінің хабаршысы. – 2020. – № 4(92). – Б.108-111.
6. Functional meat products: Trends in pro-, pre-, syn-, para- and post-biotic use / C.F. Manassi et al // Food Research International. – 2022. – Vol.154. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111035.
7. Use of probiotic microorganisms in the formulation of healthy meat products / N. Sirini et al // Current Opinion in Food Science. – 2021. – Vol.38. – P. 141-146.
8. Application of Lactobacillus paracasei LPCO2 and lactulose as a potential symbiotic system in the manufacture of dry-fermented sausage / S.F.R. Coelho et al // LWT – Food Science and Technology. – 2019. – Vol.102. – P. 254-259.
9. Рыспаева У.А. Технология производства ферментированной полукопченой колбасы / У.А. Рыспаева, Ш.Б. Байтукенова, С.Б. Байтукенова // Вестник Алматинского технологического университета. – 2023. – № 2. – С. 131-139.
10. Enhancing Nutrition and Palatability: The Development of Cooked Sausages with Protein Hydrolysate from Secondary Raw Materials for the Elderly / T. Tultabayeva et al // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13(18). https://doi.org/10.3390/app131810462.

References

1. Development of Healthier and Functional Dry Fermented Sausages: Present and Future / N. Sirini et al // Foods. – 2022. – Vol. 11, № 8. https://doi.org/10.3390/foods11081128. (In English).
2. Razrabotka tekhnologii myasorastitel'nykh kolbasnykh izdelii dieticheskogo naznacheniya / E.YU. Ukhina i dr. // Tekhnologii i tovarovedenie sel'skokhozyaistvennoi produktsii. – 2019. – № 2(13). – S. 87-90. (In Russian).
3. Performance of reduced fat-reduced salt fermented sausage with added microcrystalline cellulose, resistant starch and oat fiber using the simplex design / J.M. Santos et al // Meat Science. – 2021. – Vol.175. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2021.108433. (In English).
4. Effect of regenerated cellulose fiber on the physicochemical properties and sensory characteristics of fat-reduced emulsified sausage / Y. Zhao et al // LWT – Food Science and Technology. – 2018. – Vol.97. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.06.053. (In English).

5. Akhmetova V.SH. Funktsionaldyk tamaktanuga arnalgan kurama et oniminin tekhnologiyasy / V.SH. Akhmetova, N.S. Mashanova // Semei kalasynyn Shakarim atyndagy memlekettik universitetinin khabarshysy. – 2020. – № 4(92). – B.108-111. (In Kazakh).
6. Functional meat products: Trends in pro-, pre-, syn-, para- and post-biotic use / C.F. Manassi et al // Food Research International. – 2022. – Vol.154. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111035. (In English).
7. Use of probiotic microorganisms in the formulation of healthy meat products / N. Sirini et al // Current Opinion in Food Science. – 2021. – Vol.38. – R. 141-146. (In English).
8. Application of Lactobacillus paracasei LPCO2 and lactulose as a potential symbiotic system in the manufacture of dry-fermented sausage / S.F.R. Coelho et al // LWT – Food Science and Technology. – 2019. – Vol.102. – R. 254-259. (In English).
9. Ryspaeva U.A. Tekhnologiya proizvodstva fermentirovannoi polukopchenoi kolbasy / U.A. Ryspaeva, SH.B. Baitukenova, S.B. Baitukenova // Vestnik Almatinskogo tekhnologicheskogo universiteta. – 2023. – № 2. – S. 131-139. (In Russian).
10. Enhancing Nutrition and Palatability: The Development of Cooked Sausages with Protein Hydrolysate from Secondary Raw Materials for the Elderly / T. Tultabayeva et al // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13(18). https://doi.org/10.3390/app131810462. (In English).

К.Ж. Амирханов*, А.А. Даутова, С.К. Касымов, Ж. Калибекқызы, Э.К. Окусханова
Шәкәрім Университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А
*e-mail: aspirant57@mail.ru

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ И НИЗКОКАЛОРИЙНЫЕ МЯСНЫЕ ПРОДУКТЫ

В статье всесторонне рассмотрены современные направления, методики и научные исследования по разработке функциональных и низкокалорийных мясных продуктов. Актуальность данного направления объясняется ростом интереса населения к правильному питанию, а также ужесточением требований к безопасности пищевых продуктов. В ходе исследования были проанализированы вопросы снижения содержания жиров, холестерина и нитритов, а также изучены возможности обогащения продуктов омега-3 полиненасыщенными жирными кислотами, растительными белками, пробиотиками, пребиотиками, коллагеном, инулином и другими функциональными добавками. Кроме того, рассмотрены различные технологические подходы: использование растительных масел, введение гидролизатов белка, создание двухфазных эмульсий и применение инновационных производственных методов. Влияние этих подходов на структурные, микробиологические, органолептические и пищевые качества продуктов оценивалось комплексно. Полученные результаты показали, что функциональные ингредиенты способствуют повышению биологической ценности мясных продуктов, улучшению их вкусовых и потребительских характеристик, снижению калорийности, а также увеличению стабильности и качества продукции. Исследование подтверждает практическую значимость производства низкокалорийных и функциональных мясных продуктов и доказывает перспективность их применения в промышленном производстве.

Ключевые слова: *функциональные пищевые продукты, мясные продукты, низкокалорийные продукты, омега-3, пробиотики, коллаген, инулин, растительные белки.*

Zh. Amirkhanov*, A. Dautova, S. Kasymov, Zh. Kalibekkyzy, E. Okuskhanova
Shakarim University,
071412, Republic of Kazakhstan, Semey, Glinki St., 20 A
*e-mail: aspirant57@mail.ru

FUNCTIONAL AND LOW-CALORIE MEAT PRODUCTS

The article provides a comprehensive overview of the modern directions, methodologies, and scientific research in the development of functional and low-calorie meat products. The relevance of this area is explained by the increasing interest of the population in healthy nutrition, as well as the growing requirements for the safety and quality of food products. The study analyzed issues related to reducing fat, cholesterol, and nitrite content in meat products, as well as the possibilities of enriching them with omega-3 polyunsaturated fatty acids, plant-based proteins, probiotics, prebiotics, collagen, inulin, and other functional additives. In addition, various technological approaches were examined, including the use of vegetable oils, incorporation of protein hydrolysates, preparation of two-phase emulsions, and application of innovative industrial methods. The effects of these methods on the structural, microbiological, organoleptic, and nutritional quality of the

products were evaluated in detail. The results demonstrated that functional ingredients can enhance the biological value of meat products, improve taste and consumer properties, reduce calorie content, and increase product stability and quality. This research confirms the practical significance of producing low-calorie and functional meat products, as well as the prospects for their application in industrial meat processing and large-scale production.

Key words: *functional food products, meat products, low-calorie products, omega-3, probiotics, collagen, inulin, plant-based proteins.*

Авторлар туралы мәліметтер

Кумарбек Жунусбекович Амирханов* – техника ғылымдарының докторы, «Тамақ технологиясы» кафедрасының профессоры; Шәкәрім университет, Семей, Қазақстан Республикасы; e-mail: aspirant57@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/ 0000-0002-7988-988X.

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.

Самат Кайратович Касымов – техника ғылымдарының кандидаты, «Тамақ технологиясы» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: samat-kasymov@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7384-6996.

Жанар Қалибекқызы – ғылым кандидаты, доцент, Шәкәрім университеті; e-mail: zhanar_moldabaeva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6384-0646.

Элеонора Құрметқызы Окусханова – қауымдастырылған профессор, PhD, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы, Семей қаласы; e-mail: eokuskhanova@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5139-9291.

Сведения об авторах

Кумарбек Жунусбекович Амирханов* – доктор технических наук, профессор кафедры «Пищевая технология», Шәкәрім университет, Семей, Республика Казахстан; e-mail: aspirant57@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7988-988X.

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.

Самат Кайратович Касымов – кандидат технических наук, ассоц. профессор кафедры «Пищевых технологий», Шәкәрім университеті, Республика Казакстан; e-mail: samat-kasymov@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7384-6996.

Жанар Калибеккызы – кандидат биологических наук, ассоциированный профессор, Шәкәрім университет; e-mail: zhanar_moldabaeva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6384-0646.

Элеонора Курметовна Окусханова – ассоц. профессор, PhD, Шәкәрім университет, Республика Казахстан, город Семей; e-mail: eokuskhanova@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5139-9291.

Information about the authors

Kumarbek Amirkhanov* – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Food Technology, Shakarim University, Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: aspirant57@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7988-988X.

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.

Samat Kasymov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Food Technologies, Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: samat-kasymov@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7384-6996.

Zhanar Kalibekkyzy – Candidate of Biology Sciences, Associate Professor, Shakarim University, Semey, Kazakhstan; e-mail: zhanar_moldabaeva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6384-0646.

Eleonora Kurmetovna Okuskhanova – assoc. Professor, PhD, Shakarim University, Republic of Kazakhstan, Semey city, senior lecturer; e-mail: eokuskhanova@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5139-9291.

Редакцияға енуі 10.01.2026
Өңдеуден кейін түсуі 04.03.2026
Жариялауға қабылданды 05.03.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-50

ҒТАХР: 65.59.29

BY 4.0
Check for updates

Ж.Е. Жеңісбекова[1], Р.Д. Абишева[1], Ж.А. Ибатаев[1], А.К. Канабекова[2], А.К. Игенбаев[*]
[1]С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті,
010011, Қазақстан Республикасы, Астана қаласы, Жеңіс, 62
[2]Еуразиялық технологиялық университеті,
050000, Қазақстан Республикасы, Алматы қаласы,ТөлеБи Көшесі 109
[*]e-mail: aidyn_mamyt@mail.ru

МАЙҚАН БАЛЫҒЫНАН ЖАСАЛҒАН ПРЕСЕРВІНІҢ ОРГАНОЛЕПТИКАЛЫҚ КӨРСЕТКІШТЕРІНЕ ЖӘНЕ ФИЗИКА-ХИМИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІНЕ ДАРШЫН ИТМҰРЫНЫ (ROSA CINNAMOMEA) ЭКСТРАКТІСІНІҢ ӘСЕРІ

Аңдатпа: *Балық пресервілері қазіргі кезде өзінің жоғары тағамдық құндылығы мен табиғилылығына байланысты тұтынушылардың жоғары сұранысына ие. Сонымен қатар, балық пресервілерін өндірушілердің негізгі мақсаттары барынша ұзақ сақталатын, тағамдық және биологиялық құндылықтары жоғалмаған өнімдерді нарыққа ұсыну болып отыр. Бұл мақалада Майқан балығының салмағына ИЭ2,5%; ИЭ3,5%; және ИЭ4,5% Даршын итмұрыны (rosa cinnatomea) экстрактісі қосылып жасалған пресервінің органолептикалық көрсеткіштері мен физика-химиялық қасиеттерінің зерттеу нәтижелері қарастырылған. Сонымен қатар Даршын итмұрыны (rosa cinnatomea) экстрактісін алудың сызбасы мен режимдері және Майқан балығынан жасалған пресервісі үлгілеріне ИЭ қосудың мөлшерін негізделді. Майқан балығынан дайындалған ИЭ2,5; ИЭ3,5 және ИЭ4,5 пресервілер үлгілерінің ақуыздық құрамы сәйкесінше 9,51±0,07; 9,21±0,05 және 8,92±0,05 құрады. Май құрамы бойынша сәйкесінше 15,27±0,03; 15,84±0,02 және 16,71±0,05 құрап, ИЭ мөлшерін арттырған сайын май құрамының мөлшері жоғарлайтынын көрсетті. ИЭ3,5 мөлшері Майқан балығынан жасалған балық пресервісінің органолептикалық қасиеттерінің жоғары бағалауын көрсетті.* Алдағы зерттеу жұмыстарында *Даршын итмұрыны (rosa cinnatomea) экстрактісі қосылған Майқан балығынан дайындалған пресервілердің басқа да қасиеттері зерттелетін болады. Бұл зерттеу жұмысының нәтижелерін балық өнімдерін өңдеу кәсіпорындары қолдануы мүмкін.*

Түйін сөздер: *Майқан балығы, балық пресервісі, физика-химиялық қасиеттері, Даршын итмұрыны (rosa cinnatomea) экстрактісі, органолептикалық көрсеткіштері*

Кіріспе

Әлемде соңғы он жылда адамзаттың балық және балық өнімдерін тұтыну көрсеткіші тұрақты түрде өскен, мұндай көрсеткіш адамдардың өмір сүрулерінің жақсарғандығы және экономикалық өсімнің болуымен байланысты [1].

Мұндай өсу құрамында толыққұнды ақуыздар мен маңызды қоректік нутриенттердің, соның ішінде омега май қышқылдарының таптырмас көзі ретінде балыққа деген сұраныстың артуын көрсетеді [2]. Балық – тез бұзылатын тағамдардың бірі. Балық және балық өнімдерін сақтау кезінде сапасы, дәмі, құрылымы және тағамдық құндылықтары микробтық, ферментативті және химиялық, микробиологиялық реакциялардың әсерінен жылдам бұзылады [3, 4].

Өсімдік экстрактілерінің таза қосылыстары немесе стандартталған экстрактілері түріндегі табиғи өнімдер химиялық құрамының әртүрлілігінің арқасында микроорганизмдердің өсуін шектеуші мүмкіндіктер береді. Сонымен қатар өсімдік экстрактілері балық өнімдерін сақтауда кеңінен қолданылып жатқаны белгілі [5-7].

Өсімдіктен алынған экстрактілер балық өнімдерін сақтау мерзімін ұзартады [8, 9].

Өсімдік экстрактілерін өнімдердің сақтау мерзімін ұзартудың жаңа технологиясы ретінде, өнеркәсіптік азық-түлікті сақтау және жаңа өнімдерге қатысты кейбір азық-түлік қауіпсіздігі мәселелерін шешу үшін таза, тұрақты технологияны іздейтін заманауи тұтынушылардың қажеттіліктерін қанағаттандыру үшін пайдалануға болады [10].

Авторлардың ұсынуынша анар қабықшасынан (P. granatum) розелладан (H.sabdariffa) алынған экстрактілер балық өнімдерінің сапасын жақсартуға және сақтауға таптырмас шикізаттар болып табылады [11].

©Ж.Е. Жеңісбекова, Р.Д. Абишева, Ж.А. Ибатаев, А.К. Канабекова, А.К. Игенбаев, 2026

Әдебиеттерге шолу жасай отырып, өсімдіктер шикізаттарынан немесе екіншілік шикізаттарынан алынған өсімдік экстрактілері балық өнімдерінің тағамдық және биологиялық құндылықтарына оң әсер беретінін, сонымен қатар, сақтау кезіндегі сапасы мен басқа да тағамдық қасиеттерін кемітпейтіндігін айтуға болады.

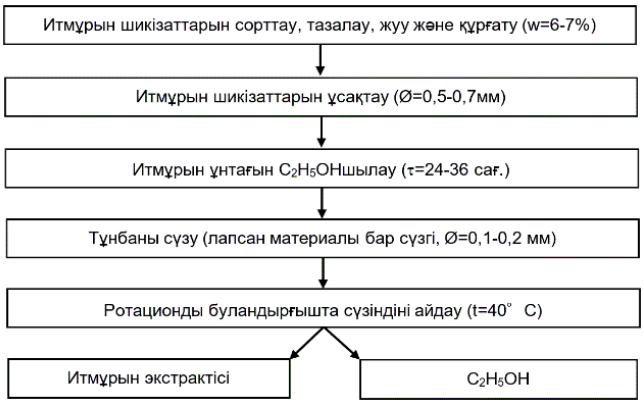
Зерттеу әдістері

Зерттеу нысаны ретінде Майқан балығының үлгілері Марқакөл көлінен алынды (48.7410, 85.7756). Итмұрын шикізаты Шығыс Қазақстан облысы, Зайсан ауданында тау бөктерлерінен жабайы өскен Даршын итмұрын (Rosa cinnamomea) түрінен жиналып алынды.

Дайын балық пресервілерінің органолептикалық көрсеткіштері Мемлекетаралық МЕМСТ 20056-2013 арқылы анықталды [12]. Пресервілердің құрамындағы ақуыз, май мөлшерлері Мемлекетаралық МЕМСТ 31795-2012 «Балық, теңіз өнімдері және олардан жасалған өнімдер» [13], және ас тұзының мөлшері МЕМСТ 31755-2012 – «Тамақ өнімдері. Ас тұзының массасын анықтау әдістері» бойынша анықталды [14],

Пресервілердің pH мәнін анықтау. Дайын пресервілер үлгілері алдын ала ұсақталады. pH мәнін зерттеу үшін әр үлгіден пресервілерден гомогенат дайындалды. 10 г пресервіге 100 мл дистилденген су қосылып, жақсылап араластырылды. pH-метрдің (pH-150МИ, Ресей) электродтары балық пресервілерінен дайындалған ерітінділерге батырылып, көрсеткіштер тұрақталғанша күтілді. Алынған нәтижелер бес реттік қайталанып жасалып, ортақ мәндері алынды.

Зерттеу жұмысының бір бөлігі – жабайы өскен Даршын итмұрынынан (Rosa cinnamomea) экстракт алу университеттің зертханасында IKA RV10digital V-C (Германия) ротационды буландырғыш көмегімен төмендегі 1-ші сурет бойынша алынды.



Сурет 1 – Итмұрыннан экстракт алу сызбасы

Шығыс Қазақстан облысының Зайсан ауданында тау бөктерлерінен жабайы өскен Даршын итмұрын (Rosa cinnamomea) шикізатын сыртқы күлте жапырақтары қалдықтарынан, механикалық жабысқан қалдықтардан тазаланды. Температурасы – 15-20°С салқын суда жуылып, бөлме температурасында (24-25°С) құрғатылды және кептіргіш шкафта 50-55°С-та 30-40 минутта ылғалдылығы 6-7% жеткенше кептірілді. Кептірілген итмұрынды ұсақталу дәрежесі 0,5-0,7 мм аралықта зертханалық (ЛЗМ-1 дән ұсақтағыш, Ресей) ұсақтағышта ұсақталады. Ұнтақты 24-36 сағат аралығында бөлме жағдайында 22-24°С-та спиртке шыланады. Спиртті итмұрын массасынан сүзу үшін арнайы сүзгіден өтізілді. Ротационды буландырғышта 40°С вакуумдық ортада сүзіндіден спирт айдау әдісімен бөлініп алынды. Спиртті тиімді пайдалану үшін спиртті арнайы жинағышқа алып, екінші реттік экспериментке қолануға мүмкіндік болды.

Алынған Даршын итмұрыны (rosa cinnamomea) экстрактісінің ИЭ2,5%; ИЭ3,5% және ИЭ4,5% мөлшері Майқан балығынан жасалған пресерві құрамына қосылды. Даршын итмұрыны (rosa cinnamomea) экстрактісі қосылған Майқан балығынан дайындалған пресерві рецептураларының үлгілері 1-ші кестеде келтірілген. Майқан балығынан дайындалған пресерві үлгілері «С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті» КеАҚ, «Ет өнімдерін өңдеудің тәжірибелік-өндірістік цехінде» жасалды.

Зерттеу нәтижелері

Даршын итмұрыны (rosa cinnamomea) экстрактісінің ИЭ2,5%; ИЭ3,5% және ИЭ4,5% мөлшері қосылған Майқан балығынан дайындалған пресерві рецептураларының үлгілерін төмендегі 1-ші кестеге сай жасалдынды.

Кесте 1 – Майқан балығынан дайындалған пресерві рецептураларының үлгілері

№ р/с	Ингредиенттер	Итмұрын экстрактісі қосылған балық пресервісі рецептураларының үлгілері, %		
		ИЭ2,5	ИЭ3,5	ИЭ4,5
1	Майқан балығы	75	75	75
2	Рафинадталған күнбағыс майы	20,55	19,55	18,10
3	9% сірке қышқылы	0,4	0,4	0,4
4	Тұз	1	1	1
5	Қант	0,55	0,55	1
6	Итмұрын экстрактісі	2,5	3,5	4,5
Барлығы:		**100**	**100**	**100**

1-ші кестедегі үлгілер бойынша жасалған Майқан балығы пресервілері 15-20˚ С, 15 тәулік жетілдірілді. Жетілдірілген, Даршын итмұрыны (rosa cinnamomea) экстрактісі қосылған Майқан балығынан дайындалған пресервілерінің органолептикалық көрсеткіштері 10 балдық жүйеде бағаланды. Бағалау қорытындылары 2-ші кестеде келтірілген.

Кесте 2 – Майқан балығынан дайындалған пресервілер үлгілерінің органолептикалық көрсеткіштері

№ р/с	Көрсеткіштері	Итмұрын экстрактісі қосылған балық пресервілерінің үлгілері, %		
		ИЭ2,5	ИЭ3,5	ИЭ4,5
1	Сыртқы түрі	9,5	10,0	10,0
2	Консистенциясы	9,0	10,0	10,0
3	Дәмі	10,0	10,0	10,0
4	Иісі	10,0	10,0	10,0
5	Түсі	9,0	10,0	9,0

2-ші кестеден көріп отырғанымыздай Даршын итмұрыны (rosa cinnamomea) экстрактісі қосылған (ИЭ2,5 ИЭ3,5 және ИЭ4,5) Майқан балығынан дайындалған пресервілері үлгілерінің органолептикалық көрсеткіштері әр түрлі бағаланған. Барынша жоғары көрсеткіштерді ИЭ3,5 үлгісінен көруге болады. ИЭ2,5 және ИЭ4,5 үліглерінің түстері бойынша кемшіліктері белгіленген. ИЭ3,5 үлгісінің түсі қанық, тұтынушыға жағымды және қосылған мөлшері пресервінің консистенциясы мен сыртқы түріне де оң әсерін берген. Үлгілердің суреттері төмендегі 2-ші суретте көрсетілген.



а) ИЭ2,5 б) ИЭ3,5 с) ИЭ4,5

Сурет 2 – Даршын итмұрыны (rosa cinnamomea) экстрактісі қосылған Майқан балығынан дайындалған пресервілерінің үлгілері

Даршын итмұрыны (rosa cinnamomea) экстрактісі қосылған Майқан балығынан дайындалған пресервілерінің үлгілерінің физика-химиялық көрстекіштері төмендегі 3-ші кестеде келтірілген.

Кесте 3 – Майқан балығынан дайындалған пресервілер үлгілерінің физика-химиялық көрсеткіштері

№ р/с	Көрсеткіштері	Итмұрын экстрактісі қосылған балық пресервілерінің үлгілері, %		
		ИЭ2,5	ИЭ3,5	ИЭ4,5
1	Ақуыз құрамы,%	9,51±0,07	9,21±0,05	8,92±0,05
2	Май мөлшері,%	15,27±0,03	15,84±0,02	16,71±0,05
3	Ас тұзының мөлшері,%	6,85±0,02	6,84±0,04	6,81±0,05
4	Басқа да заттар жиынтығы,%	68,37±0,03	68,10±0,02	67,56±0,01
5	pH	5,71±0,01	5,62±0,01	5,58±0,02

Кестеден көріп отырғанымыздай, Майқан балығынан дайындалған ИЭ2,5; ИЭ3,5 және ИЭ4,5 пресервілер үлгілерінің ақуыздық және май мөлшерлері бойынша айтарлықтай динамикасы өгерісін атап айтуға болады. Себебі, ИЭ мөлшерінің саны артқан сайын ақуыз мөлшерінің кемігені ИЭ құрамында ақуыз мөлшерінің төмендігіне байланысты. Ал, май құрамының артқаны ИЭ пресервіге қосылған майды өзіне сіңіргендігімен және майды байланыстыру қабілетінмен орайластырып айтуға болады. Балық шикізатын өңдеуге байланысты олардың физика-химиялық қасиеттері мен көрсеткіштері өзгеріп отырады. Барынша жоғары физика-химиялық және тағамдық құндылықтарын реттеу үшін балықтарды өңдеудің қажетті және қолжетімді технологияларын қолдану қажет [15, 16]. Сондықтан, Майқан балығынан пресерві жасау үшін оның алдын ала физика-химиялық қасиеттері ескерілді және Даршын итмұрыны (rosa cinnamomea) экстрактісінің мөлшерін қосу негізделді. Технологиялық өңдеу кезінде де негізгі режимдер мен қосылатын ингредиенттердің ара-қатынасы сақталды. pH мәні бойынша айтатын болсақ, ИЭ мөлшерінің саны артқан балық пресервілерінің қышқылдығы арта беретініне көз жеткізуге болады. Себебі, ИЭ мөлшеріндегі өзіне тән қышқылдық қосылыстарының болуымен байланыстырылады. Алдағы зерттеулерде pH мәнінің сақтау шарттары мен уақытан тәуелділігі зерттелетін болады.

Ғылыми нәтижелерді талқылау

Осылайша, алғаш рет эксперименттік зерттеулер нәтижесінде Майқан балығынан Даршын итмұрыны (rosa cinnamomea) экстрактісі қосылған пресервілердің үлгілері алынды және жоғарыдағы көрсеткіштері зерттелді. Бұл зерттеу жұмысы Майқан балығын пресервілер және балық өнімдері өндірісінде қолдануға, сонымен қатар тағамдық және биологиялық құндылықтары бойынша басқа балықтардан кем түспейтінін көрсетті [17].

Өсімдіктердің әртүрлі түрлерінің сығындылары микроорганизмдердің өсуін тежейді [18], липидтердің тотығуын баяулатады және текстураны жақсартады. Өсімдік сығындылары, балық өңдеуде көптеген құнды функцияларды орындайтын көпфункционалды рөл атқарады және табиғи экстрактілердің қолданылу аясын кеңейте алады. Мұндай экстрактілердің фенолқышқылдары, флавоноидтар сияқты белсенді қосылыстар, хинон, таниндер және т. б. болуы микробқа қарсы, консервілеуші [19, 20, 21] қасиеттерге ие. Ғылыми тұрғыда әр түрлі экстрактілерді балық өнімдері өндірісінде қолдану басқа да ғалымдардың зерттеу жұмыстарының нәтижелерінде көрініс тапқан және одан да терең, жан-жақты зерттеулердің нәтижелері дами береді деуге болады.

Қорытынды

Қорытындылай келе балық пресервілерінің органолептикалық және физика-химиялық қасиеттерін өсімдіктерден алынған экстрактілерді қолдана отырып, жақсартуға деген алғышарттардың жасалатындығына тағы да көз жеткізуге болады. Экстрактілердің қосылуы жоғарыда айтылғандай микробиологиялық қауіпсіздіктеріне және тұтынушылардың талғамдарына сай өңдеудің шешімі ретінде ұсынуға мүмкіндік бар. Алдағы зерттеу жұмыстарында Даршын итмұрыны (rosa cinnamomea) экстрактісі қосылған Майқан балығынан дайындалған пресервілердің басқа да қасиеттері зерттелетін болады. Бұл зерттеу жұмысы балық өнімдерін өңдеу кәсіпорындары қолдануы мүмкін.

Әдебиеттер тізімі

1. FAO Fisheries Department. The State of World fish eries and aquaculture // Food and Agriculture Organization (FAO): Rome. – Italy-2020.
2. A critical review on the health benefits of fish consumption and its bioactive constituents / J. Chen et al // Food Chemistry. – 2022. – V. 369. – P. 130874.

3. Applying innovative technological interventions in the preservation and packaging of fresh seafood products to minimize spoilage-A systematic review and meta-analysis / S.A. Siddiqui et al // Heliyon. – 2024. – V. 10, № 8.
4. A Short Review on The Use of Natural Extracts for Fish and Shrimp Preservation / A.A. Silva et al // Ecology Journal. – 2022. – V. 4, № 2. – P. 205-212.
5. Negi P.S. Plant extracts for the control of bacterial growth: Efficacy, stability and safety issues for food application / P.S. Negi // International journal of food microbiology. – 2012. – V. 156, № 1. – P. 7-17.
6. Biopreservation and quality enhancement of fish surimi using colorant plant extracts / A.A. Tayel et al // Journal of Food Quality. – 2021. – V. 2021, № 1. – P. 6624565.
7. Hake Fish Preservation Using Plant-Based Impregnated Polylactic Acid Food Films as Active Packaging / F. Sánchez-García et al // Applied Sciences. – 2025. – V. 15, № 2. – P. 643.
8. Uçak İ. The effects of rosemary extract combination with vacuum packing on the quality changes of Atlantic mackerel fish burgers / İ. Uçak, Y. Özogul, M. Durmuş // International Journal of Food Science and 9. Technology. – 2011. – V. 46, № 6. – P. 1157-1163.
9. Ucar Y. Natural preservatives for fish and seafood / Y. Ucar, M. Durmus, Y. Özogul // Natural Preservatives for Food. – Academic Press, 2025. – P. 193-220.
10. Sultanbawa Y. Plant extracts as natural antimicrobials in food preservation / Y. Sultanbawa // Microbial food safety and preservation techniques. – 2014. – P. 373-382.
11. Application of natural plant extracts as colorants, preservatives, and anti-listerial agents in processed fish products / A.A.Tayel et al // Journal of Food Safety. – 2018. – V. 38, № 2. – P. e12435.
12. ГОСТ 20056-2013. Пресервы из океанической рыбы специального посола. Технические условия. – Введ. 01.07.2014. – М.: Стандартинформ, 2014. – 10 с.
13. ГОСТ 31795-2012. Рыба, морепродукты и продукция из них. Метод определения массовой доли белка, жира, воды, фосфора, кальция и золы спектроскопией в ближней инфракрасной области. – Введ. 01.07.2013. – М.: Стандартинформ, 2014. – 7 с.
14. ГОСТ 31755-2012. Соусы на основе растительных масел. Общие технические условия. – Введ. 01.07.2013. – М.: Стандартинформ, 2019. – 4 с.
15. Effect of processing methods on nutritional and physico-chemical composition of fish: a review / B. Abraha et al // MOJ Food Processing & Technology. – 2018. – V. 6, № 4. – P. 376-382.
16. Effects of different starches on the physicochemical and sensory characteristics of extruded fish snacks / Abu Talib et al // Food Research. – 2024. – V. 8, № 6. – P. 57-70.
17. Nutritional and biological value of Maikan fish / Zh.E. Zhenisbekova et al // Bulletin of Shakarim University. Technical Sciences. – 2025. № 2(18). – P. 322-329.
18. Червоткина Д.Р. Антимикробные препараты природного происхождения: обзор свойств и перспективы применения / Д.Р. Червоткина, А.В. Борисова // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. – 2022. – Т. 12, № 2(41). – С. 254-267.
19. Preservation of chilled Asian sea bass (Lates calcarifer) steak by whey protein isolate coating containing polyphenol extract from ginger, lemongrass, or green tea / S. Chaijan et al // Food Control. – 2020. – V. 118. – P. 107400.
20. Еремеева Н.Б. Изучение антиоксидантных свойств лекарственных растений и их влияние на микробную порчу полуфабрикатов мяса, птицы и рыбы / Н.Б. Еремеева, Н.В. Макарова // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. – 2021. – Т. 11, № 4 (39). – С. 590-602.
21. Сверхкритические экстракты бурых водорослей в технологии рыбных пресервов / О.В. Табакаева и др. // Техника и технология пищевых производств. – 2024. – Т. 54, № 4. – С. 731-744.

References

1. FAO Fisheries Department. The State of World fish eries and aquaculture // Food and Agriculture Organization (FAO): Rome. – Italy-2020. (In English).
2. A critical review on the health benefits of fish consumption and its bioactive constituents / J. Chen et al // Food Chemistry. – 2022. – V. 369. – P. 130874. (In English).
3. Applying innovative technological interventions in the preservation and packaging of fresh seafood products to minimize spoilage-A systematic review and meta-analysis / S.A. Siddiqui et al // Heliyon. – 2024. – V. 10, № 8. (In English).
4. A Short Review on The Use of Natural Extracts for Fish and Shrimp Preservation / A.A. Silva et al // Ecology Journal. – 2022. – V. 4, № 2. – P. 205-212. (In English).

5. Negi P.S. Plant extracts for the control of bacterial growth: Efficacy, stability and safety issues for food application / P.S. Negi // International journal of food microbiology. – 2012. – V. 156, № 1. – P. 7-17. (In English).
6. Biopreservation and quality enhancement of fish surimi using colorant plant extracts / A.A. Tayel et al // Journal of Food Quality. – 2021. – V. 2021, № 1. – P. 6624565. (In English).
7. Hake Fish Preservation Using Plant-Based Impregnated Polylactic Acid Food Films as Active Packaging / F. Sánchez-García et al // Applied Sciences. – 2025. – V. 15, № 2. – P. 643. (In English).
8. Uçak İ. The effects of rosemary extract combination with vacuum packing on the quality changes of Atlantic mackerel fish burgers / İ. Uçak, Y. Özogul, M. Durmuş // International Journal of Food Science and 9. Technology. – 2011. – V. 46, № 6. – P. 1157-1163. (In English).
9. Ucar Y. Natural preservatives for fish and seafood / Y. Ucar, M. Durmus, Y. Özogul // Natural Preservatives for Food. – Academic Press, 2025. – P. 193-220. (In English).
10. Sultanbawa Y. Plant extracts as natural antimicrobials in food preservation / Y. Sultanbawa // Microbial food safety and preservation techniques. – 2014. – R. 373-382. (In English).
11. Application of natural plant extracts as colorants, preservatives, and anti‐listerial agents in processed fish products / A.A.Tayel et al // Journal of Food Safety. – 2018. – V. 38, № 2. – P. e12435. (In English).
12. GOST 20056-2013. Preservy iz okeanicheskoj ryby special'nogo posola. Tehnicheskie usloviya. – Vved. 01.07.2014. – M.: Standartinform, 2014. – 10 s. (In Russian).
13. GOST 31795-2012. Ryba, moreprodukty i produkciya iz nih. Metod opredeleniya massovoj doli belka, zhira, vody, fosfora, kal'ciya i zoly spektroskopiej v blizhnej infrakrasnoj oblasti. – Vved. 01.07.2013. – M.: Standartinform, 2014. – 7 s. (In Russian).
14. GOST 31755-2012. Sousy na osnove rastitel'nyh masel. Obshchie tehnicheskie usloviya. – Vved. 01.07.2013. – M.: Standartinform, 2019. – 4 s. (In Russian).
15. Effect of processing methods on nutritional and physico-chemical composition of fish: a review / B. Abraha et al // MOJ Food Processing & Technology. – 2018. – V. 6, № 4. – P. 376-382. (In English).
16. Effects of different starches on the physicochemical and sensory characteristics of extruded fish snacks / Abu Talib et al // Food Research. – 2024. – V. 8, № 6. – P. 57-70. (In English).
17. Nutritional and biological value of Maikan fish / Zh.E. Zhenisbekova et al // Bulletin of Shakarim University. Technical Sciences. – 2025. № 2(18). – P. 322-329. (In English).
18. Chervotkina D.R. Antimikrobnye preparaty prirodnogo proishozhdeniya: obzor svojstv i perspektivy primeneniya / D.R. Chervotkina, A.V. Borisova // Izvestiya vuzov. Prikladnaya himiya i biotehnologiya. – 2022. – T. 12, № 2(41). – S. 254-267. (In Russian).
19. Preservation of chilled Asian sea bass (Lates calcarifer) steak by whey protein isolate coating containing polyphenol extract from ginger, lemongrass, or green tea / S. Chaijan et al // Food Control. – 2020. – V. 118. – P. 107400. (In English).
20. Eremeeva N.B. Izuchenie antioksidantnyh svojstv lekarstvennyh rastenij i ih vliyanie na mikrobnuyu porchu polufabrikatov myasa, pticy i ryby / N.B. Eremeeva, N.V. Makarova // Izvestiya vuzov. Prikladnaya himiya i biotehnologiya. – 2021. – T. 11, № 4 (39). – S. 590-602. (In Russian).
21. Sverhkriticheskie ehkstrakty buryh vodoroslej v tehnologii rybnyh preservov / O.V. Tabakaeva i dr. // Tehnika i tehnologiya pishchevyh proizvodstv. – 2024. – T. 54, № 4. – S. 731-744. (In Russian).

Ж.Е. Жеңісбекова[1], Р.Д. Абишева[1], Ж.А. Ибатаев[1], А.К. Канабекова[2], А.К. Игенбаев[1]*
[1]Казахский агротехнический исследовательский унииверситет имени С.Сейфуллина, 010011,
Республика Казақстан, город Астана, проспект Жеңіс 62,
[2]Еуразийский технологический университет,
050000, Республика Казақстан, город Алматы, улица ТөлеБи 109
*e-mail: aidyn_mamyt@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ЭКСТРАКТА ШИПОВНИКА КОРИЧНОГО *(ROSA CINNAMOMEA)* НА ОРГАНОЛЕПТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРЕСЕРВА ИЗ РЫБЫ МАЙКАН

Рыбные пресервы в настоящее время пользуются большим спросом у потребителей из-за их высокой пищевой ценности и натуральности. Вместе с тем, основными целями производителей рыбных пресервов является предоставление на рынок продуктов, сохраняющихся максимально

долго, не утративших пищевой и биологической ценности. В данной статье рассмотрены результаты исследования органолептических показателей и физико-химических свойств комбинированного пресерва экстракта шиповника коричного (rosa cinnatomea) ИЭ2,5%; ИЭ3,5%; иэ4,5% к весу рыбы майкана. Также были обоснованы схема и режимы получения экстракта шиповника коричного (rosa cinnatomea) и количество внесении в порции пресерва из рыбы майкана. Белковый состав образцов пресервов ИЭ2,5; ИЭ3,5 и ИЭ4,5, приготовленных из рыбы майканда, составил 9,51±0,07; 9,21±0,05 и 8,92±0,05 соответственно. Состав жира составил 15,27±0,03; 15,84±0,02 и 16,71±0,05 соответственно, что показало увеличение содержания жира с увеличением количества ИЭ. Количество ИЭ3,5 показало высокую оценку органолептических свойств рыбного пресерва из рыбы майкана. В дальнейших исследовательских работах будут изучены и другие свойства пресервов, приготовленных из рыбы майкана с добавлением экстракта шиповника коричного (rosa cinnatomea). Исследовательская работа может быть использована предприятиями по переработке рыбной продукции.

Ключевые слова: *рыба Майкан, рыбный пресерв, физико-химические свойства, экстракт шиповника коричного (Rosa cinnatomea), органолептические показатели.*

Zh.E. Zhenisbekova[1], R.D. Abisheva[1], Zh.A. Ibatayev[1], A.K. Kanabekova[2], A.K. Igenbayev[1]*

[1]Kazakh Agrotechnical Research University named after S.Seifullin,
62 Zhenis Avenue, Astana, 010011, Republic of Kazakhstan,
[2]Eurasian Technological University,
109 ToleBi Street, 050000, Republic of Kazakhstan, Almaty
*e-mail: aidyn_mamyt@mail.ru

THE EFFECT OF CINNAMON ROSEHIP EXTRACT (ROSA CINNAMOMEA) ON ORGANOLEPTIC PARAMETERS AND PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF THE MAYKAN FISH PRESERVE

Fish preserves are currently in high demand among consumers due to their high nutritional value and naturalness. At the same time, the main goals of canned fish producers are to provide the market with products that last as long as possible and have not lost their nutritional and biological value. This article discusses the results of a study of organoleptic parameters and physico-chemical properties of a combined preserve of cinnamon rosehip extract (rosa cinnamomea) RE2.5%; RE 3.5%; RE 4.5% by weight of Maikan fish. The scheme and modes of obtaining cinnamon rosehip extract (rosa cinnamomea) and the amount of Maikan fish preserve per serving were also substantiated. The protein composition of the samples of preserves RE 2.5; RE3.5 and RE4.5 prepared from Maikan d fish was 9.51±0.07; 9.21±0.05 and 8.92±0.05, respectively. The fat composition was 15.27±0.03; 15.84±0.02 and 16.71±0.05, respectively, which showed an increase in fat content with an increase in the number of RE. The amount of RE3.5 showed a high assessment of the organoleptic properties of fish preserves from Maikan fish. In further research, other properties of preserves made from Maikan fish with the addition of rose hips extract (rosa cinnamomea) will be studied. The research work can be used by enterprises processing fish products.

Key words: *Maikan fish, fish reserve, physico-chemical properties, extract of cinnamon rosehip (Rosa cinnamomea), organoleptic parameters.*

Авторлар туралы мәлімет

Жансая Еркебұланқызы Жеңісбекова – 7М07201 – «Тамақ өнімдерінің технологиясы» білім беру бағдарламасының 2-ші курс магистранты, С. Сейфуллин атындағы Казақ агротехникалық зерттеу университеті, Қазақстан Республикасы, Астана қаласы; e-mail:zhenisbekova.j@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-4278-7343.

Роза Джанысбековна Абишева – С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, т.ғ.к., доцент, Қазақстан Республикасы, Астана қаласы; e-mail:ard1967@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-7511-6235.

Жаркын Әбікеұлы Ибатаев – С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, «Физика және химия» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, х.ғ.к., қауымдастырылған профессор, Қазақстан Республикасы, Астана қаласы; e-mail:zh.ibatayev@kazatu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2261-222X.

Алида Канабековна Канабекова – Еуразия технологиялық университеті, Экономика және құқықтық технологиялар мектебінің аға оқытушысы, Қазақстан Республикасы, Алматы қаласы; e-mail: a.kanabekova@etu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-6677-8478.

Айдын Каирбекович Игенбаев* – С. Сейфуллин атындағы Казақ агротехникалық зерттеу университеті, Инжиниринг және азық-түлік технологиялары институтының қауымдастырылған профессоры, PhD, қауымдастырылған профессор, Қазақстан Республикасы, Астана қаласы; e-mail: aidyn_mamyt@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9903-2912.

Сведения об авторах

Жансая Еркебұланқызы Жеңісбекова – магистрант 2 курса образовательной программы 7М07201 – «Технология пищевых продуктов», Казахский агротехнический исследовательский университет им. С. Сейфуллина, Республика Казахстан, город Астана; e-mail:zhenisbekova.j@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-4278-7343.

Роза Джанысбековна Абишева – Казахский агротехнический исследовательский университет им. С.Сейфуллин, к.т.н., доцент, Республикаса Казахстан, город Астана; e-mail:ard1967@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-7511-6235.

Жаркын Әбікеұлы Ибатаев – Казахский агротехнический исследовательский университет им. С.Сейфуллин, ассоциированный профессор, к.х.н., ассоциированный профессор кафедры «Физики и химии», Республикаса Казахстан, город Астана; e-mail:zh.ibatayev@kazatu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2261-222X.

Алида Канабековна Канабекова – Евразийский технологический университет, старший преподаватель Школы экономики и правовых технологий, Республика Казахстан, город Алматы; e-mail: a.kanabekova@etu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-6677-8478.

Айдын Каирбекович Игенбаев* – Казахский агротехнический исследовательский университет им. С. Сейфуллина, ассоциированный профессор института инжиниринга и пищевых технологии, PhD, ассоциированный профессор,Республика Казахстан, город Астана; e-mail: aidyn_mamyt@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9903-2912.

Information about the authors

Zhansaya Erkebulankyzy Zheisbekova – Master's student of the 2nd year of the educational programme 7M07201 – «Technology of food products», Kazakh Agrotechnical Research University named after S.Seifullin, Republic of Kazakhstan, Astana; e-mail: zhenisbekova.j@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-4278-7343.

Roza Dzhanysbekovna Abisheva – S. Seyfullin Kazakh Agrotechnical Research University, candidate of technical sciences, Associate Professor, Republic of Kazakhstan, Astana; e-mail:ard1967@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-7511-6235.

Zharkyn Abykeylylbatayev – S. Seyfullin Kazakh Agrotechnical Research University, Associate Professor, candidate of chemical sciences, Associate Professor, Department of «Physics and Chemistry», Republic of Kazakhstan, Astana; e-mail:zh.ibatayev@kazatu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2261-222X.

Alida Kanabekovna Kanabekova – Eurasian Technological University, Senior Lecturer at the School of Economics and Legal Technologies, Republic of Kazakhstan, Almaty; e-mail: a.kanabekova@etu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-6677-8478.

Aydyn Kairbekovich Igenbayev* – S. Seyfullin Kazakh Agrotechnical Research University, Associate Professor Institute of engineering and food technology, PhD, Associate Professor, Republic of Kazakhstan, Astana; e-mail: aidyn_mamyt@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9903-2912.

Редакцияға енуі 08.01.2026
Өңдеуден кейін түсуі 05.03.2026
Жариялауға қабылданды 12.03.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-51

ҒТАХР: 65.39.51

CC BY 4.0
Check for updates

А.А. Даутова*, К.Ж. Амирханов, Ж. Калибекқызы, С.К. Касымов, А.О. Майжанова
Шәкәрім университеті, 071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинки к-сі, 20 А
*e-mail: a.dautova@shakarim.kz

ӨСІМДІК ҚОСПАСЫ ҚОСЫЛҒАН КАЛОРИЯСЫ ТӨМЕН ПІСІРІЛГЕН ШҰЖЫҚ ТЕХНОЛОГИЯСЫН ЖЕТІЛДІРУ

Аңдатпа: *Мақалада өсімдік текті функционалдық ингредиенттерді қолдану арқылы калориясы төмен пісірілген шұжық өндіру технологиясын жетілдіру мәселелері қарастырылған. Қазіргі таңда халық арасында салауатты және теңгерімді тамақтануға деген сұраныстың артуы ет өнімдерінің рецептурасын жаңғыртуды, олардың энергетикалық құндылығын төмендете отырып, тағамдық және биологиялық құндылығын арттыруды талап етеді. Осыған байланысты зерттеу жұмысының негізгі мақсаты дәстүрлі пісірілген шұжықтардың технологиясын жетілдіру*

©А.А. Даутова, К.Ж. Амирханов, Ж. Калибекқызы, С.К. Касымов, А.О. Майжанова, 2026

арқылы функционалдық бағыттағы, төмен калориялы және жоғары сапалы ет өнімін әзірлеу болып табылады. Зерттеу барысында өнім рецептурасына гидратталған өніп шыққан киноа дәндерінің ұнтағы мен инулин енгізілді. Бұл өсімдік қоспаларының шұжық фаршының құрылымдық-механикалық қасиеттеріне, технологиялық көрсеткіштеріне, ылғал байланыстыру қабілетіне, сондай-ақ дайын өнімнің тағамдық және функционалдық сапасына әсері кешенді түрде зерттелді. Дайын өнімнің химиялық құрамы, оның ішінде ақуыз, май, көмірсу және тағамдық талшық мөлшері анықталып, энергетикалық құндылығы есептелді. Сонымен қатар органолептикалық көрсеткіштері, микробиологиялық қауіпсіздігі және сақтау тұрақтылығы бағаланды. Алынған нәтижелер өсімдік қоспаларын қолдану шұжықтың құрылым тұрақтылығын арттырып, шырындылығын, дәмдік және тұтынушылық қасиеттерін жақсартатынын көрсетті. Май мөлшерін төмендете отырып, ақуыз деңгейін сақтауға және өнімді тағамдық талшықтармен байытуға мүмкіндік берілді. Зерттеу нәтижелері калориясы төмен, биологиялық құндылығы жоғары және функционалдық қасиеттері бар пісірілген шұжық өндірісінің практикалық маңыздылығын және оны ет өңдеу өнеркәсібінде қолданудың перспективалы екенін дәлелдейді.

Түйін сөздер: *функционалдық тағам өнімдері, пісірілген шұжық, төмен калориялы өнімдер, өсімдік текті қоспалар, киноа, инулин, тағамдық талшықтар, ет өнімдерінің технологиясы, микробиологиялық қауіпсіздік, биологиялық құндылық.*

Кіріспе

Салауатты тамақ өнімдеріне сұраныстың артуы ет өнеркәсібі мамандарының алдына осы санатқа жататын ет өнімдері бойынша ұсынымдарды жүйелеу және негіздеу міндеттерін қойып отыр [1,7,9]. Мақалада ет өнімдерінің құрамдас бөліктері олардың медико-биологиялық құндылығы тұрғысынан талданып, сондай-ақ ет өнімдеріндегі май мөлшерін төмендетуге бағытталған өзекті технологиялық тәсілдер қарастырылған [10, 7]. Жаңа рецептуралар бойынша жаңа өнімдерге сұраныстың жоғары болуына байланысты ет өнеркәсібі көптүрлі әрі сапалы өнім өндіруге қабілетті икемді өндірістік желілерді енгізуге мәжбүр [1, 4, 5].

Сонымен қатар өсімдік текті қоспа компоненттерінің өзара және тағамдық жүйелерде әрекеттесу табиғатын мен механизмін зерттеу барған сайын өзекті мәселеге айналып келеді [2, 3, 6].

Осы жағдайларда киноа негізіндегі өсімдік функционалдық ингредиентін қолдана отырып, пісірілген шұжық өндірісінің технологиясын әзірлеу үлкен маңызға ие [2, 3, 4, 5]. Киноа аминқышқылдық құрамының бірегейлігімен, тағамдық талшықтарға, дәрумендер мен минералдарға бай болуымен, сондай-ақ антиоксиданттық белсенділігімен ерекшеленеді, бұл оны ет өнімдерінің биологиялық құндылығын арттыруға мүмкіндік беретін болашағы зор компонент етеді. Киноа дәндерін өңгіту, кептіру, ұнтақтау және гидратациялау үдерістерінің ғылыми тұрғыдан негізделуі өнімнің тағамдық құндылығын арттырумен қатар, ет жүйесінің функционалдық және технологиялық көрсеткіштерін – ылғал байланыстыру қабілетін, құрылым тұрақтылығын және органолептикалық қасиеттерін жақсартуға ықпал етеді [2-5].

Функционалдық бағыттағы шұжық өнімдерінің технологиясын әзірлеудің заманауи аспектілері нарық талаптарына жауап беретін инновациялық тәсілдерді дамытуға бағытталған [6, 8]. Рецептура мен технологияларды жетілдіру барысында функционалдық, құрылымдық-механикалық көрсеткіштері жақсартылған шұжық өнімдерін өндіру үшін тағамдық талшықтар, пребиотиктер, пробиотиктер, синбиотиктер, өсімдік экстрактылары, коллагенге бай концентраттар, витамин-минерал кешендері, ақуыз гидролизаттары, ферменттелген компоненттер және басқа да биологиялық белсенді қоспалар қолданылады [6-8]. Технология әзірлеу кезінде өнімнің биологиялық құндылығын арттыратын және оның текстурасын жақсартатын өсімдік текті функционалдық ингредиенттерге ерекше назар аударылады.

Маңызды үрдістердің бірі – шұжық өнімдерінің рецептурасын ұлттық ерекшеліктерді, экологиялық талаптарды және қалдықсыз өндіріс қағидаттарын ескере отырып оңтайландыру, бұл өнеркәсіптің тұрақты дамуының қазіргі талаптарына толық сәйкес келеді [1, 4]. Бұдан бөлек, сиыр, қой, шошқа, жылқы, түйе, құс, қоян, кенгуру еті сияқты әртүрлі типтегі, сападағы және функционалдық қасиеттердегі шикізатты пайдалану диеталық және функционалдық қасиеттері бар дайын өнімдердің ассортиментін кеңейтуге мүмкіндік береді [1, 7, 9].

Зерттеу әдістері

Функционалдық бағыттағы шұжық өнімдерін өндірудің қазіргі заманғы тәсілдері тағамдық, биологиялық және функционалдық қасиеттері жақсартылған өнімдер жасауға бағытталған. Негізгі аспектілер – май мен калория мөлшерін төмендету, белок, дәрумен, минералдар деңгейін арттыру, сондай-ақ киноа, бұршақ, сұлы, асқабақ ұндары сияқты өсімдік

текті функционалдық ингредиенттерді қолдану арқылы өнімнің тұрақты текстуралық профилін, дәмдік және функционалдық артықшылықтарын қалыптастыру.

Гидратталған өсімдік қоспаларын қолдану шұжық өндірісінде өнімнің шырындылығын арттыруға, фарш жүйесінің тұрақтылығын күшейтуге, құрылымдық-механикалық көрсеткіштерді жақсартуға және дайын өнімді сақтау кезінде тотығу үдерістерін төмендетуге мүмкіндік береді [1, 2, 4, 5, 7]. Зерттеу нәтижелері өсімдік ингредиенттерін өңдеу әдістерін оңтайландырудың олардың функционалдық-биологиялық белсенді қасиеттерін сақтаудағы және ет өнімдерінің сапасын арттырудағы маңызын көрсетеді. Бұл жоғары қауіпсіздік деңгейі мен жоғары тағамдық құндылыққа ие инновациялық өнімдер жасауға жаңа мүмкіндіктер ашады.

Авторлар тарапынан гидратталған өніп шыққан киноа және инулин ұнтағын қолдану арқылы төмен калориялы пісірілген шұжық өндіру технологиясы ұсынылды. Рецептурасы 1-кестеде берілген.

Кесте 1 – Өсімдік қоспасы қосылған пісірілген шұжықтың рецептурасы

Тұздалмаған шикізат, кг (100 кг шаққанда)	
Шикізат атауы	
Жоғары сұрыпты сиыр еті	20
Жоғары сұрыпты жылқы еті	29
Күркетауық төс еті (филесі)	35
Өсімдік қоспасы – өніп шыққан киноа дәндерінің гидратталған ұнтағы	10
Инулин ұнтағы	1
Тауық жұмыртқасы	2
Өсімдік майы (күнбағыс майы)	3
Барлығы	100 кг
Дәмдеуіштер мен материалдар, г (100кг тұздалмаған шикізатқа)	
Теңіз ас тұзы	1100
Натрий нитриті	6
Хош иісті қарабұрыш	85
Ұнтақталған мускат жаңғағы немесе кардамон	55
Түйіршіктелген қант	110
Сарымсақ	120
Су (қабыршақ мұз)	15
Қабықтар	Диаметрі 80-120 мм жасанды қабықтар

Пісірілген шұжық өндіру үшін негізгі шикізат ретінде жоғары сұрыпты сиыр еті, жоғары сортты жылқы еті, күрке тауықтың төс еті (филе индейки), гидратталған өніп шыққан киноа дәндерінің ұнтағы, инулин ұнтағы, тауық жұмыртқалары, өсімдік майы (күнбағыс майы) қолданылды.

Калориясы төмендетілген пісірілген шұжық өндірісінің технологиялық үдерісі негізгі және қосымша шикізатты қабылдау мен дайындау кезеңдерін қамтиды.

Шикізатты қабылдау мөлшерлік және сапалық көрсеткіштерге қойылған талаптарға сәйкес жүргізіледі. Осы кезеңде ұшаларға бастапқы санитарлық өңдеу жасалады, оған құрғақ және ылғалды тазалау, беттік ластануларды кетіру мақсатында жылы сумен жуу, сондай-ақ кейінгі технологиялық операциялардың микробиологиялық қауіпсіздігін қамтамасыз ету үшін ластанған бөліктерді кесіп алып тастау кіреді.

Шикізатты дайындау кезеңіне етті сүйектен ажырату – яғни бұлшықет тінін сүйектен бөлу, сондай-ақ етті сіңір-шеміршектерден ажырату және кейіннен сорттарға бөлу жатады. Сиыр және жылқы еті жоғары, бірінші және екінші сорттарға жіктеледі. Күрке тауық төс еті қолданар алдында тоңазытқыш камерасының температурасында ерітіліп, ықтимал беттік ластануларды жою үшін салқын сумен жуылады.

Ет шикізатына тұздау 1 кг етке 20 г теңіз ас тұзын енгізу арқылы жүргізіліп, кейін 8-12 сағат бойы 2-4°С температурада тоңазытқышта жетілдіріледі. Бұл кезең тұздың біркелкі таралуына, миофибриллярлық ақуыздардың ішінара экстракциясына және еттің ылғал байланыстыру қабілетінің артуына ықпал етеді, нәтижесінде тураманың құрылымдық сипаттамалары жақсарады.

Қосымша шикізатты дайындау функционалдық және хош иісті компоненттерді алдын ала өңдеуді қамтиды. Өніп шыққан киноа дәндерінің ұнтағы 1:3 (масс./көлем) қатынаста 30 °C температурадағы дистилденген сумен араластырылып, толық гидратация және су байланыстыру қасиеттерін белсендіру үшін 60 минут ұсталды. Сарымсақ суға жібітіліп, қабығынан тазартылып, жуылып, кейін еттартқышта 3 мм-ден аспайтын бөлшектерге дейін ұсақталды. Өсімдік майы мен тауық жұмыртқалары (немесе меланж) рецептураға сәйкес қосылды. Инулин ұнтағы рецептураға сәйкес қосылды. Дәмдік қоспалар мен дәмдеуіштер (теңіз ас тұзы, қант құмшекер, хош иісті қара бұрыш, ұнтақталған мускат жаңғағы немесе кардамон) турамаға енгізу үшін рецептураға сәйкес өлшенді.

Жылқы еті мен күрке тауық төс еті вакуумды HUALIAN GRZK-200 массажерінде 5–10 минут механикалық өңдеуден өткізілді. Массаждау үдерісі етті жұмсартуға, дәмін жақсартуға және кесек еттен жасалатын шұжық өнімдерінде құрылымды қайта түзуге бағытталған. Сиыр еті 3 мм дейін, ал жылқы еті мен күрке тауық еті шамамен 16 мм бөлшек өлшеміне дейін еттартқышта ұсақталды.

Турама құрастыру жоғары жылдамдықты вакуумдық куттерде жүргізілді, ол компоненттерді майдалап кесуге және эмульгирлеуге, сондай-ақ массаға оттегі қанығуын барынша азайтуға мүмкіндік береді. Процесс майсыз ет шикізаты – сиыр етін жүктеуден басталды, оған 15 кг қабыршақ мұз қосылды. Мұндай ылғал үлестірілімі куттерлеудің бастапқы кезеңінде жылулық режимді тиімді бақылауға мүмкіндік берді.

Температура тұрақтанғаннан кейін турамаға алдын ала гидратталған өніп шыққан киноа дәндерінің ұнтағы, инулин ұнтағы, судың қалған бөлігі, өсімдік майы және тауық жұмыртқалары 10°C-тан аспайтын температурада енгізіліп, 5-7 минут араластырылды. Соңғы кезеңде куттерлеу аяқталуына 0,5-1 минут қалғанда алдын ала массаждалған, ірі фракцияға дейін ұсақталған жылқы еті мен күрке тауық еті қосылды. Бұл дайын өнім кесіндісінде «мәрмәр» құрылымын қалыптастырды. Куттерлеу ұзақтығы 10-12 минут, шұжық турамасының температурасы 12°C-тан жоғары болмауы қажет.

Шұжық өнімдерін қалыптау шұжық турамасымен қабықтарды толтыру және олардың ұштарын металл скрепкалармен бекіту кезеңдерін қамтыды. Қабықша ретінде диаметрі 80 мм пияз тәріздес түсті «Амифлекс» типті жасанды қабықтар қолданылды. Қабықтарды турамамен толтыру пневматикалық, гидравликалық вакуумдық шприц арқылы жүргізілді, олар шұжық турамасының біркелкі орналасуын және ауа көпіршіктерінің пайда болмауын қамтамасыз етті.

Қалыптау аяқталғаннан кейін бұйымдар термиялық өңдеуге бағытталды. Оның мақсаты – өнімді аспаздық дайын күйіне дейін жеткізу, микробиологиялық қауіпсіздігін қамтамасыз ету, сақтау тұрақтылығын арттыру және тұрақты тауарлық түрін қалыптастыру.

Термиялық өңдеу алдында батондар алюминий таяқшаларға ілініп, бір-біріне тимейтіндей етіп ілгіш рамаларға орналастырылды, бұл өнімдердің біркелкі қызуын қамтамасыз етті. Термиялық өңдеу автоматты бақылау жүйесімен жабдықталған әмбебап үздіксіз термокамерада жүргізілді. Шұжық батонының ортасындағы температура 72 °C-қа жеткенге дейін пісіру жүзеге асырылды, бұл толық аспаздық дайындық пен микробиологиялық қауіпсіздікті қамтамасыз етеді.

Термиялық өңдеуден кейін бұйымдар батон ортасындағы температура 25-30 °C-қа жеткенге дейін суық сумен душта жылдам салқындатылды. Бұл ақуыз құрылымындағы термодеструктивтік үдерістерді тоқтатуға, термиялық ақаулардың – босаң құрылым, сыртқы беттің жабысқақтығы және т.б. алдын алуға және өнімді кейінгі салқындату мен тұрақтандыру кезеңіне қауіпсіз өткізуге мүмкіндік береді.

Дайын өнім салқындатылғаннан кейін органолептикалық, физика-химиялық және микробиологиялық көрсеткіштері бойынша зерттеулер жүргізілді.

Зерттеу нәтижелері

Өсімдік қоспасы қосылған пісірілген шұжықтың органолептикалық көрсеткіштері 2-кестеде көрсетілген.

Өсімдік қоспасы бар пісірілген шұжықтың физика-химиялық көрсеткіштері 3-кестеде келтірілген.

Өсімдік қоспасы қосылған пісірілген шұжықтың физика-химиялық көрсеткіштерін талдау өнімнің құнарлылығын қамтамасыз ететін теңгерімді құрамға ие екенін көрсетті. Ылғалдың массалық үлесі 61,2 ± 0,5% құрап, шұжықтың жеткілікті шырындылығын және пісірілген шұжықтарға қойылатын нормативтік талаптарға сәйкестігін дәлелдейді.

Кесте 2 – Өсімдік қоспасы қосылған пісірілген шұжықтың органолептикалық көрсеткіштері

№	Көрсеткіштің атауы	Сипаттамасы
1	Сыртқы түрі	Беті тегіс, таза және құрғақ батондар
2	Консистенциясы	Серпімді, тығыз, турамасы бүкіл масса бойынша біртекті таралған
3	Кескедегі көрініс	Біртекті, біркелкі боялған қызғылт тартылған ет, ірі ұнтақталған ет қосылған, бос және жыртылмаған
4	Иісі мен дәмі	Шұжық өніміне тән, дәмдеуіштердің хош иісі бар, орташа тұздазған, бөтен дәмі мен иісі жоқ

Кесте 3 – Пісірілген шұжықтың физика-химиялық көрсеткіштері

№	Көрсеткіштің атауы	Сипаттамасы
1	Ылғалдың массалық үлесі, %	61,2±0,5
2	Майдың массалық үлесі, %	16,9±0,3
3	Ақуыздың массалық үлесі, %	13,5±0,3
4	Көмірсулардың массалық үлесі (оның ішінде диеталық талшық), %	6,2±0,2
5	Ас тұзының массалық үлесі (NaCl)	1,2±0,05
6	Белсенді қышқылдық, pH	6,2± 0,2

Май мөлшері (16,9 ± 0,3 %) ақуыз деңгейімен (13,5 ± 0,3 %) және көмірсулармен (6,2 ± 0,2%), соның ішінде өсімдік қоспасынан алынған тағамдық талшықтармен үйлесе отырып, өнімнің оңтайлы энергетикалық теңгерімін және жақсартылған органолептикалық қасиеттерін қамтамасыз етеді. Ас тұзының массалық үлесі 1,2 ± 0,05% болып, дәмдік сипаттамалар мен қауіпсіздік талаптарына толық сәйкес келеді. Белсенді қышқылдылық деңгейі (pH = 6,2 ± 0,2) патогенді микрофлораның өсуін тежеуге және сақтау кезінде өнімнің тұрақтылығын қамтамасыз етуге қолайлы аралықта орналасқан. Осылайша, физика-химиялық көрсеткіштердің жиынтығы әзірленген өнімнің жоғары сапасын, функционалдылығын және теңгерімділігін растайды.

Өсімдік қоспасы қосылған пісірілген шұжықтың органолептикалық қасиеттерін сақтау барысында неғұрлым объективті және сандық тұрғыда бағалау үшін 5 балдық органолептикалық бағалау шкаласы қолданылды. Бағалау әдістемесі өнімнің негізгі сезімдік сипаттамаларын – сыртқы түрін, консистенциясын, кесіндідегі көрінісін, иісін және дәмін талдауды қамтыды. Әрбір көрсеткіш эталондық сапаға сәйкестігіне қарай 1-ден 5 баллға дейін бағаланды. Баллдар жиынтығы бойынша орташа мән есептеліп, әртүрлі температуралық режимдерде сақтау кезеңдеріндегі органолептикалық қасиеттер динамикасын бақылауға мүмкіндік берді. Баллдық бағалау шкаласы 4-кестеде көрсетілген.

Келесі кезеңде өсімдік қоспасы қосылған пісірілген шұжықтың микробиологиялық көрсеткіштері зерттелді (5-кесте).

Кесте 4 – Өсімдік қоспасы қосылған пісірілген шұжықтың органолептикалық көрсеткіштерін баллдық бағалау шкаласы

№	Көрсеткіш	Сипаттамасы	Балл
1	*2*	*3*	*4*
1	Сыртқы түрі	Беті тегіс, таза, құрғақ, зақымдалмаған	5
		Шамалы бұзушылықтар немесе ылғалдылық	4
		Кішкене жарықтар, жеңіл жабысқақтық қолайлы	3
		Беті гетерогенді, ылғалды, жабысқақ	2
		Пішіні бұзылған, зең, бетінде шырыш бар	1
2	Консистенциясы	Серпімді, тығыз, біртекті	5
		Серпімді, сәл бос	4
		Орташа бос, біркелкі емес	3
		Жұмсақ, борпылдақ, құрылымы біркелкі емес	2
		Борпылдақ, ұсақталған, гетерогенді, айқын ақаулары бар	1
3	Тіліктегі көрінісі	Біркелкі, қызғылт, біркелкі боялған тартылған ет, бос және жыртылмаған	5
		Біртекті дерлік, бірлік дақтарға рұқсат етіледі	4
		Кішкентай бос орындарға, әлсіз анықталған мәрмәрге рұқсат етіледі	3
		Көптеген Бос орындар, біркелкі емес бояу	2
		Жыртылу, үлкен бос жерлер, сұр түсті	1

1	2	3	4
4	Иісі	Бұл өнімге тән, дәмдеуіштердің хош иісі бар, орташа тұзды, дәмі мен иісі жоқ	5
		Нашар анықталған дәмдеуіштер, бірақ дәмі өнімге сәйкес келеді	4
		Дәмі онша айқын емес, аздап қышқылдық болуы мүмкін	3
		Ескірген дәм, әлсіз иіс	2
		Бөтен иістер мен дәмдер, ашулану, бүліну	1

Кесте 5 – Өсімдік қоспасы қосылған пісірілген шұжықтың микробиологиялық көрсеткіштері

Көрсеткіш атауы, өлшем бірлігі	Нормативті құжаттар бойынша норма	Нақты нәтижелері	Зерттеу әдістеріне арналған нормативтік құжаттар
Микробиологиялық көрсеткіштері: КМАФАнМ, КОЕ/г	1x10³	1,6x10²	МЕСТ 10444.15-94
БГКП (коли-форма) 1,0 г өнімде	Рұқсат етілмейді	Табылған жоқ	МЕСТ 31747-2012
патогенді, оның ішінде сальмонеллалар, 25 г өнімде	Рұқсат етілмейді	Табылған жоқ	МЕСТ 31659-2012
L. monocytogenes, 25 г өнімде	Рұқсат етілмейді	Табылған жоқ	МЕСТ 32031-2012
S.aureus, 1,0 г өнімде	Рұқсат етілмейді	Табылған жоқ	МЕСТ 31746-2012
Сульфитредуктивті клостридиялар, 1,0 г өнімде	Рұқсат етілмейді	Табылған жоқ	МЕСТ 29185-2014

Ғылыми нәтижелерді талқылау

Әзірленген технология төмен калориялы, теңдестірілген химиялық құрамы және жоғары органолептикалық қасиеттері бар пісірілген шұжық өндіруге мүмкіндік береді. Өніп шыққан киноа тұқымының гидратталған ұнтағы мен инулин ұнтағын қосу өнімнің тағамдық және функционалдық құндылығын арттыруға, оның құрылымы мен дәмін жақсартуға көмектеседі [2,3,4,5,6]. Дайын өнімді сақтаудың оңтайлы шарттары тұрақты физика-химиялық және микробиологиялық көрсеткіштер сақталатын 72 сағатқа дейінгі 6 °С температура болып табылады. Осылайша, алынған нәтижелер ұсынылған технологияның тиімділігін және оның қауіпсіз және функционалды байытылған ет өнімдерін өндіру үшін практикалық маңыздылығын растайды.

Қорытынды

Жүргізілген зерттеулер гидратталған өніп шыққан киноа дәндерінің ұнтағын өсімдік тектес функционалдық ингредиент ретінде қолдана отырып, пісірілген шұжықтың оңтайлы рецептурасын және өндіріс технологиясын растауға мүмкіндік берді. Сиыр еті, жылқы еті, құс еті (күрке тауық төс еті), гидратацияланған өніп шыққан киноа ұнтағы, инулин ұнтағы, тауық жұмыртқасы, өсімдік күнбағыс майы, дәмдеуіштер мен технологиялық қоспалардан тұратын шұжық турамасының түпкілікті құрамы өнімнің биологиялық құндылығын арттыруға және оның функционалды-технологиялық көрсеткіштерін жақсартуға ықпал ететін ақуыз, май және тағамдық талшықтардың теңгерімді мөлшерін қамтамасыз етті.

Әзірленген технологиялық схема – шикізатты дайындау, өніп шыққан киноа ұнтағын гидратациялау, қалыптау және жылумен өңдеу сатыларының бірізділігі – өнім құрылымының тұрақтылығын және сапа көрсеткіштерінің қайталанымдылығын қамтамасыз етті. Дайын өнімнің физика-химиялық, органолептикалық, микробиологиялық сипаттамаларын бағалау оның қазіргі заманғы сапа және қауіпсіздік талаптарына толық сәйкес келетінін көрсетті.

Осылайша, кешенді зерттеулер нәтижесінде өсімдік тектес функционалдық компоненті бар, жоғары биологиялық құндылыққа ие, сапа көрсеткіштері тұрақты және рационалды сақтау жағдайларында қауіпсіз болып табылатын калориясы төмендетілген пісірілген шұжық өндірісінің жаңа технологиясын жасау мүмкіндігі дәлелденді.

Әдебиеттер тізімі

1. Production of healthier bologna type sausages using pork skin and green banana flour as fat replacers / L.A.A.D.S. Alves et al // Meat Science. – 2016. – № 121. – P. 73-78. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2016.06.001.

2. Bağdatli A. The influence of quinoa (Chenopodium quinoa Willd.) Flour on the physicochemical, textural and sensorial properties of beef meatball / A. Bağdatli // Italian Journal of Food Science. – 2018. – № 30. – P. 280-288. https://doi.org/10.1590/1981-6723.10316.

3. Rheological properties of quinoa-based gels. An alternative for vegan diets / M. Felix et al // Food Hydrocolloids. – 2021. – № 120. – P. 106827. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106827.
4. Chemical and technological properties of bologna-type sausages with added black quinoa wet-milling coproducts as binder replacer / J. Fernández-López et al // Food Chemistry. – 2020. – № 310(4). – P. 125936. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125936.
5. Proximate, physico-chemical, functional and sensory properties of quinoa and amaranth flour as potential binders in beef sausages / J.T. Muchekeza // Food Chemistry. – 2021. – № 365. – P. 130619. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130619.
6. Abdullah L.L. Engineering Emulsion Gels as Functional Colloids Emphasizing Food Applications: A Review / L.L. Abdullah, H.U. Javed, J. Xiao // Frontiers in Nutrition. – 2022. – № 9. – P. 890188. https://doi.org/10.3389/fnut.2022.890188.
7. Bis-Souza C.V. Performance of low-fat beef burger with added soluble and insoluble dietary fibers / C.V. Bis-Souza, J.M.M. Henck, A.C.D.S. Barretto // Food Science and Technology (B razil). – 2018. – № 38. – P. 522-529. https://doi.org/10.1590/fst.09217.
8. Vegetable-based frankfurter sausage production by different emulsion gels and assessment of physical-chemical, microbiological and nutritional properties / P.F. Corrêa et al // Food Chemistry Advances. – 2023. – № 3. – P. 100354. https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100354.
9. Research of the nutritional and biological value of semi-smoked meat-containing sausage / N. Bozhko et al // Food Science and Technology. – 2019. – № 13. – P. 96-103. https://doi.org/10.15673/fst.v13i4.1561.
10. Choe J. Quality characteristics of reduced fat emulsion-type chicken sausages using chicken skin and wheat fiber mixture as fat replacer / J. Choe, H.Y. Kim // Poultry Science. – 2019. – № 98(6). – P. 2662-2669. https://doi.org/10.3382/ps/pez016.

А.А. Даутова*, К.Ж. Амирханов, Ж. Калибекқызы, С.К. Касымов, А.О. Майжанова
Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А
*e-mail: a.dautova@shakarim.kz

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ВАРЁНЫХ КОЛБАС ПОНИЖЕННОЙ КАЛОРИЙНОСТИ С ДОБАВЛЕНИЕМ РАСТИТЕЛЬНЫХ КОМПОНЕНТОВ

В данной статье рассматриваются вопросы совершенствования технологии производства варёной колбасы с пониженной калорийностью с использованием растительных функциональных ингредиентов. В современном обществе наблюдается устойчивый рост спроса на здоровое и сбалансированное питание, что требует обновления рецептур мясных продуктов, снижения их энергетической ценности при одновременном увеличении пищевой и биологической ценности. В связи с этим основной целью исследования является разработка функциональной, низкокалорийной и высококачественной мясной продукции путём совершенствования технологии традиционной варёной колбасы.

В процессе работы в рецептуру продукта были введены гидратированный порошок проросших зерен киноа и инулин. Комплексно изучалось влияние этих растительных добавок на структурно-механические свойства колбасного фарша, технологические показатели, способность удерживать влагу, а также на пищевую и функциональную ценность готового изделия. Определялся химический состав продукта, включая содержание белков, жиров, углеводов и пищевых волокон, а также рассчитывалась его энергетическая ценность. Дополнительно проводилась оценка органолептических показателей, микробиологической безопасности и стабильности продукта при хранении.

Полученные результаты показали, что использование растительных добавок повышает структурную устойчивость колбасы, улучшает её сочность, вкусовые качества и потребительские свойства. Снижение содержания жира позволило сохранить уровень белка и одновременно обогатить продукт пищевыми волокнами, что положительно сказывается на его функциональной ценности. Применение этих ингредиентов делает продукт более привлекательным для потребителей, ориентированных на здоровый образ жизни, а также расширяет возможности его использования в промышленном производстве мясных изделий.

Таким образом, результаты исследования подтверждают практическую значимость производства низкокалорийной варёной колбасы с высокой биологической ценностью и выраженными функциональными свойствами, а также демонстрируют перспективы её широкого

применения в мясоперерабатывающей промышленности для создания инновационных и конкурентоспособных продуктов.

Ключевые слова: *функциональные пищевые продукты, варёная колбаса, низкокалорийные продукты, растительные добавки, киноа, инулин, пищевые волокна, технология мясных продуктов, микробиологическая безопасность, биологическая ценность.*

A. Dautova*, K. Amirkhanov, Zh. Kalibekkyzy, S. Kasymov, A. Maizhanova
Shakarim University,
071412, Semey, Republic of Kazakhstan, 20A Glinki St.
*e-mail: a.dautova@shakarim.kz

IMPROVEMENT OF TECHNOLOGY FOR PRODUCING LOW-CALORIE BOILED SAUSAGES WITH PLANT-BASED ADDITIVES

This article addresses the issues of improving the technology for producing low-calorie cooked sausages through the use of plant-based functional ingredients. At present, there is a growing public demand for healthy and balanced nutrition, which necessitates the modernization of meat product formulations, reducing their energy value while simultaneously enhancing their nutritional and biological quality. Therefore, the primary objective of this research is to develop a functional, low-calorie, and high-quality meat product by improving the technology of traditional cooked sausages.

During the study, hydrated powder from sprouted quinoa seeds and inulin were incorporated into the product formulation. The impact of these plant-based additives on the structural and mechanical properties of the sausage mass, technological performance indicators, water-binding capacity, as well as the nutritional and functional quality of the final product, was comprehensively examined. The chemical composition of the finished product, including protein, fat, carbohydrate, and dietary fiber content, was determined, and its energy value was calculated. Additionally, organoleptic characteristics, microbiological safety, and storage stability were evaluated to ensure overall product quality and consumer acceptability.

The results demonstrated that the use of plant-based additives enhances the structural stability of the sausages, improves their juiciness, taste, and overall sensory attributes, and positively affects consumer preferences. Reducing the fat content allowed the protein level to be maintained while enriching the product with dietary fibers, thereby increasing its functional and nutritional value. The application of these ingredients makes the product more suitable for health-conscious consumers and expands its potential for industrial production within the meat processing sector.

In conclusion, the findings of this study confirm the practical significance of producing low-calorie cooked sausages with high biological value and pronounced functional properties. Moreover, they highlight the prospects for the broader application of such innovative products in the meat processing industry, contributing to the development of healthier and competitive meat products.

Key words: *functional food products, cooked sausage, low-calorie products, plant-based additives, quinoa, inulin, dietary fibers, meat product technology, microbiological safety, biological value.*

Авторлар туралы мәлімет

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.

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.

Жанар Қалибекқызы – ғылым кандидаты, доцент, Шәкәрім университеті; e-mail: zhanar_moldabaeva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6384-0646.

Самат Кайратович Касымов – техника ғылымдарының кандидаты, «Тамақ технологиясы» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: samat-kasymov@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7384-6996.

Айгүл Омарбековна Майжанова – «Тамақ технологиясы» кафедрасының докторанты, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: fquekm2710@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4845-9465

Сведения об авторах

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.

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.

Жанар Калибеккызы – кандидат биологических наук, ассоциированный профессор, Шәкәрім университет; e-mail: zhanar_moldabaeva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6384-0646.

Самат Кайратович Касымов – кандидат технических наук, ассоциированный профессор кафедры «Пищевых технологий», Шәкәрім университеті, Республика Казакстан; e-mail: samat-kasymov@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7384-6996.

Айгуль Омарбековна Майжанова – докторант кафедры «Пищевая технология», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: fquekm2710@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4845-9465.

Information about the authors

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.

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.

Zhanar Kalibekkyzy – Candidate of Biology Sciences, Associate Professor, Shakarim University, Semey, Kazakhstan; e-mail: zhanar_moldabaeva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6384-0646.

Samat Kasymov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Food Technologies, Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: samat-kasymov@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7384-6996.

Aigul Maizhanova – doctoral student of the Department of «Food Technology», Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: fquekm2710@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4845-9465.

Редакцияға енуі 10.01.2026
Өңдеуден кейін түсуі 08.03.2022
Жариялауға қабылданды 10.03.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-52

МРНТИ: 65.63.03

BY 4.0
Check for updates

А.О. Утегенова[*1], А.С. Камбарова[1], З.В. Капшакбаева[2], Ж.М. Атамбаева[1], Б.М. Кулуштаева[1]

[1]Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А
[2]Торайгыров университет,
140008, Республика Казахстан, г. Павлодар, ул. Ломова 64
*e-mail: asia_aksu@mail.ru

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА МЕТОДА И МАТЕРИАЛА ДЛЯ ИММОБИЛИЗАЦИИ ФЕРМЕНТОВ

Аннотация: *В статье приведены исследования по разработке тест-системы по определению фосфорорганических соединений в молоке на основании проведенных исследований нами выбран гидролитический фермент с наиболее высокой удельной активностью, и соответственно, проявляющий высокую чувствительность к ингибирующим свойствам карбофоса в молоке, а именно, ацетилхолинэстераза.*

Основой для создания экспресс-методов определения пестицидов являются физико-химические, микробиологические, биохимические, молекулярно-биологические и иммунологические способы и они постоянно совершенствуются.

В статье были применены теоретические и экспериментальные исследования. Экспериментальные исследования были проведены на основе общепринятых, модифицированных и стандартных методов исследований физико-химических, органолептических, реологических, гигиенических показателей безопасности объектов исследований, а также удельной активности ферментов.

Поскольку, молоко является сложной полидисперсной системой, то важным фактором является выбор фермента с более высокой удельной активностью. По данным литературных

А.О. Утегенова, А.С. Камбарова, З.В. Капшакбаева, Ж.М. Атамбаева, Б.М. Кулуштаева, 2026

источников гидролитические ферменты (ацетилхолинэстеразы и бутирилхолинэстеразы) обладают высокой чувствительностью к ингибирующим свойствам карбофоса, которая проявляется в понижении удельной активности фермента. Результаты проведенных экспериментальных исследований показали, что из двух гидролитических ферментов наибольшую удельную активность показывает ацетилхолинэстераза в сравнении с бутирилхолинэстеразой как в водной среде, так и в молоке.

Исходя из результатов исследования, можно отметить, что при оптимальной температуре гелеобразования 18-20ºС максимальную активность ацетилхолинэстераза проявляет при оптимальной величине pH среды для полимерного геля, полученного на основе желатина 6,1; для среды для полимерного геля, полученного на основе альгината натрия – 5,4.

Ключевые слова: *пестициды, карбофос, иммобилизация, гидролитический фермент, ацетилхолинэстераза, молоко, биосенсорная тест-система.*

Введение

Для разработки тест-системы по определению фосфорганических соединений в молоке на основании проведенных исследований нами выбран гидролитический фермент с наиболее высокой удельной активностью, и соответственно, проявляющий высокую чувствительность к ингибирующим свойствам карбофоса в молоке, а именно, ацетилхолинэстераза.

Как отмечают ряд ученых для разработки биосенсорной тест-системы необходимо проводить иммобилизацию ферментов, поскольку иммобилизованный фермент в сравнении с нативным ферментом довольно длительное время сохраняет максимальную работоспособность, при этом, не подвергаясь структурным изменениям. То есть, иммобилизованные ферменты более устойчивые и не уступают по эффективности нативным ферментам [1-3].

На основании вышеизложенного в данной работе поставлена задача – проведение исследований по подбору метода и материала для иммобилизации фермента ацетилхолинэстеразы.

На первом этапе работы обоснован выбор метода и материала иммобилизации фермента ацетилхолинэстеразы.

Как известно, существуют несколько методов иммобилизации ферментов, которые подразделяются согласно классической классификации на физические и химические методы иммобилизации.

К физическим методам иммобилизации относятся адсорбция и включение в гель, к химическим же методам – ковалентное связывание и сшивание [1].

На основании проведенного литературного обзора установлено, что метод адсорбции иммобилизации ферментов относится к одному из простых и недорогих методов иммобилизации и ему присущи ряд недостатков. К одному из основных недостатков данного метода относится низкая прочность связывания фермента с носителем [1].

Химический же метод иммобилизации ферментов, как указывают исследователи, применяются в основном для проведения лабораторных исследований. Для серийного производства наиболее приемлемы физические методы иммобилизации ферментов, поскольку данные методы более доступны и экономически целесообразны [1, 5-8].

Учитывая, что в данной статье изучена разработка биосенсорной тест-системы для определения фосфорорганических пестицидов для серийного выпуска, то для иммобилизации фермента ацетилхолинэстеразы был выбран физический метод – метод включения в гель, а также второй способ – метод включения в гель с дополнительным применением одного из способа химического метода – кроссшивание.

Методы исследования:

Для иммобилизации фермента в статье были применены два способа: получение полимерного геля с включенными в него молекулами фермента, а также добавление в реакционную смесь бифункциональных сшивающих агентов [3, 6].

При первом способе фермент вносится в раствор готового полимера, тщательно перемешивается для равномерного распределения фермента в носителе и оставляется в покое до перехода полимера в гелеобразное состояние при температуре 18-20ºС.

Во втором же способе фермент вносится в раствор готового полимера, тщательно перемешивается для равномерного распределения фермента в носителе. Готовый полимер наносится на поверхность подложки тест-системы с выдержкой 5 секунд, затем подложку

тест-системы погружаем в раствор кросс-сшивающего агента на 5 секунд. В качестве кросс-сшивающего агента для желатина выбран глутаровый альдегид, для низкометилированного пектина и альгината натрия - хлористый кальций ($CaCl_2$).

Экспериментальные исследования по иммобилизации фермента ацетилхолинэстеразы проведены методом включения в гель двумя способами.

В качестве носителя для иммобилизации фермента ацетилхолинэстеразы, были выбраны желатин, низкометилированный пектин и альгинат натрия. Известно, что в качестве носителей в основном для разработки биосенсорных тест-систем используют природные вещества, а именно, животные белки и растительные полисахариды. Из белковых веществ применяют желатин, из растительных полисахаридов пектин и альгинат натрия, как наиболее доступные и экономически целесообразные [5, 6, 9].

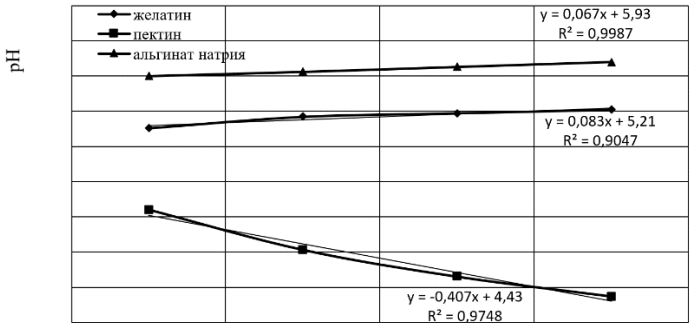
На следующем этапе работы проведены исследования по апробации первого способа физического метода иммобилизации фермента ацетилхолинэстеразы основанного на его включении в носитель.

С этой целью были получены полимерные гели на основе желатина, низкометилированного пектина и альгината натрия с включенными в него молекулами фермента при оптимальной температуре гелеобразования 18-20ºС и при разных концентрациях носителей [10, 11].

На первом этапе было исследовано изменение активной кислотности при получении гелей в зависимости от концентрации желатина, пектина и альгината натрия. Анализ литературных источников показал, что к одним из факторов, влияющих на активность фермента, относится pH среды, то есть каждый фермент проявляет максимальную активность при оптимальном значении pH среды. Данные исследования проведены для обоснования активности ацетилхолиэстеразы, иммобилизованного на разных носителях.

Результаты исследований

На рисунке 1. Представлены результаты исследований



$y = 0{,}067x + 5{,}93$ $(R^2 = 0{,}9987)$; $y = 0{,}083x + 5{,}21$ $(R^2 = 0{,}9047)$; $y = -0{,}407x + 4{,}43$ $(R^2 = 0{,}9748)$

Рисунок 1 – Изменения pH носителей при их различных концентрациях

Как видно из рисунка 1 с повышением концентрации желатина и альгината натрия в растворе активная кислотность увеличивается постепенно и незначительно. Вместе с тем, в растворе на основе пектина с включенными в него молекулами фермента ацетилхолинэстеразы активная кислотность понижается с 4,1 до 2,87, то есть увеличивается кислотность раствора. Вероятнее всего это связано с тем, что карбоксильные группы, входящие в состав низкометилированного пектина при диссоциации снижают pH.

На основании математической обработки полученных экспериментальных данных получено уравнение линейной регрессии:

$$Y = bx + a \qquad (1)$$

где b и a – коэффициенты регрессии;

x – концентрация носителей, %.

В результате анализа коэффициентов регрессии установлено, что абсолютная величина коэффициента регрессии b для желатина и альгината натрия имеет положительную величину и определяет незначительную зависимость изменения активной кислотности от их

концентрации. Абсолютная величина коэффициента регрессии b для пектина имеет отрицательное значение, что показывает наибольшую зависимость изменения активной кислотности от его концентрации. Необходимо отметить, что коэффициент детерминации (R^2) как видно из рисунка 1 близок к единице, что означает достоверность полученных результатов.

Таким образом, на основании экспериментальных исследований по иммобилизации фермента ацетилхолинэстеразы методом включения в гель желатина, пектина и альгината натрия при оптимальной температуре гелеобразования 18-20°С и при разных концентрациях носителей установлено, что с повышением концентрации желатина и альгината натрия в растворе активная кислотность увеличивается постепенно и незначительно. Вместе с тем в растворе на основе пектина с включенными в него молекулами фермента ацетилхолинэстеразы активная кислотность понижается с 4,1 до 2,87, то есть увеличивается кислотность раствора.

На втором этапе исследований был проведен анализ внешнего вида полученных гелей на используемых носителях. Результаты анализа приведены в таблицах 1, 2, 3.

Таблица 1 – Оценка внешнего вида полимерного геля на основе желатина

Концентрация,%	Характеристика внешнего вида
1	Консистенция однородная, текучая, цвет слегка розовый
2	Консистенция однородная, текучая, цвет слегка розовый
3	Консистенция однородная, не текучая, цвет розовый
4	Консистенция однородная, не текучая, цвет розовый

Как видно из таблицы 1, полимерный гель, полученный на основе желатина с концентрацией 1% характеризуется однородной и текучей консистенцией, цвет слегка розовый.

С увеличением концентрации до 2% желатина консистенция приобретает однородную консистенцию, текучую, цвет слегка розовый.

Дальнейшее увеличение концентрации до 3% желатина приводит к получению геля с однородной и густой консистенцией, не текучей, цвет розовый.

Увеличение же концентрации желатина до 4% приводит к получению геля с плотной и однородной консистенцией, не текучей, цвет розовый.

Таким образом, наиболее оптимальным является полимерный гель, полученный при содержании желатина в концентрации 3%.

Таблица 2 – Оценка внешнего вида и консистенция полимерного геля на основе низкометилированного пектина

Концентрация,%	Характеристика внешнего вида
1	Консистенция однородная, текучая, цвет слегка розовый
2	Консистенция однородная, не текучая, цвет слегка розовый
3	Консистенция однородная, не текучая, цвет розовый
4	Консистенция однородная, не текучая, цвет розовый

Как видно из таблицы 2, полимерный гель, полученный на основе пектина с концентрацией 1% характеризуется однородной и густой консистенцией, цвет слегка розовый.

Увеличение концентрации до 2% пектина не повлияло на изменение внешнего вида геля в сравнении с концентрацией пектина 1%.

При дальнейшем увеличении концентрации до 3% пектина наблюдается уплотнение консистенции полимерного геля и не текучести, цвет розовый.

С увеличением концентрации пектина до 4% приводит к получению полимерного геля с не текучей консистенцией, цвет розовый.

Таким образом, наиболее оптимальным является полимерный гель, полученный при содержании пектина в концентрации 1 и 2%.

Как видно из таблицы 3, внешний вид полимерного геля, полученного на основе альгината натрия, характеризуется при разных его концентрациях также как и при получении полимерного геля на основе пектина. Также, наиболее оптимальным является полимерный гель, полученный при содержании альгината натрия в концентрации 1 и 2%.

Таблица 3 – Оценка внешнего вида полимерные гели на основе альгината натрия

Концентрация,%	Характеристика внешнего вида
1	Консистенция однородная, не текучая, цвет слегка розовый
2	Консистенция однородная, не текучая, цвет слегка розовый
3	Консистенция однородная, не текучая, цвет розовый
4	Консистенция однородная, не текучая, цвет розовый

Обсуждение научных результатов

В результате оценки внешнего вида полимерных гелей, полученных на основе различных носителей, установлено, что оптимальным являются гели на основе 3% желатина, 2% низкометилированного пектина и 2% альгината натрия. При вышеуказанных концентрациях получены гели с однородной и густой консистенцией, не текучей, розового цвета.

На дальнейшем этапе исследования полимерные гели были нанесены на стеклянную поверхность тест-системы. С этой целью стеклянную палочку опускали в полученный раствор полимера с ферментом, затем вынимали стеклянную палочку и оставляли в покое до образования на ее поверхности твердого геля розового цвета.

Полимерный гель, полученный на основе желатина с концентрацией 3%, нанесенный на стеклянную поверхность тест-системы был распределен неравномерно на стеклянной поверхности тест-системы и при этом наблюдались значительные разрывы.

Полученная тест-система была апробирована в подготовленных образцах молока с содержанием карбофоса от 0,01 до 0,12 мг/кг.

Результат исследования представлен на рисунке 2.

Как видно из рисунка 2 тест-система окрасилась в желтый цвет при содержании карбофоса в молоке свыше 0,05 мг/кг, что свидетельствует о том, что данная тест-система позволяет определить присутствие фосфорорганического пестицида в молоке. Вместе с тем, необходимо отметить, что нанесенная на поверхность стеклянной палочки, полимер желатина с концентрацией 3% распределен неравномерно и наблюдаются значительные разрывы.

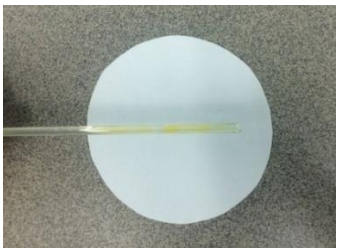


Рисунок 2 – Апробированная тест-система в молоке с карбофосом (>0,05 мг/кг) на основе желатина (3%)

Полимерный гель, полученный на основе пектина с концентрацией 2%, нанесенный на стеклянную поверхность тест-системы также был неравномерно распределен на стеклянной поверхности тест-системы и при этом основная масса полимерного геля скапливалась на кончике стеклянной палочки.

Полученная тест-система была апробирована в подготовленных образцах молока с содержанием карбофоса от 0,01 до 0,12 мг/кг. Результат исследования представлен на рисунке 3.



Рисунок 3 – Апробированная тест-система в молоке с карбофосом (>0,05 мг/кг) на основе пектина (2%)

Как видно из рисунка 3, при апробировании данной тест-системы в образце молока с повышенным содержанием карбофоса свыше 0,05 мг/кг цвет тест-системы не изменился, что свидетельствует о том, что данная тест-система не позволяет определить присутствие фосфорорганического пестицида в молоке. По-видимому, это связано с тем, что в растворе на основе пектина с включенными в него молекулами фермента ацетилхолинэстеразы активная кислотность понижается с 4,1 до 2,87, то есть увеличивается кислотность раствора. Вместе с тем, как видно из рисунка 3, полимерный гель, полученный на основе пектина, неравномерно распределен на стеклянной поверхности тест-системы и при этом основная масса полимерного геля скапливается на кончике стеклянной палочки.

Полимерный гель, полученный на основе альгината натрия с концентрацией 2%, нанесенный на стеклянную поверхность биосенсорной тест-системы полимерный гель, полученный на основе альгината натрия, практически не закрепился на стеклянной поверхности биосенсорной тест-системы.

Полученная тест-система была апробирована в подготовленных образцах молока с содержанием карбофоса от 0,01 до 0,12 мг/кг.

Результат исследования представлен на рисунке 4.

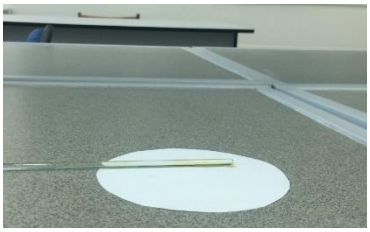


Рисунок 4 – Апробированная тест-система в молоке с карбофосом (>0,05 мг/кг) на основе альгината натрия (2%)

Как видно из рисунка 4, при апробировании данной тест-системы в образце молока при содержании карбофоса в молоке свыше 0,05 мг/кг цвет тест-системы изменился слегка в желтый, что свидетельствует о том, что данная тест-система позволяет определить присутствие фосфорорганического пестицида в молоке. Вместе с тем как видно из рисунка 4 полимерный гель, полученный на основе альгината натрия, практически не закреплен на стеклянной поверхности тест-системы.

Заключение

На основании проведенных исследований установлено, что при разработке тест-системы для определения карбофоса по первому способу, то есть при внесении фермента в раствор готового полимера с дальнейшим гелеобразованием при температуре 18-20ºС, наблюдается неравномерное распределение исследуемых полимерных гелей, с неплотной структурой и со значительными разрывами на поверхности стеклянной палочки. При апробировании же тест-систем, полученных на основе желатина и альгината натрия, на образцах молока с содержанием карбофоса свыше 0,05 мг/кг цвет тест-систем изменился, что свидетельствует о том, что данные тест-системы позволяют определить присутствие фосфорорганического пестицида в молоке.

Список литературы

1. Полимерные носители для иммобилизации ферментов / А.Г. Аракелян и др. // Проблемы науки. – 2018. – № 11(35). – С. 9-10.
2. Демьянцева Е.Ю. Способы инкапсулирования ферментов: учеб.-метод. пос. / Е.Ю. Демьянцева, А.В. Парфенова/ – СПб., 2018. – 20 с.
3. Спектрофотометрический метод определения протеолотической активности иммобилизованных в структуру биополимеров / Е.В. Волосова и др. // Успехи современного естествознания. – 2016. – № 4. – С. 18-22.
4. Клюева М.В. Основные аспекты иммобилизации ферментов на примере липаз / М.В. Клюева // Молодой ученый. – 2014. – № 8. – С. 320-325.
5. Ефимцева Э.А. Иммобилизация щелочнойфосфотазы. Перспективы биомедицинского использования иммобилизованного фермента / Э.А. Ефимцева, Т.И. Челпанова // Биотехнология. – 2017. – Т. 33, № 4. – С. 54-75.

6. Методы функционализации поверхности сенсоров биологическими молекулами / Н.Е. Маслова и др. // Молекулярная медицина. – 2013. – № 5. – С. 8-15.
7. Приворотская Е.А. Получение стабилизированных форм гидролитических ферментов технического и фармацевтического назначения: дис. … канд. хим. наук: 03.01.06. – М., 2017. – 171 с.
8. Мазеина Г.С. Разработка новых защитных групп для бороновых кислот на основе борадамантов / Г.С. Мазеина, А.Ю. Сухороков // Успехи в химии и в химической технологии. – 2017. – Т. 31, № 4. – С. 13-15.
9. Челпанова Т.И. Иммобилизация щелочнойфосфотазы на сферических пектиновых гелях / Т.И. Челпанова, Э.А. Ефимцева // Прикладная биохимия и микробиология. – 2016. – Т. 52, № 1. – С. 44-52.
10. Water Contamination through Pesticide and Their Toxic Effect on Human Health / M.S. Sankhla et al // International Journal for Research in Appliet Science and Engneering Technology. – 2018. – Vol. 6. – P. 967-970.
11. Effective removal of different species of organophosphorus pesticides (acephate, omthosate, and methyl parathion) using chitosan/Zeolite-A as multifunctional adsorbent / M. Mostafa et al // Environmental Technology & Innovation. – 2021. – Vol. 24. – P. 101875.

References

1. Polimernye nositeli dlya immobilizatsii fermentov / A.G. Arakelyan i dr. // Problemy nauki. – 2018. – № 11(35). – S. 9-10. (In Russian).
2. Dem'yantseva E.YU. Sposoby inkapsulirovaniya fermentov: ucheb.-metod. pos. / E.YU. Dem'yantseva, A.V. Parfenova/ – SPb., 2018. – 20 s. (In Russian).
3. Spektrofotometricheskii metod opredeleniya proteoloticheskoi aktivnosti immobilizovannykh v strukturu biopolimerov / E.V. Volosova i dr. // Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya. – 2016. – № 4. – S. 18-22. (In Russian).
4. Klyueva M.V. Osnovnye aspekty immobilizatsii fermentov na primere lipaz / M.V. Klyueva // Molodoi uchenyi. – 2014. – № 8. – S. 320-325. (In Russian).
5. Efimtseva EH.A. Immobilizatsiya shchelochnoifosfotazy. Perspektivy biomeditsinskogo ispol'zovaniya immobilizovannogo fermenta / EH.A. Efimtseva, T.I. Chelpanova // Biotekhnologiya. – 2017. – T. 33, № 4. – S. 54-75. (In Russian).
6. Metody funktsionalizatsii poverkhnosti sensorov biologicheskimi molekulami / N.E. Maslova i dr. // Molekulyarnaya meditsina. – 2013. – № 5. – S. 8-15. (In Russian).
7. Privorotskaya E.A. Poluchenie stabilizirovannykh form gidroliticheskikh fermentov tekhnicheskogo i farmatsevticheskogo naznacheniya: dis. … kand. khim. nauk: 03.01.06. – M., 2017. – 171 s. (In Russian).
8. Mazeina G.S. Razrabotka novykh zashchitnykh grupp dlya boronovykh kislot na osnove boradamantov / G.S. Mazeina, A.YU. Sukhorokov // Uspekhi v khimii i v khimicheskoi tekhnologii. – 2017. – T. 31, № 4. – S. 13-15. (In Russian).
9. Chelpanova T.I. Immobilizatsiya shchelochnoifosfotazy na sfericheskikh pektinovykh gelyakh / T.I. Chelpanova, EH.A. Efimtseva // Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya. – 2016. – T. 52, № 1. – S. 44-52. (In Russian).
10. Water Contamination through Pesticide and Their Toxic Effect on Human Health / M.S. Sankhla et al // International Journal for Research in Appliet Science and Engneering Technology. – 2018. – Vol. 6. – P. 967-970. (In English).
11. Effective removal of different species of organophosphorus pesticides (acephate, omthosate, and methyl parathion) using chitosan/Zeolite-A as multifunctional adsorbent / M. Mostafa et al // Environmental Technology & Innovation. – 2021. – Vol. 24. – P. 101875. (In English).

А.О. Утегенова*[1], А.С. Камбарова[1], З.В. Капшакбаева[2], Ж.М. Атамбаева[1], Б.М. Кулуштаева[1]
[1]Шәкәрім университеті, 071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинка к-сі, 20 А
[2]Торайғыров университеті, 140008, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ., Ломов көшесі 64
*e-mail: asia_aksu@mail.ru

ФЕРМЕНТТЕРДІ ИММОБИЛИЗАЦИЯЛАУ ӘДІСІ МЕН МАТЕРИАЛЫН ТАҢДАУДЫҢ НЕГІЗДЕМЕСІ

Мақалада сүттегі фосфорганикалық қосылыстарды анықтауға арналған тест жүйесін әзірлеу бойынша зерттеулер келтірілген, біз жүргізген зерттеулерге сүйене отырып, ең жоғары үлестік белсенділігі бар гидролитикалық ферментті таңдадық және сәйкесінше сүттегі

карбофостың ингибиторлық қасиеттеріне жоғары сезімталдықты көрсетеміз, атап айтқанда ацетилхолинэстераза.

Пестицидтерді анықтаудың жедел әдістерін құрудың негізі физика-химиялық, микробиологиялық, биохимиялық, молекулалық-биологиялық және иммунологиялық әдістер болып табылады және олар үнемі жетілдіріліп отырады.

Мақалада теориялық және эксперименттік зерттеулер қолданылды.

Эксперименттік зерттеулер зерттеу объектілерінің қауіпсіздігінің физика-химиялық, органолептикалық, реологиялық, гигиеналық көрсеткіштерін, сондай-ақ ферменттердің меншікті белсенділігін зерттеудің жалпы қабылданған, өзгертілген және стандартты әдістері негізінде жүргізілді.

Сүт күрделі полидисперсті жүйе болғандықтан, меншікті белсенділігі жоғары ферментті таңдау маңызды фактор болып табылады. Әдеби дереккөздерге сәйкес гидролитикалық ферменттер (ацетилхолинэстеразалар және бутирилхолинэстеразалар) карбофостың ингибиторлық қасиеттеріне жоғары сезімталдыққа ие, бұл ферменттің меншікті белсенділігінің төмендеуінде көрінеді.

Жүргізілген эксперименттік зерттеулердің нәтижелері екеуінің гидролитикалық ферменттердің ең үлкен белсенділігі ацетилхолинэстераза сулы ортада да, сүтте де бутирилхолинэстеразамен салыстырғанда.

***Түйін сөздер:** Түйін сөздер: пестицидтер, карбофос, иммобилизация, гидролитикалық фермент, ацетилхолинэстераза, сүт, биосенсорлық тест жүйесі.*

A.O. Utegenova*[1], A.S. Kambarova[1], Z.V. Kapshakbayeva[2], Zh.M. Atambayeva[1], B.M. Kulushtaeva[1]

[1]Shakarim Semey University, 071412, Republic of Kazakhstan, Semey, 20A Glinka St.

[2]Toraygyrov University, 140008, Republic of Kazakhstan, Pavlodar, 64 Lomov Street

*e-mail: asia_aksu@mail.ru

JUSTIFICATION OF THE CHOICE OF METHOD AND MATERIAL FOR ENZYME IMMOBILIZATION

The article presents research on the development of a test system for the determination of organophosphate compounds in milk. Based on our research, we selected a hydrolytic enzyme with the highest specific activity and, accordingly, highly sensitive to the inhibitory properties of carbophos in milk, namely, acetylcholinesterase.

The basis for the creation of express methods for the determination of pesticides are physico-chemical, microbiological, biochemical, molecular biological and immunological methods, and they are constantly being improved.

Theoretical and experimental studies were applied in the article.

Experimental studies were conducted on the basis of generally accepted, modified and standard research methods of physico-chemical, organoleptic, rheological, hygienic safety indicators of research objects, as well as the specific activity of enzymes.

Since milk is a complex polydisperse system, the choice of an enzyme with a higher specific activity is an important factor. According to literature data, hydrolytic enzymes (acetylcholinesterases and butyrylcholinesterases) are highly sensitive to the inhibitory properties of carbophos, which is manifested in a decrease in the specific activity of the enzyme.

The results of the experimental studies have shown that of the two hydrolytic enzymes, the highest specific activity is shown by acetylcholinesterase versus butyrylcholinesterase in both aqueous and milk environments.

Keywords: pesticides, carbophos, immobilization, hydrolytic enzyme, acetylcholinesterase, milk, biosensory test system.

***Key words:** pesticides, carbophos, immobilization, hydrolytic enzyme, acetylcholinesterase, milk, biosensory test system.*

Сведения об авторах

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.

Зарина Владимировна Капшакбаева – PhD, ассоциированный профессор кафедры «Биотехнология», Торайгыров университет, г. Павлодар, Казахстан; e-mail: z.k.87@mail.ru. ORCID: http://orcid.org/0000-0001-7989-5270.

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.

Жибек Манаповна Атамбаева – ст.преподаватель кафедры «Пищевая технология», Шәкәрім университет, Казакстан; e-mail: zh.atambayeva@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7899-870X.

Ботакоз Манарбековна Кулуштаева – PhD, ст.преподаватель кафедры «Пищевая технология», Шәкәрім университет, Казакстан; e-mail: kulushtaeva_89@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0067-9872.

Авторлар туралы мәліметтер

Асия Оразбековна Утегенова* – PhD, «Тамақ технологиясы» кафедрасының қауымдастырылған профессор м.а., Шәкәрім университеті, Қазақстан; e-mail: asia_aksu@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3378-6815.

Зарина Владимировна Капшакбаева – PhD, «Биотехнология» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Торайғыров университеті, Павлодар қ., Қазақстан; e-mail: z.k.87@mail.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0001-7989-5270.

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.

Жибек Манаповна Атамбаева – «Тамақ технологиясы» кафедрасының аға оқытушысы, Шәкәрім университеті, Қазақстан; e-mail: zh.atambayeva@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7899-870X.

Ботакоз Манарбековна Кулуштаева – PhD, «Тамақ технологиясы» кафедрасының аға оқытушысы, Шәкәрім университеті, Қазақстан; e-mail: kulushtaeva_89@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0067-9872

Information about the authors

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.

Zarina Vladimirovna Kapshakbayeva– PhD, Associate Professor, Department of Biotechnology, Toraighyrov University, Pavlodar, Kazakhstan; e-mail: z.k.87@mail.ru. ORCID: http://orcid.org/0000-0001-7989-5270.

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.

Zhibek Manapovna Atambayeva – Senior Lecturer of the Department of «Food Technology», Shakarim University, Kazakhstan; e-mail: zh.atambayeva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7899-870X.

Botakoz Manarbekovna Kulushtaeva – PhD, Senior Lecturer 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 26.01.2026
Поступила после доработки 02.03.2026
Принята к публикации 03.03.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-53

ҒТАХР: 65.09.05

CC BY 4.0
Check for updates

И.Р. Садырбаева[1], Б.М. Хамитова[1]*, М.Ә. Тұрлыбек[1], И.А. Махатова[1], А.К. Игенбаев[2]
[1]М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті,
160012, Қазақстан Республикасы, Шымкент қ., Тауке хан даңғылы, 5
[2]С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті,
010011, Қазақстан Республикасы, Астана қ., Жеңіс даңғылы, 62
*e-mail: barno-007@mail.ru

БАЙЫТЫЛҒАН СҮЗБЕ ӨНІМДЕРІ ӨНДІРІСІНДЕ ЖЕРГІЛІКТІ ӨСІМДІК ШИКІЗАТЫН ПАЙДАЛАНУ

Аңдатпа: *Сүт өнімдерінің отандық нарығы қазіргі уақытта барлық сегменттер бойынша қатаң бәсекелестік жағдайымен сипатталады. Мұндай жағдайда өнім ассортиментін кеңейту, жаңа технологияларды енгізу және тұтынушылардың сұранысына жауап беретін функционалдық тағам өнімдерін өндіру ерекше маңызға ие. Жоғары бәсекеге қабілетті ортада жаңа өнімді тиімді түрде*

©И.Р. Садырбаева, Б.М. Хамитова, М.Ә. Тұрлыбек, И.А. Махатова, А.К. Игенбаев

таныстыру және оны ұқсас тауарлар арасында дұрыс позициялау өндірушілер үшін стратегиялық міндет болып табылады. Осыған байланысты зерттеу жұмысында нарықта ұсынылған ұқсас өнімдермен салыстыра отырып, байытылған сүзбе өнімі пудингінің тұтынушылық ұстанымын айқындау көзделді.

Аталған ғылыми-зерттеу жұмысы пудинг түріндегі сүзбе өнімін өндіру үшін жергілікті өсімдік тектес шикізатты пайдалану мүмкіндіктерін зерттеуге арналған. Зерттеу барысында өсімдік ингредиенттерін қолдану арқылы сүзбе сарысуы негізінде өндірілетін пудингтің компоненттік құрамы анықталып, оның технологиялық параметрлері мен өндіріс режимдері әзірленді. Технологиялық процесті оңтайландыру мақсатында бірқатар эксперименттік зерттеулер жүргізіліп, шикізаттың физика-химиялық қасиеттері мен олардың дайын өнімнің сапалық көрсеткіштеріне әсері жан-жақты бағаланды.

Дайын сүзбе өнімі пудингіне қолданыстағы нормативтік құжаттарға сәйкес кешенді зерттеулер жүргізілді. Зерттеу нәтижесінде өнімнің органолептикалық, физика-химиялық және құрылымдық-механикалық көрсеткіштері анықталып, оның тағамдық құндылығы, сақтау тұрақтылығы және тұтынушылық қасиеттері бағаланды. Алынған нәтижелер әзірленген өнімнің функционалдық бағыттылығын, қауіпсіздігін және сүт өнімдері нарығында бәсекеге қабілетті екенін көрсетеді.

Түйін сөздер: *сүзбе өнімдері, пудинг, байытылған, қызғылт родиола, тағамдық талшықтар, бидай және жүгері крахмалы, тұрақтандырғыштар*

Кіріспе

Қазіргі таңда біздің елімізде және шетелдерде технологиялық процестерді жетілдіруге және диеталық тағамдардың ассортиментін кеңейтуге көп көңіл бөлінеді. Барлық қажетті қоректік заттарға қажеттілікті қанағаттандыратын берілген қасиеттері бар тамақ өнімдерін жасау АӨК-нің қайта өңдеу салаларындағы ғылыми ізденістердің басым бағыты болып табылады [1].

Адамдардың тамақтануын ұйымдастыруда сүт және сүт өнімдері маңызды рөл атқарады, бұл олардың биологиялық және тағамдық құндылығына байланысты [2]. Сүт өнімдерінің жоғары тағамдық құндылығы-олардың құрамында адам ағзасына қажетті заттар оңтайлы теңдестірілген қатынаста және оңай сіңетін түрде болады [3]. Қазіргі уақытта адам ағзасына пайдалы заттардың (тағамдық талшықтар, дәрумендер, минералдар, полиқанықпаған май қышқылдары, антиоксиданттар, олигосахаридтер, микроэлементтер) түсуін қамтамасыз ететін, сондай-ақ әртүрлі аурулардың алдын алатын өнімдерді жасау бағытында зерттеулер қарқынды жүргізілуде [4].

Қазіргі заманғы сүт өндірісі жағдайында сүт десерттерінің ассортиментін кеңейтумен қатар, олардың тағамдық құндылығын арттыруға, бірінші кезекте сүттің барлық құрамдас бөліктерін барынша шоғырландыра отырып, десерт алуға баса назар аударылады [5]. Перспективалық бағыт құрамына әртүрлі дәмдік компоненттерді енгізу есебінен жаңа ерекше органолептикалық сипаттамалары бар өнімдерді әзірлеу және шығару болып табылады [6]. Қазақстандық тұтынушылар үшін сүт десертінің ең перспективалы түрлерінің бірі сүт пудингтері болуы мүмкін. Өздерінің нәзік консистенциясының арқасында олар шырышты қабықтарға, сүйектердің өсуі мен қалпына келуіне, темір тасымалдауға және эритроциттер өніміне пайдалы. Олар жақсы зат алмасуға ықпал етеді, тәбетті қоздырады [7]. Сондай-ақ, бұл өнім қан айналымын жақсартады, тіндердің регенерациясына ықпал етеді. Сүт пудингі диеталық тамақтану, балалардың, қарттардың және ас қорыту жүйесі нашар пациенттердің диетасы үшін оңтайлы нұсқа болып табылады. Қазақстанда десерт өндірісінің осы сегментін талдай отырып, десерттердің осы тобы бүгінде барынша тар ассортиментте ұсынылған және кеңейтуді және мұқият пысықтауды қажет етеді деген қорытынды жасауға болады [8].

Сүзбе өнімдеріне деген кең сұраныс олардың жоғары дәмдік қасиеттеріне және тағамның химиялық құрамын тамақтану ғылымының заманауи талаптарына сәйкес реттеу мүмкіндігіне байланысты [9, 14]. Сүзбе өнімдерінің салыстырмалы жаңа түрлері - пудингтер, оларды жеміс-көкөніс толықтырғыштарымен байыту сапаның органолептикалық көрсеткіштерін (түсі, дәмі және иісі) ғана арттырып қоймай, тағамдық құндылығын да арттырады [10]. Сүт және сүт өнімдерінің техникалық регламентіне сәйкес, енгізілген толтырғыштар сүт емес компоненттер деп аталады. Сүзбе өнімінің түріне байланысты рецептуралық құрамға сақтау процесінде оның қасиеттері мен тұрақтылығына әсер етуге қабілетті көптеген, химиялық табиғаты бойынша әртүрлі сүт емес компоненттер кіре алады. Негізгі шикізат қажетті механикалық және реологиялық қасиеттері бар өнімнің белгілі бір құрылымын қалыптастырады [11]. Сүтті емес компоненттер өздерінің реологиялық

қасиеттерін өзгертпей, пудингке эстетикалық көрініс беріп қана қоймай, өнімнің тағамдық құндылығын, оның құрылымын жақсартады, сақтау мерзімін ұзартады. Қазақстанның тұтыну нарығында сүзбе өнімдерінің үлкен ассортименті бар, бірақ байытылған сүзбе өнімдерінің ассортименті өте шектеулі [12].

Осылайша, ғылыми-зерттеу жұмысының мақсаты тағамдық дәмдік компоненттерді енгізу есебінен сүт пудингін өндіру технологиясын жетілдіру, сондай-ақ олардың дайын өнімнің тұтынушылық қасиеттеріне әсерін зерделеу болып табылады. Тамақ дәмі компоненттері бар пудинг өндірісінің технологиялық аспектілерін, шикізат пен дайын өнімнің органолептикалық, физикалық-химиялық көрсеткіштерін зерттеу бойынша зерттеулер М.Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университетінің азық-түлік өнімдерінің қаупсіздігі және технологиясы кафедрасының сүт және сүт өнімдерінің сапасын бақылау оқу зертханасында жүргізілді.

Материалдар мен зерттеу әдістері

Зерттеу нысаны тұтқырлығы төмен өсімдік толтырғышы, сүзбе сарысуы, кілегей, түйіршіктелген қант және майсыз құрғақ сүт болды. Сүзбе пудингін өндіруде сүтсіз ингредиенттердің негізгі мақсаты – оларды адам ағзасына қажетті барлық дәрумендермен, микро және макроэлементтермен байыту, ірімшік өнімінің органолептикалық қасиеттерін (дәмі, түсі, хош иісі) жақсарту, сондай-ақ тұрақтандырғыштарды қосу арқылы сүт шикізатын үнемдеу.

Сүзбе өнімдерінің барлық көрсеткіштері ҚР СТ 418-2013 Қазақстан Республикасы ұлттық стандарты бойынша бекітілген сүзбе өнімдері техникалық шарттары және «Сүт және сүт өнімдері» МЕМСТ 51917-2002 бойынша анықталады.

Қанық түсті тікелей сығылған жеміс шырындарынан қызқылт родиола тамырының тұнбасын қосу арқылы жасалған жеміс-қызғылт родиола сироптары (МЕМСТ 28499001) функционалдық қасиеттері бар сүт емес компоненттер ретінде пайдаланылды. Қызқылт родиола функционалды фармакологиялық қасиеттердің кең ауқымына ие [13]. Құрамында генсинозид гликозидтерінің болуына байланысты ол сергітетін әсер етеді, эндокриндік жүйені ынталандырады, организмдегі қажетті гормон деңгейін ұстап тұруға көмектеседі және өмірлік маңызды минералдардың, әсіресе фосфордың (287,9 мг/100г), магнийдің (139,5 мг/100г) және темірдің (2,13 мг/100г) бай көзі болып табылады. Қызғылт родиола - бағалы дәрілік өсімдік, адаптогенді өсімдіктерге жатады. Родиола препараттары адамның ақыл-ой қабілетіне ынталандырушы әсер етеді, жады мен назарын жақсартады. Родиолдың ынталандырушы әсері бойынша аралиядан, лимонниктен, маральдің тамырынан, элеутерококктан асып түседі. Родиола Қазақстанда Батыс және Шығыс Алтай сияқты аймақтарда өседі.

Пудинг өндіру базалық рецептура бойынша жүзеге асырылды. Базалық рецептура 1-кестеде берілген.

Кесте 1 – Сүзбе өнімдері пудинг базалық рецептурасы

Шикізат атауы	Шикізат шығысының нормасы, %
Сүзбе сарысуы	27,0
Кілегей 10%	18,0
Қант	7,0
Күріш ұны	12,0
Жеміс шырындары	13,0
Өсімдік толықтырғыштары	9,0
Қызқылт родиола сиропы	3,0
Ашытқы	2,0
Тұрақтандырғыш (бидай және жүгері крахмалы)	6,0
Тағамдық талшықтар	3,0
Барлығы	100

Тұрақтандырғыштарды пудинг рецептерінде сүт емес компоненттер ретінде пайдалану қажетті консистенцияны қамтамасыз етеді, ақауларды жояды, шығындарды азайтады, сүт шикізатының майлылығын азайта отырып, өнімнің органолептикалық қасиеттерін сақтайды, дайын өнімнің сапасын жақсартады, дайын өнімнің өнімділігін арттыруға көмектеседі, шикізаттың құнын төмендетеді және нәтижесінде пайданы арттырады [14].

Тұрақтандыру жүйесін таңдаған кезде оның физика-химиялық қасиеттері, органолептикалық қасиеттері, ортаның pH мәні, компоненттердің өзара әрекеттесуі,

қауіпсіздігі, құны және пайдаланудың қарапайымдылығы ескеріледі [15, 16]. Сүзбе өнімі пудинг әзірлеуде модифицирленген крахмалдарды тұрақтандырғыш ретінде пайдалану мүмкіндігін зерттелінді.

Сүзбе өнімдерінің тәжірибелік үлгілерін өндіру үшін крахмалдың екі түрі таңдалды: 9187-042-00334-735-98 ТШ бойынша өндірілген – тотыққан бидай крахмалы және тотыққан жүгері крахмалы,. Бұл крахмалдардың жақсы гель түзу қабілетіне ие және айтарлықтай күшті гельдер түзеді. Крахмалдардың органолептикалық және физикалық қасиеттері 2-кестеде келтірілген.

Кесте 2 – Модифицирленген крахмалдардың органолептикалық және физикалық қасиеттері

Көрсеткіштері	ТШ бойынша		Зерттелінген нақты	
	тотыққан бидай крахмалы	тотыққан жүгері крахмалы	тотыққан бидай крахмалы	тотыққан жүгері крахмалы
Сыртқы түрі	Біртекті ұнтақ			
Түсі	Ақ сұрғылт түсті			
Иісі	Крахмалға тән бөтен иіссіз			
Ылғалдың массалық үлесі, % кем емес	21	15	17	13
Қышқылдық – ерітінді шығыны 100г құрғақ затты бейтараптандыруға 0,1 моль/дм^3 (0,1) концентрациясымен NaOH, см^3, кем емес	17	24	13	21
60^{0}Стағы су клейстерінің шартты тұтқырлығы, 8% көп емес	35	35	21	19
Желетүзгіш қабілетінің сынамасы	қанағаттанарлық		қанағаттанарлық	
Крахмал-қант сілікпесінің беріктігі, г, кем емес	1000	1000	1290	1170

Сүзбе өнімі пудинг әзірлеу келесі технология бойынша жүргізілді: дайындалған сүзбе сарысуына кілегей, жеміс шырыны және жеміс-родиол сироптары қосылды (толықтырғыш ретінде 70:30 және 30:70 салмақтық арақатынастағы шие, мүкжидек, қара қарақат шырындарының комбинациясы таңдалды), араластырып, содан кейін 40^{0}С-қа дейін қыздырылған қоспаға құрғақ заттарды қосып, 55^{0}С-қа дейін қыздырылды және диспергирлеуді 3000 айн/мин РПА-25/20К5-15/2 диспергаторында 5 мин бойы жүргізілді, содан кейін қоспасы 90^{0}С температурада 1 минут пастерленді, қоспасы 42^{0}С ашыту температурасына дейін салқындатылды, бидай және жүгері крахмалы, содан кейін алдымен йогурт ашытқысы қоспасы енгізілді, термостатта 1-1,5 сағат ашытылды, содан кейін пропион қышқылының бакконцентраты қосылды және 16 сағат бойы термостатта ашытуға қалдырылды.

Дайын сүзбе өнімі пудинге жалпылама қабылданған нормативтік құжаттарға сәйкес зерттеулер жүргізілді [17, 18]. Зерттеу нәтижесінде сүзбе өнімдері - пудинг физика-химиялық көрсеткіштері анықталды, өсімдік тектес шикізаттарды қосу арқылы сүзбе өнімдері дәрумендермен және тағамдық талшықтармен байытылды, өсімдіктектес шикізаттарды әртүрлі қатынаста қосып, оңтайлы мәні алынды.

Зерттеу нәтижелері және оларды талқылау

Өсімдік тектес шикізаттармен байытылған сүзбе өнімі пудинг тегіс консистенцияға, жағымды сүтті-жемісті дәмге, пішінін жақсы сақтауға және қосылған қызғылт родиола сиропына байланысты сарғыштан бозғылт қызғылтқа дейінгі түске ие болды. Ұсынылған ингредиенттердің үйлесімі пудингке жоғары органолептикалық қасиеттер мен функционалдық қасиеттер береді, зиянды әсерлердің сипатына қарамастан, ағзаның бейімделу және қорғаныш қасиеттерін арттырады, сондай-ақ витаминдер мен минеральды заттардың тапшылығын алдын алуға көмектеседі.

Сүзбе пудингінің органолептикалық көрсеткіштері - пішіндеу құрылғысының геометриясына, тұтыну ыдысының пішініне байланысты әртүрлі пішіндегі сыртқы түрі, сүзбе өнімінің пішіні бұзылмаған, дәмі мен иісі таза, ашытылған сүт, тәтті, енгізілген жеміс-қызғылт родиола сиропының айқын дәмі мен иісі бар, енгізілген жеміс-қызғылт родиола сиропының түсіне байланысты түс, консистенциясы біркелкі, нәзік, орташа тығыз, жұмсақ, сонымен қатар,

азған сүзбе кесектері бар. Сүзбе пудингінің органолептикалық және физика-химиялық көрсеткіштерін зерттеу нәтижелері 3-4 кестелерде келтірілен.

Кесте 3 – Сүзбе өнімі пудинг органолептикалық көрсеткіштері

№	Көрсеткіштер атауы	Өнімнің сипаттамасы
1	Сыртқы түрі	Сүзбе өнімінің пішіні бұзылмаған
2	Консистенциясы	Біркелкі, нәзік, орташа тығыз, жұмсақ
3	Дәмі мен иісі	Таза, ашытылған сүт, тәтті, енгізілген жеміс-қызғылт родиола сиропының айқын дәмі мен иісі бар
4	Түсі	Енгізілген жеміс-қызғылт родиола сиропының түсіне байланысты сарғыштан бозғылт қызғылтқа дейінгі түс

Кесте 4 – Сүзбе өнімі пудинг физика-химиялық көрсеткіштері

№	Көрсеткіштер атауы	Массалық үлесі, %
1	Ылғалдың массалық үлесі, %, кем емес	67±2
2	Майдың массалық үлесі, %, кем емес	7±0,2
3	Ақуыздың массалық үлесі, %, кем емес	9±0,1
4	Сахарозаның массалық үлесі, %, кем емес	14±0,01
5	Сорбин қышқылының массалық үлесі, %, кем емес	0,1
6	Титрлік қышқылдығы, ^{0}Т	170
7	Белсенді қышқылдығы, pH	4,5

Осылайша, жоғарыда айтылғандардың негізінде жүргізілген ғылыми-зерттеу жұмыстарының нәтижесінде өсімдік тектес шикізаттармен байытылған сүзбе өнімі пудингті тәжірибелік үлгілерін шығара отырып, компоненттік құрамы мен технологиялық процестерін өндірісітік апробацияға ұсынуға болады.

Қорытынды

Осылайша, біз дәстүрлі рецептураны едәуір жақсарта алдық және болашақта әлеуетті тауар өндіруші әзірленген өнімді өндіріске енгізе отырып, нарықта айтарлықтай мықты бәсекелестік позицияны иелене алады.

Технологиялық процесс режимдері сақталған кезде өсімдік толтырғышы бар пудинг өндірісі экологиялық таза және қауіпсіз болып табылады. Сүт десерттерін өндіру кезінде енгізілетін компоненттерді пайдалану олардың ассортиментін кеңейтуге, тағамдық және биологиялық құндылығын арттыруға және халықтың әртүрлі топтарының дәмдік қажеттіліктерін қанағаттандыруға мүмкіндік береді.

Әдебиеттер тізімі

1. Перспективное направление развития молочной промышленности Казахстана: получение и переработка молока мелкого рогатого скота / А.Б. Оспанов и др. // Ползуновский вестник. – 2021. – № 4. – С. 41-46.
2. Алимарданова М.К. Научно-практические основы производства национальных молочных продуктов: автореф. … д-ра техн. наук: 18.04. – Алматы, 2007. – 38 с.
3. Чаплинский В.В. Разработка технологии приготовления сухарного пудинга с шоколадно-кофейной добавкой / В.В. Чаплинский, А. Д. Тошев, Е.Д. Павлова // Известия ВУЗОВ. Пищевая технология. – 2012. – № 5-6. – С. 46-47.
4. Молочников В.В. Биотехнологические принципы производства лечебно-профилактических молочных продуктов на основе термодинамического фракционирования компонентов молока / В.В. Молочников // Прикладная биотехнология на пороге XXI века: материалы междунар. науч.-техн. конф. – М.: МГУПБ, 1995. – С. 172-174.
5. Ассортимент молочных десертов // Специализированный журнал «Продукты и прибыль» – 2006. – № 3(39). https://idbp.ru/index/products/pages/pip_3_39_2006_5. (дата обращения: 10.09. 2016).
6. Попкова Г.Ю. Творожные изделия и новые технологии / Г.Ю. Попкова, В.А. Могильный // Молоч. пром-сть. – 2008. – № 8. – С. 22-23.
7. Птичкина Н.М. Пудинг пониженной калорийности с пищевыми волокнами на основе вторичного молочного сырья – сыворотки / Н.М. Птичкина, А.В. Банникова, Е.А. Плеханова //

Актуальные проблемы инфекционной патологии и биотехнологии: материалы VI междунар. студенческой науч. конф. – Ульяновск: ГСХА им. П.А. Столыпина, 2013. – Ч.1. – С. 71-72.
8. Бессонова О.В. Исследование и разработка технологии низколактозного творожного продукта для детей школьного возраста: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.18.04 / Бессонова Ольга Витальевна. – Кемерово, 2009. – 18 с.
9. Мусина О.Н. Современные тенденции использования зерновых добавок в производстве молочных продуктов: монография / О.Н. Мусина, М.П. Щетинин, М.Н. Сахрынин. – Барнаул, 2004. – 339 с.
10. Вальтер Г.Ф. Технология творожных продуктов основе концентрированного молока: монография / Г.Ф. Вальтер, Н.Б. Гаврилова. – Омск: Изд-во «Полиснаб», 2011. – 116 с.
11. Абрамчук А.В. Дикорастущие травянистые растения / А.В. Абрамчук, В.Р. Лаптев. Екатеринбург, 2012. – 72 с.
12. Смольникова Ф.Х. Исследование и разработка технологии молочного десертного продукта для диетического питания: дис. канд. техн. наук / Смольникова Фарида Харисовна: 05.18.04. – Семипалатинск, 2002. – 145 с.
13. Гаврилова Н.Б. Использование амарантового масла в технологии кисломолочного продукта для функционального питания / Н.Б. Гаврилова, И. В. Рожкова, Н. Л. Чернопольская // Молочная промышленность. – 2015. – № 3. – С. 32-33.
14. Царегородцева С.Р. Разработка и исследование технологии производства кисломолочных десертов с продуктами переработки черной смородины и облепихи: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.18.04 / Царегородцева Светлана Ростиславовна. – Кемерово, 1999. – 17 с.
15. Иванова Т.Н., Новые виды пудингов творожных повышенной пищевой ценности / Т.Н. Иванова, А.И. Маричев, Е.Б. Гриминова // Молочная промышленность. – 2006. – № 10. – С. 57.
16. Кащеева Н.Л. Ферментированный продукт для функционального питания / Н.Л. Кащеева, Н.Б. Гаврилова // Молочная промышленность. – 2010. – № 1. – С. 67-68.
17. Степаненко П.П. Руководство к лабораторным занятиям по микробиологии молока и молочных продуктов / П.П. Степаненко. – М., 2005. – 653 с.
18. Мамаев А.В. Технология молока и молочных продуктов. Лабораторный практикум: Учебное пособие / А.В. Мамаев, Е.Ю. Сергеева, Н.Д. Родина. – СПб. Проспект Науки, 2016. – 224 с.

References

1. Perspektivnoe napravlenie razvitiya molochnoj promyshlennosti Kazahstana: poluchenie i pererabotka moloka melkogo rogatogo skota / A.B. Ospanov i dr. // Polzunovskij vestnik. – 2021. – № 4. – S. 41-46. (In Russian).
2. Alimardanova M.K. Nauchno-prakticheskie osnovy proizvodstva nacional'nyh molochnyh produktov: avtoref. … d-ra tehn. nauk: 18.04. – Almaty, 2007. – 38 s. (In Russian).
3. Chaplinskij V.V. Razrabotka tehnologii prigotovleniya suharnogo pudinga s shokoladno-kofejnoj dobavkoj / V.V. Chaplinskij, A. D. Toshev, E.D. Pavlova // Izvestiya VUZOV. Pishchevaya tehnologiya. – 2012. – № 5-6. – S. 46-47. (In Russian).
4. Molochnikov V.V. Biotehnologicheskie principy proizvodstva lechebno-profilakticheskih molochnyh produktov na osnove termodinamicheskogo frakcionirovaniya komponentov moloka / V.V. Molochnikov // Prikladnaya biotehnologiya na poroge XXI veka: materialy mezhdunar. nauch.-tehn. konf. – M.: MGUPB, 1995. – S. 172-174. (In Russian).
5. Assortiment molochnyh desertov // Specializirovannyj zhurnal «Produkty i pribyl'» – 2006. – № 3(39). https://idbp.ru/index/products/pages/pip_3_39_2006_5. (data obrashcheniya: 10.09. 2016). (In Russian).
6. Popkova G.YU. Tvorozhnye izdeliya i novye tehnologii / G.YU. Popkova, V.A. Mogil'nyj // Moloch. prom-st'. – 2008. – № 8. – S. 22-23. (In Russian).
7. Ptichkina N.M. Puding ponizhennoj kalorijnosti s pishchevymi voloknami na osnove vtorichnogo molochnogo syr'ya – syvorotki / N.M. Ptichkina, A.V. Bannikova, E.A. Plehanova // Aktual'nye problemy infekcionnoj patologii i biotehnologii: materialy VI mezhdunar. studencheskoj nauch. konf. – Ul'yanovsk: GSHA im. P.A. Stolypina, 2013. – CH.1. – S. 71-72. (In Russian).
8. Bessonova O.V. Issledovanie i razrabotka tehnologii nizkolaktoznogo tvorozhnogo produkta dlya detej shkol'nogo vozrasta: avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk: 05.18.04 / Bessonova Ol'ga Vital'evna. – Kemerovo, 2009. – 18 s. (In Russian).

9. Musina O.N. Sovremennye tendencii ispol'zovaniya zernovyh dobavok v proizvodstve molochnyh produktov: monografiya / O.N. Musina, M.P. Shchetinin, M.N. Sahrynin. – Barnaul, 2004. – 339 s. (In Russian).
10. Val'ter G.F. Tehnologiya tvorozhnyh produktov osnove koncentrirovannogo moloka: monografiya / G.F. Val'ter, N.B. Gavrilova. – Omsk: Izd-vo «PolisnaB», 2011. – 116 s. (In Russian).
11. Abramchuk A.V. Dikorastushchie travyanistye rasteniya / A.V. Abramchuk, V.R. Laptev. Ekaterinburg, 2012. – 72 s. (In Russian).
12. Smol'nikova F.H. Issledovanie i razrabotka tehnologii molochnogo desertnogo produkta dlya dieticheskogo pitaniya: dis. kand. tehn. nauk / Smol'nikova Farida Harisovna: 05.18.04. – Semipalatinsk, 2002. – 145 s. (In Russian).
13. Gavrilova N.B. Ispol'zovanie amarantovogo masla v tehnologii kislomolochnogo produkta dlya funkcional'nogo pitaniya / N.B. Gavrilova, I. V. Rozhkova, N. L. Chernopol'skaya // Molochnaya promyshlennost'. – 2015. – № 3. – S. 32-33. (In Russian).
14. Caregorodceva S.R. Razrabotka i issledovanie tehnologii proizvodstva kislomolochnyh desertov s produktami pererabotki chernoj smorodiny i oblepihi: avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk : 05.18.04 / Caregorodceva Svetlana Rostislavovna. – Kemerovo, 1999. – 17 s. (In Russian).
15. Ivanova T.N., Novye vidy pudingov tvorozhnyh povyshennoj pishchevoj cennosti / T.N. Ivanova, A.I. Marichev, E.B. Griminova // Molochnaya promyshlennost'. – 2006. – № 10. – S. 57. (In Russian).
16. Kashcheeva N.L. Fermentirovannyj produkt dlya funkcional'nogo pitaniya / N.L. Kashcheeva, N.B. Gavrilova // Molochnaya promyshlennost'. – 2010. – № 1. – S. 67-68. (In Russian).
17. Stepanenko P.P. Rukovodstvo k laboratornym zanyatiyam po mikrobiologii moloka i molochnyh produktov / P.P. Stepanenko. – M., 2005. – 653 s. (In Russian).
18. Mamaev A.V. Tehnologiya moloka i molochnyh produktov. Laboratornyj praktikum: Uchebnoe posobie / A.V. Mamaev, E.YU. Sergeeva, N.D. Rodina. – SPb. Prospekt Nauki, 2016. – 224 s. (In Russian).

И.Р. Садырбаева[1], Б.М. Хамитова[*], М.А. Турлыбек[1], И.А. Махатова[1], А.К. Игенбаев[2]
[1]Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова,
160012, Республика Казахстан, г.Шымкент, Тауке хана, 5
[2]Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина,
010011, Республика Казахстан, г. Астана, пр. Женис, 62
*e-mail: barno-007@mail.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕСТНОГО РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ ОБОГАЩЕННЫХ ТВОРОЖНЫХ ПРОДУКТОВ

Отечественный рынок молочной продукции в настоящее время характеризуется высокой конкуренцией во всех сегментах. В таких условиях особое значение приобретает расширение ассортимента, разработка новых технологий и производство функциональных продуктов питания, отвечающих современным требованиям потребителей. В условиях жёсткой конкурентной среды одной из ключевых задач является эффективное представление нового продукта и его корректное позиционирование среди аналогичной продукции. В связи с этим в данной работе определено потребительское позиционирование обогащённого творожного пудинга по сравнению с продуктами, представленными на рынке.

Настоящее научно-исследовательское исследование посвящено использованию местного растительного сырья при производстве творожного продукта в форме пудинга. В ходе работы был определён компонентный состав пудинга, изготовленного на основе творожной сыворотки с применением растительных ингредиентов, а также разработаны технологические параметры и режимы его производства. С целью оптимизации технологического процесса проведён комплекс экспериментальных исследований, в рамках которых изучено влияние физико-химических свойств сырья на качество и стабильность готового продукта.

Готовый творожный пудинг был исследован в соответствии с действующими нормативными документами. В результате определены его органолептические, физико-химические и структурно-механические показатели, а также дана оценка пищевой ценности, сроков хранения и потребительских свойств. Полученные данные подтверждают функциональную направленность разработанного продукта и его конкурентоспособность на рынке молочной продукции.

Ключевые слова: *творожный продукт, пудинг, обогащение, родиола розовая, пищевые волокна, пшеничный и кукурузный крахмал, стабилизаторы.*

I.R. Sadyrbayeva[1], B.M. Khamitova[1]*, M.A. Turlybek[1], I.A. Makhatova[1], A.K. Igenbaev[2]
[1]M. Auezov South Kazakhstan University,
160012, Republic of Kazakhstan, Shymkent, Tauke Khan, 5
[2]S. Seifullin Kazakh Agro Technical Research University,
010011, Republic of Kazakhstan, Astana, Zhenis avenue, 62
*e-mail: barno-007@mail.ru

USE OF LOCAL VEGETABLE RAW MATERIALS IN THE PRODUCTION OF ENRICHED CHEESE PRODUCTS

The domestic dairy market is currently characterized by intense competition across all segments. Under these conditions, expanding the product range, developing innovative technologies, and producing functional foods that meet modern consumer demands are of particular importance. In a highly competitive environment, effective presentation of a new product and its proper positioning among similar products represent key strategic objectives. Therefore, this study aims to determine the consumer positioning of an enriched curd-based pudding in comparison with analogous products available on the market.

This research is devoted to exploring the possibilities of using locally sourced plant-based raw materials in the production of a curd pudding product. During the study, the component composition of a pudding produced on the basis of curd whey with the incorporation of plant ingredients was determined, and the technological parameters and processing regimes were developed. A series of experimental studies was carried out to optimize the technological process, focusing on the assessment of the influence of physicochemical properties of raw materials on the quality and stability of the finished product.

Comprehensive analyses of the finished curd pudding were conducted in accordance with applicable regulatory standards. As a result, its organoleptic, physicochemical, and structural-mechanical properties were determined, and its nutritional value, shelf-life stability, and consumer characteristics were evaluated. The obtained results demonstrate the functional orientation, safety, and competitiveness of the developed product in the dairy market.

Key words: *curd, pudding, fortification, rhodiola rosea, dietary fiber, wheat and corn starch, stabilizers.*

Сведения об авторах

Индира Рустембековна Садырбаева – магистр, старший преподаватель, Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова, Республика Казахстан, Шымкент; e-mail: indirasadyrbaeva76@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-7020-3435.

Барна Махаматовна Хамитова* – кандидат технических наук, ассоциированный профессор, Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова, Республика Казахстан, Шымкент; e-mail: barno-007@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8377-3938.

Мадина Абдинабиевна Турлыбек – докторант кафедры «Технология и безопасность продовольственных продуктов», Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова, Республика Казахстан, Шымкент; e-mail: madinaturlibek99@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-4069-6308.

Индира Абаихановна Махатова – кандидат сельскохозяйственных наук, Южно-Казахстанский университет имени М. Ауэзова, Республика Казахстан, Шымкент; e-mail: indiram@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-5441-9870.

Айдын Каирбекович Игенбаев – PhD, асс.профессор группы образовательных групп «Производство продуктов питания», Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Республика Казахстан, Астана; e-mail: aidyn_mamyt@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9903-2912.

Авторлар туралы мәліметтер

Индира Рустембековна Садырбаева – «Азық-түлік өнімдерінің қаупсіздігі және технологиясы» кафедрасының аға оқытушысы, магистр, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Қазақстан Республикасы, Шымкент; e-mail: indirasadyrbaeva76@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-7020-3435.

Барна Махаматовна Хамитова* – техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор; М. Әуезов атындағы Оңтүстік-Қазақстан университеті, Қазақстан Республикасы, Шымкент; e-mail: barno-007@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8377-3938.

Мәдина Әбдінәбиқызы Тұрлыбек – «Азық-түлік өнімдерінің қаупсіздігі және технологиясы» кафедрасының докторанты, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Қазақстан Республикасы, Шымкент; e-mail: madinaturlibek99@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-4069-6308.

Индира Абайханқызы Махатова – ауыл шаруашылық ғылымдарының кандидаты, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Қазақстан Республикасы, Шымкент; e-mail: indiram@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-5441-9870.

Айдын Каирбекович Игенбаев – PhD, «Азық-түлік өнімдерінің өндірісі» білім беру бағдарламалар тобының қауымдастырылған профессор, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Қазақстан Республикасы, Астана; e-mail: aidyn_mamyt@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9903-2912.

Information about the authors

Indira Sadyrbayeva – Master, Senior Lecturer of the Department of Technology and safety of food products, M. Auezov South Kazakhstan University, Republic of Kazakhstan, Shymkent; e-mail: indirasadyrbaeva76@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-7020-3435.

Barna Khamitova* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; M.Auezov South Kazakhstan University, Republic of Kazakhstan, Shymkent; e-mail: barno-007@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8377-3938.

Madina Turlybek – Doctoral student of the Department of Technology and safety of food products, M. Auezov South Kazakhstan University, Republic of Kazakhstan, Shymkent; e-mail: madinaturlibek99@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-4069-6308.

Indira Makhatova – Candidate of Agricultural Sciences, M. Auezov South Kazakhstan University, Republic of Kazakhstan, Shymkent; e-mail: indiram@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-5441-9870.

Aidyn Igenbayev – PhD, ass. professor Food Production Educational Program Group; Kazakh Agrotechnical research university named after S. Seifullin, Republic of Kazakhstan, Astana; e-mail: aidyn_mamyt@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9903-2912.

Редакцияға енуі 08.01.2026
Өңдеуден кейін түсуі 11.03.2026
Жариялауға қабылданды 11.03.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-54

МРНТИ: 65.59.03

CC BY 4.0
Check for updates

A.M. Tayeva[1]*, Zh. Kalibekkyzy[2], A.Kh. Beisembaeva[1], N.K. Abilmazhinova[1], M.A. Absalimova[1]

[1]Almaty Technological University,
050012, Republic of Kazakhstan, Almaty, 100 Tole Bi Street
[2]Shakarim University,
071400, Republic of Kazakhstan, Semey, 20A Glinka 20A
*e-mail: aigul.taeva@gmail.com

STUDY OF PHYSICAL, CHEMICAL AND MICROBIOLOGICAL INDICATORS OF HAM FROM THE MEAT OF CULLED COWS, ENRICHED WITH SELENIUM AND ZINC

Abstract: *The effective utilisation of meat from culled cows presents a significant technical challenge for the meat industry due to the variability of its functional and processing properties. The aim of this study was to evaluate the combined effect of the probiotic culture Lactobacillus sakei and fortification with the trace elements selenium (Se) and zinc (Zn) on the quality, oxidative stability and microbiological safety of meat products made from culled cows. The effect of Lactobacillus sakei in combination with a 50% reduction in sodium nitrite levels on the microbiological parameters of raw meat during maturation was investigated. The use of L. sakei significantly reduced the total microbial count (from 6.4 to 5.6 log CFU/g) and inhibited the growth of spoilage-causing microorganisms, including Enterobacteriaceae, Pseudomonas spp. and Brochothrix thermosphacta. Pathogenic microorganisms (Escherichia coli, Staphylococcus aureus, Listeria monocytogenes and Salmonella spp.) were not detected. Samples of meat products containing L. Sakei and enriched with L-selenomethionine (0.525 mg/kg) and zinc citrate (150 mg/kg) were examined for their physicochemical and organoleptic properties. The peroxide value was assessed whilst the samples were stored in a refrigerator (4 °C, 30 days). Enrichment with micronutrients reduced lipid oxidation: after 30 days, the peroxide values were lower than in the control samples. The pH values (5.76-5.82) and water activity (0.958-0.962) remained stable, whilst water-holding capacity increased by 4% in the experimental samples. Sensory evaluation showed comparable quality between the control and experimental samples in terms of color, taste and appearance, whilst the texture and tenderness of the experimental samples were improved.*

©A.M. Tayeva, Zh. Kalibekkyzy, A.Kh. Beisembaeva, N.K. Abilmazhinova, 2026

The results demonstrate that the combined use of Lactobacillus sakei and micronutrient fortification (Se and Zn) can improve the oxidative stability and processing properties of meat products made from culled cows, whilst maintaining microbiological safety and sensory quality.

Key words: *Lactobacillus Sakei, selenium, zinc, peroxide value, water-holding capacity, microbiological safety.*

Introduction

The processing of meat from culled cows into ham-type products is one of the most promising areas for improving the efficiency of raw material use in the meat industry. This raw material is characterized by variability in its functional and technological properties, which requires the use of technological and biotechnological solutions to stabilize the structure, increase yield and ensure the microbiological safety of finished products.

The mineral composition of beef has been extensively described from a nutritional perspective; however, trace elements also play a crucial role in determining meat quality through their involvement in redox processes [1].

An imbalance of trace elements adversely affects the health status and productive performance of farm animals. Insufficient dietary intake of essential trace elements contributes to the development of various metabolic disorders and pathological conditions [2].

Fortification of meat products with essential trace elements (Se, Zn) is considered an approach to increasing nutritional value. In this case, the indicators of oxidative stability of the lipid phase and sanitary and microbiological safety criteria are technologically significant. Lactic acid bacteria, including Lactobacillus Sakei, are described as promising bioprotective cultures for meat products and are capable of suppressing undesirable microflora under refrigerated storage conditions [3].

Lactobacillus Sakei is capable of colonizing many different habitats. It is often isolated from plant-based products such as various types of flour, sourdough starters, or fermented cabbage, but it is systematically associated with meat products and often with seafood [4].

For ham-type products, lipid oxidation and microbiological stability are critical during storage; recent reviews on lipid oxidation in meat and meat products justify the need to monitor primary oxidation products (including peroxide value) [5]. The use of protective cultures is considered an effective approach to improving the microbiological stability of meat products without the use of additional preservatives [6].

The novelty of this study lies in the fact that, for the first time, ham produced from culled cows was evaluated as part of a comparative study involving two enrichment variants (Se and Zn) under identical biotechnological conditions – the use of Lactobacillus sakei during the curing and maturation stages. A comprehensive evaluation was carried out, including oxidative stability (peroxide value), physicochemical parameters (water-holding capacity, water activity and pH), and organoleptic parameters in the finished products, and the effect of Lactobacillus sakei on microbiological parameters in the raw material was investigated. Despite the relevance of the research, there is little information and few experiments in the literature describing the use of the bio-protective culture Lactobacillus sakei in beef from culled cows, used to produce meat products enriched with minerals. The results obtained provide a scientific basis for the use of Lactobacillus sakei in combination with micronutrient fortification to improve the stability, quality and safety of ham produced from raw materials with reduced processing suitability.

Materials and methods

The study involved two groups of samples. The first group comprised control samples (100% $NaNO_2$) and test samples (L. sakei – 0.01% + $NaNO_2$ – 50%) intended for analyzing the effect of Lactobacillus sakei on the microbiological parameters of the raw material. The effect of the bio-protective culture Lactobacillus sakei on the microbiological indicators of meat samples from culled cows (NMAFAM, coliforms/E. coli, Listeria monocytogenes, Staphylococcus aureus, sulphite-reducing clostridia) was analysed after the maturation stage.

The second group of samples comprised control samples (Control + L. sakei) and test samples (L. sakei + Se, L. sakei + Zn), intended for the investigation of the physicochemical and organoleptic properties of the finished product. The samples were prepared in accordance with the method described in [7]. Fortification was carried out during the mince preparation stage by adding trace elements to the mince. Selenium was added in the form of L-selenomethionine (an organic

form of selenium) at a dose of 0.525 mg per 1 kg of raw material, and zinc in the form of zinc citrate (an organic zinc salt) at a dose of 150 mg per 1 kg of raw material.

Some of the samples were vacuum-packed and stored in a refrigerator at 4 °C for 30 days at a relative humidity of 85%, to determine the peroxide value on days 0, 20 and 30. At each time point, samples were collected aseptically from the packaged products and analyzed according to the respective standard methods. The second set of samples was examined for physicochemical and organoleptic parameters immediately after preparation. Test conditions were: temperature 21°C, relative humidity 64%.

The following methods were used in the study:

– Microbiological indicators in control and test samples of meat raw materials were determined in accordance with GOST 10444.15-94 (NMAFAM), GOST 31747-2012 (Escherichia coli group bacteria), GOST 32031-2012 (Listeria monocytogenes), GOST 31746-2012 (Staphylococcus aureus), GOST 8558.1-2015 (Residual sodium nitrite), GOST ISO 15214-2013 (Lactic acid bacteria (LAB), GOST ISO 21528-2-2013 (Enterobacteriaceae), GOST ISO 13720-2013 (Pseudomonas spp.), ISO 13722:2017 (Brochothrix thermosphacta), ISO 6579-1:2017 (Salmonella spp.) [8].

– The peroxide value of fat was determined in accordance with GOST 34118-2017 [9]. Determined using a spectrophotometric method based on the oxidation of hydroperoxides with Fe^{2+} ions to Fe^{3+}. Fe^{3+} interacted with thiocyanate (SCN^-), forming a colored complex, the intensity of which was measured at a wavelength of 507 nm. Experimental samples were analyzed at predefined storage times: day 0, day 20, and day 30 for peroxide value;

– The pH of the control and test samples of the finished products was determined using the potentiometric method in accordance with GOST R 51478-99 [10]. The method is based on measuring the difference in electrical potential between a glass electrode and a reference electrode placed in the product sample. The ham sample was first minced by passing it through a mincer twice, after which it was thoroughly mixed. A sample quantity sufficient for immersing the electrodes was taken for analysis. The pH meter was pre-calibrated using a buffer solution with a known pH value at a temperature of (20 ± 2)°C. The electrodes were inserted into the prepared sample and measurements were taken until stable readings were obtained. The pH value was recorded with an accuracy of ±0.05 units. Three parallel measurements were carried out on each sample, after which the arithmetic mean was calculated and taken as the final result.

– The water activity (aw) in the control and test samples of the finished products was determined in accordance with the requirements of GOST R ISO 21807-2012 [11]. The method is based on measuring the equilibrium water vapor pressure above the product sample in a closed measuring chamber using a water activity analyzer. Prior to measurement, the instrument was calibrated using standard salt solutions with known water activity values. Sample preparation was carried out without homogenization to avoid heating and moisture loss. The sample was placed in the instrument's measuring chamber, maintaining a constant temperature of 25 °C. The water activity value was determined after equilibrium had been established between the water vapor of the sample and the chamber atmosphere. Measurements were taken both on the surface and within the bulk of the product to account for a possible water activity gradient.

– Water-holding capacity was determined using the Vartanyan method [12]. The method is based on pressing a weighed sample between filter papers under a standardized load and measuring the amount of water released. A representative sample (approximately 0.3 g of minced meat) was accurately weighed. The sample was placed in the center of a pre-weighed filter paper and covered with a second filter paper. The assembly was positioned between two glass plates. A standardized load (typically 1 kg) was applied for 10 minutes at room temperature. After pressing, the sample was removed. The filter paper with the absorbed moisture was weighed to determine mass loss. Water-holding capacity (WHC) was determined by the Vartanyan pressing method and calculated as:

$$\text{WHC}\ (\%) = \frac{\text{m1}}{\text{m0}} * 100$$

m_0 – sample mass before pressing (g);

m_1– sample mass after pressing (g).

The mass loss during pressing ($m_0 - m_1$) corresponds to the released moisture.

– The organoleptic evaluation of the control and experimental samples of the finished products was carried out in accordance with the requirements of GOST 9959:2015 [13]. The evaluation was performed by a tasting panel comprising at least five specialists with experience in assessing meat products. The tasting was conducted in a specially equipped room free from extraneous odors at an air temperature of (20 ± 2)°C and relative humidity of (70 ± 5)%, under uniform lighting of at least 500 lux. Prior to analysis, product samples were coded with three-digit numbers and served at a temperature corresponding to their intended consumption conditions. The assessment was carried out individually by each taster, with the results recorded on tasting sheets. Organoleptic characteristics were first determined on the whole product, then on a cross-section. The following characteristics were assessed in sequence: appearance, color, smell (aroma), taste, texture and tenderness of the product.

Appearance and color were assessed visually; odor was assessed on the surface of the product and, where necessary, deeper inside using a metal needle. Texture was assessed by pressing and chewing the sample, whilst taste and aroma were assessed by tasting slices of the product. Quality was assessed on a 5-point scale, where 5 points corresponded to excellent quality, 4 to good, 3 to satisfactory, 2 to unsatisfactory and 1 to very poor quality. The final score was calculated as the average of the scores across all indicators. The study complied with the ethical principles for research involving human participants outlined in the Declaration of Helsinki [14].

All measurements were performed in triplicate. Results are presented as mean ± SD, where SD denotes the standard deviation. Means within groups were compared using one-way analysis of variance, followed by Duncan's multiple range test ($p < 0.05$). Statistical analyses were performed using SPSS software (version 24.0; SPSS Inc., Chicago, IL, USA).

Results and Discussion

In the first stage of the experiment, the effect of the Lactobacillus sakei probiotic culture on the microbiological parameters of meat samples from culled cows was investigated.

The Lactobacillus sakei probiotic culture was added to the experimental beef samples (meat from older animals) for maturation at a temperature of +4°C for 18 hours. Sodium nitrite was added to the control samples in accordance with GOST 8558-2015 «Sodium Nitrite. Specifications» [15]. For the experimental samples, a reduced dosage (50% $NaNO_2$) was used, with the active L. sakei culture added simultaneously at a concentration of 0.01%.

Table 1 – Microbiological parameters of raw materials following ripening using L. sakei

№	Parameter	Unit	Control (100% $NaNO_2$)	Experiment (L. sakei – 0.01% + $NaNO_2$ – 50%)
1	NMAFAM	log CFU/g	6,4 ± 0,2	5,6 ± 0,1 ↓
2	Lactic acid bacteria (LAB)	log CFU/g	4,0 ± 0,3	6,3 ± 0,2 ↑
3	Enterobacteriaceae	log CFU/g	3,2 ± 0,3	1,8 ± 0,2 ↓
4	Pseudomonas spp.	log CFU/g	2,9 ± 0,4	1,6 ± 0,2 ↓
5	Brochothrix thermosphacta	log CFU/g	2,4 ± 0,3	1,4 ± 0,2 ↓
6	Escherichia coli (БГКП)	CFU/g	< 10^2	< 10
7	Staphylococcus aureus	CFU/g	< 10^2	< 10
8	Listeria monocytogenes	in 25 g	Not found	Not found
9	Salmonella spp.	in 25 г	Not found	Not found
10	Residual sodium nitrite	mg/kg	52,2 ± 4	25,5 ± 3 ↓

The results of the study of the microbiological parameters of the raw material after ripening, following a 50% reduction in the sodium nitrite dose and the use of Lactobacillus sakei, showed a statistically significant reduction ($p < 0.05$) in the total microbial count (CFU/g) in the experimental batch from 6.4 ± 0.2 to 5.6 ± 0.1 log CFU/g. This indicates a pronounced antagonistic effect of L. sakei on the level of microbiological spoilage. The growth of lactic acid bacteria reached 6.3 ± 0.2 log CFU/g, indicating the active development of the introduced L. sakei and its ability to dominate the meat microbiocenosis under conditions of moderate pH, ranging from 6.0 to 6.3 [16].

The number of bacteria of the Enterobacteriaceae family decreased by more than 1.5 log (from 3.2 to 1.8 log CFU/g), confirming the inhibitory effect of LAB due to competition for nutrient substrates and the formation of organic acids. A similar trend was observed for Pseudomonas spp. and Brochothrix thermosphacta, with a reduction in their numbers of 1.3 and 1.0 log, respectively. These microorganisms are known to be the primary causes of spoilage in chilled meat; therefore,

their suppression is an important indicator of microbiological stability [17]. No Escherichia coli, Staphylococcus aureus, Listeria monocytogenes or Salmonella spp. were detected in either sample.

In the experimental samples, the residual sodium nitrite content fell to 21 ± 3 mg/kg, whereas in the control sample it was 42 ± 4 mg/kg, and the amount of $NaNO_2$ was reduced by a factor of two. This is explained by the nitrite-reducing activity of L. sakei and the enzymatic reduction of nitrite to nitrosamines, which contribute to colour stabilisation. This is confirmed by the results of the organoleptic evaluation of the finished meat products, where the colour score of the experimental samples was rated on a par with the control. The data obtained are consistent with the results of Wang X.H. et al. which describe a rapid decrease in residual nitrite during the fermentation of meat systems in the presence of lactic acid bacteria [18].

Thus, the use of Lactobacillus sakei culture, combined with a 50% reduction in the sodium nitrite dose, ensures the microbiological safety and stability of the raw materials during the maturation stage without increasing the risk of contamination.

In the next stage of the experiment, following the production of the finished products in accordance with the method described in [7], the control sample (Control + L. sakei) and the test samples (L. sakei + Se, L. sakei + Zn) were analysed for their physicochemical and organoleptic properties.

The control samples did not contain any trace element additives. The meat products were heat-treated to a core temperature of ≥ 70 °C and subsequently smoked.

To characterize the oxidative stability of ham during storage, the peroxide value of fat in control and experimental samples (with Se and Zn) was determined on days 0, 20, and 30. The values obtained were used to compare the dynamics of the accumulation of primary oxidation products (Table 2).

Таблица 2 – Dynamics of the peroxide value of fat during storage

Storage period	Indicator, unit of measurement	Control + L. sakei	L. sakei + Se	L. sakei + Zn
0	Peroxide value (mmol O_2/kg fat)	0,64a ± 0,05	0,55b ± 0,05	0,52b ± 0,05
20	Peroxide value (mmol O_2/kg fat)	0,89a ± 0,07	0,72b ± 0,06	0,68c ± 0,05
30	Peroxide value (mmol O_2/kg fat)	1,25a ± 0,09	0,98b ± 0,08	0,93b ± 0,07

values are shown as mean ± SD; letters (a–c) represent significant differences at $p < 0.05$.

Table 2 shows a reduction in the peroxide value (PV) in the test samples, reflecting the antioxidant effect of L-selenomethionine and zinc citrate, which inhibit both primary and secondary lipid peroxidation.

The indicators of lipid peroxidation demonstrate a pronounced antioxidant effect of micronutrient fortification. In the control samples, the peroxide value (PV) was 0.64 ± 0.05 mmol O_2/kg fat, corresponding to a moderate level of primary oxidation products. Upon the addition of L-selenomethionine and zinc citrate, the PV decreased to 0.52–0.55 mmol O_2/kg. This indicates the inhibition of lipid hydroperoxide formation due to the activation of enzymatic antioxidant systems, in particular glutathione peroxidase (Se-dependent) and superoxide dismutase (Zn-dependent) [19].

An increase in PO_2 values was observed during storage, which may be linked to the development of lipid oxidation processes. However, in all fortified samples, this increase occurred at a significantly slower rate than in the control samples. After 30 days of storage, the PO_2 value in the control reached 1.25 mmol O_2/kg, whereas in the samples containing L-selenomethionine and zinc citrate, it was 21% and 26% lower, respectively.

Similar results were also reported in studies by Abilmazhinova N. et al., where a decrease in the peroxide value was observed in the experimental samples during the storage of semi-finished meat products [20].

To evaluate the technological properties, microbiological stability and shelf life of the meat product, the water-holding capacity (WHC), pH and water activity were determined in the control and experimental samples (containing Se and Zn). The results are presented in Table 3.

The fortification of meat products with Se (L-selenomethionine) and Zn (zinc citrate) had no significant effect on the pH value, which ranged from 5.76 to 5.82 in all variants, indicating that optimal conditions for moisture binding and the stability of the protein-water system were maintained.

Water activity values (aW = 0.958-0.962) remained virtually unchanged, ensuring the microbiological stability of the product.

Table 3 – Determination of the physicochemical quality parameters of meat products fortified with trace elements

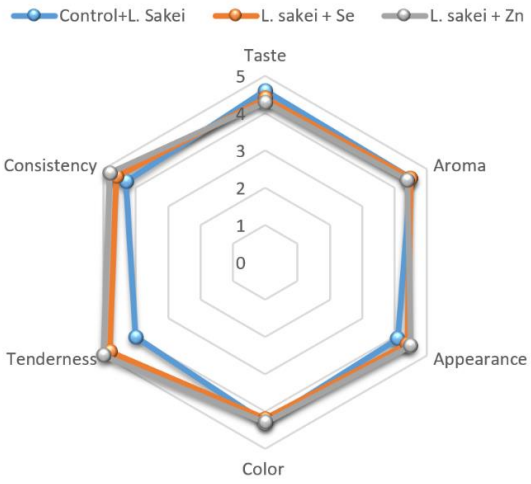
Indicator	Control + L. sakei	Test samples	
		L. sakei + Se	L. sakei + Zn
pH	5,78b ± 0,05	5,82a ± 0,04	5,76b ± 0,04
aw (water activity)	0,962a ± 0,005	0,958b ± 0,004	0,959b± 0,004
WHC, %	69,0c± 1,2	71,8a ± 1,1	70,9b ± 1,0

values are shown as mean ± SD; letters (a–c) represent significant differences at p < 0.05.

The results obtained are consistent with the findings of Arihara K., who noted that the addition of functional ingredients and trace elements to meat products generally does not lead to significant changes in pH and water activity when traditional production technology is maintained [21]. Similar conclusions are presented in the works of Pogorzelska-Nowicka E. et al., where no significant changes in pH and aW values were observed when meat products were enriched with biologically active components [22].

The most pronounced differences were observed in water-holding capacity (WHC): upon the addition of L-selenomethionine and zinc citrate, WHC increased by 2.7-4.0% relative to the control. This indicates an improvement in structural and mechanical properties and the formation of a denser protein-fat matrix due to the interaction of Se^{2-} and Zn^{2+} ions with the functional groups of proteins. A similar trend is described in the studies by Xu Y. and Xu X., who showed that the addition of mineral components and antioxidant compounds can enhance the interaction of metal ions with the functional groups of muscle tissue proteins, contributing to the formation of a more stable protein-fat matrix and an increase in the water-holding capacity of meat systems [23].

To complement the instrumental analysis, sensory evaluation was performed. The results are presented in Figure 1.



Figur 2 – Sensory evaluation of ham samples (5-point scale)

The organoleptic evaluation of the control and experimental samples was carried out in accordance with GOST 9959-2015, «Meat and meat products. General conditions for organoleptic evaluation» [13]. The maximum score for the assessment was 5. Three samples from each group were selected for the organoleptic assessment. The tasting panel consisted of representatives from the academic staff of the Department of Food Technology. The sensory assessment was carried out with the voluntary participation of trained academic staff. All participants were informed of the aims of the study and gave their verbal informed consent before the assessment began. The study did not involve any medical procedures, and no personal data was collected. The study complied with the ethical standards applicable to research involving human subjects [14].

Based on the tasting panel's responses, as shown in Figure 2, it can be concluded that there is a negligible difference between the control and experimental samples. The experimental samples L. sakei + Zn and L. sakei + Se outperformed the control sample in two parameters – consistency and tenderness – whilst criteria such as taste, aroma and colour were close to those of the control sample. Figure 2 presents the results of the average scores for all parameters. Similar results are described in the work of Absalimova et al., where the addition of a protein-carbohydrate composition

as an enhancer and filler in minced meat semi-finished products had a positive effect on the consistency of the products [24].

Conclusion

The results of this study demonstrate the technological potential of combining the bioprotective culture Lactobacillus sakei with micronutrient fortification for the production of ham from meat of culled cows. The application of L. sakei during the maturation stage, together with a 50% reduction in sodium nitrite, contributed to the suppression of spoilage microflora and ensured microbiological safety of the raw material without the detection of pathogenic microorganisms. Fortification of the ham with selenium (L-selenomethionine) and zinc (zinc citrate) improved oxidative stability during refrigerated storage, as indicated by significantly lower peroxide values compared with the control samples. At the same time, the introduction of micronutrients did not adversely affect the key physicochemical parameters of the product, as pH and water activity remained within the optimal range for meat products. An increase in water-holding capacity in fortified samples indicates improved structural and technological properties of the meat system. Sensory evaluation confirmed that micronutrient fortification did not reduce product acceptability and even contributed to improved texture and tenderness. Overall, the combined use of Lactobacillus sakei and micronutrient enrichment represents a promising approach for improving the quality, stability, and safety of ham produced from culled cow meat, thereby enhancing the efficient utilization of this raw material in the meat industry.

References

1. Diniz W.J.S. Cross talk between mineral metabolism and meat quality: A systems biology overview / W.J.S. Diniz, P. Banerjee, L.C.A. Regitano // Physiological Genomics. – 2019. – T. 51, № 11. – P. 529-538.
2. Trace elements, PPARs, and metabolic syndrome / Y. Shi et al // International journal of molecular sciences. – 2020. – T. 21, № 7. – P. 2612.
3. Ashaolu T.J. A holistic review on Euro-Asian lactic acid bacteria fermented cereals and vegetables / T.J. Ashaolu, A. Reale // Microorganisms. – 2020. – T. 8, № 8. – P. 1176.
4. Quantifying the bioprotective effect of Lactobacillus sakei CTC494 against Listeria monocytogenes on vacuum packaged hot-smoked sea bream / A. Bolívar et al // Food microbiology. – 2021. – T. 94. – P. 103649.
5. A comprehensive review on lipid oxidation in meat and meat products / R. Domínguez et al // Antioxidants. – 2019. – T. 8, № 10. – P. 429.
6. Bioprotective culture: A new generation of food additives for the preservation of food quality and safety / L. Ben Said et al // Industrial biotechnology. – 2019. – T. 15, № 3. – P. 138-147.
7. Development of technology of restructured meat products using biotechnological methods of transformation of functional and technological properties of raw materials / A. Beisembayeva et al // Foods. – 2025. – T. 14, № 16. – P. 2894. https://doi.org/10.3390/foods14162894.
8. ST RK GOST 54354-2011. Meat and meat products. General requirements and methods of microbiological analysis. – 2013. – P. 42.
9. GOST 34118-2017. Meat and meat products. Method for determining the peroxide value. – 2017. – P. 12.
10. GOST R 51478-99. Meat and meat products. A control method for determining the concentration of hydrogen ions (pH). – 2021. – P. 3.
11. GOST R ISO 21807. Microbiology of food and animal feed. Determination of water activity. – 2012. – P. 2.
12. Improving soil moisture capacity with polymeric-mineral materials for growing plants. Vartanyan A. A. et al. – 2022.
13. GOST 9959-2015. Meat and meat products. General conditions for organoleptic assessment. – 2025. – P. 4.
14. World Medical Association. World Medical Association Declaration of Helsinki: Ethical Principles for Medical Research Involving Human Subjects. JAMA. – 2013. – № 310(20). – P. 2191-2194. https://doi.org/10.1001/jama.2013.281053
15. GOST 8558-2015. Sodium Nitrite. Specifications; Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification: Moscow, Russia, 2015.
16. Zagorec M. Lactobacillus sakei: A starter for sausage fermentation, a protective culture for meat products / M. Zagorec, M.C. Champomier-Vergès // Microorganisms. – 2017. – T. 5, № 3. – P. 56.

17. Metabolomics reveals spoilage characteristics and interaction of Pseudomonas lundensis and Brochothrix thermosphacta in refrigerated beef / J. Fang et al // Food Research International. – 2022. – Т. 156. – P. 111139.
18. Effects of inoculating Lactobacillus sakei starter cultures on the microbiological quality and nitrite depletion of Chinese fermented sausages / X.H. Wang et al // Food Control. – 2013. – Т. 32, № 2. – P. 591-596.
19. Influence of cadmium ions on the antioxidant status and lipid peroxidation in mouse liver: protective effects of zinc and selenite ions / R. Bernotiene et al // Trace Elements & Electrolytes. – 2012. – Т. 29, № 2.
20. The influence of natural antioxidants on the quality and storage capacity of semi-finished horse meat products / N. Abilmazhinova et al // Slovak Journal of Food Sciences. – 2024. – Т. 18. https://doi.org/10.5219/1997.
21. Arihara K. Functional meat products / K. Arihara, M. Ohata // Functional foods. – Woodhead Publishing, 2011. – P. 512-533.
22. Bioactive compounds in functional meat products / E. Pogorzelska-Nowicka et al // Molecules. – 2018. – Т. 23, № 2. – P. 307.
23. Xu Y. Modification of myofibrillar protein functional properties prepared by various strategies: A comprehensive review / Y. Xu, X. Xu // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. – 2021. – Т. 20, № 1. – P. 458-500. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12665.
24. The use of protein-carbohydrate composition of okara, chickpea flour and whey protein in the technology of minced meat cutlets / M. Absalimova et al // Slovak Journal of Food Sciences. – 2023. – Т. 17. https://doi.org/10.5219/1916.

Funding information

This article was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan under grant №AP23488862 as part of the «Competition for grant funding of scientific and (or) scientific and technical projects for 2024-2026». The authors declare that there is no conflict of interest.

А.М. Таева[1]*, Ж. Калибекқызы[2], А.Х. Бейсембаева[1], Н.К. Абилмажинова[1], М.А. Абсалимова[1]
[1]Алматы технологиялық университеті,
050012, Қазақстан Республикасы, Алматы, Төле би көшесі, 100
[2]Шакарім университеті,
071400, Қазақстан Республикасы, Семей, Глинка көшесі, 20А
*e-mail: aigul.taeva@gmail.com

ЖАСЫ ҰЛҒАЙҒАН СИЫР ЕТІНЕН ДАЙЫНДАЛҒАН, СЕЛЕН ЖӘНЕ МЫРЫШПЕН БАЙЫТЫЛҒАН ВЕТЧИНАНЫҢ ФИЗИКА-ХИМИЯЛЫҚ ЖӘНЕ МИКРОБИОЛОГИЯЛЫҚ КӨРСЕТКІШТЕРІН ЗЕРТТЕУ

Жасы ұлғайған сиыр етін тиімді пайдалану оның функционалдық және технологиялық қасиеттерінің өзгермелілігіне байланысты ет өнеркәсібі үшін маңызды технологиялық міндет болып табылады. Осы зерттеудің мақсаты жасы ұлғайған сиыр етінен дайындалған ет өнімдерінің сапасына, тотығу тұрақтылығына және микробиологиялық қауіпсіздігіне биоқорғаушы культура Lactobacillus sakei мен микроэлементтер – селен (Se) және мырышпен (Zn) байытудың кешенді әсерін бағалау болды. Піспі-жетілу процесі кезінде шикі еттің микробиологиялық көрсеткіштеріне Lactobacillus sakei қолдану және натрий нитриті мөлшерін 50 % төмендету арқылы олардың бірлескен әсері зерттелді. L. sakei қолдану жалпы микроорганизмдер санын айтарлықтай төмендетті (6,4-тен 5,6 log КОЕ/г дейін) және өнімнің бұзылуын тудыратын микроорганизмдердің, соның ішінде Enterobacteriaceae, Pseudomonas spp. және Brochothrix thermosphacta өсімін тежеді. Патогенді микроорганизмдер (Escherichia coli, Staphylococcus aureus, Listeria monocytogenes және Salmonella spp.) анықталған жоқ. L. sakei қосылған және L-селенометионинмен (0,525 мг/кг) және мырыш цитратымен (150 мг/кг) байытылған ет өнімдерінің үлгілері физика-химиялық және органолептикалық қасиеттері бойынша зерттелді. Үлгілерді тоңазытқышта сақтау кезінде (4°C, 30 күн) пероксид саны зерттелді. Микронутриенттермен байыту липидтердің тотығуын төмендетті: 30 күннен кейін пероксидтік сан көрсеткіштері бақылау үлгілеріне қарағанда төмен болды. pH мәндері (5,76-5,82) және су белсенділігі (0,958-0,962) тұрақты болып қалды, ал тәжірибелік үлгілерде су ұстау қабілеті 4 %-ға артты. Сенсорлық бағалау бақылау және тәжірибелік үлгілердің түсі, дәмі және сыртқы түрі көрсеткіштері бойынша сапасы ұқсас екенін көрсетті, ал тәжірибелік үлгілердің текстурасы мен жұмсақтығы жақсарғаны байқалды.

Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, Lactobacillus sakei қолдану мен микронутриенттермен (Se және Zn) байытудың бірлескен әсері жасы ұлғайған сиыр етінен дайындалған ет өнімдерінің тотығу тұрақтылығын және технологиялық қасиеттерін жақсартып, сонымен қатар олардың микробиологиялық қауіпсіздігі мен сенсорлық сапасын сақтай алады.

Түйін сөздер: *Lactobacillus sakei, селен, мырыш, пероксидтік сан, су ұстау қабілеті, микробиологиялық қауіпсіздік.*

А.М. Таева[1]*, Ж. Калибеккызы[2], А.Х. Бейсембаева[1], Н.К. Абилмажинова[1], М.А. Абсалимова[1]
[1]Алматинский технологический университет,
050012, Республика Казахстан, Алматы, ул .Толе би, 100
[2]Шакарім университет,
071400, Республика Казахстан, Семей
*e-mail: aigul.taeva@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ И МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВЕТЧИНЫ ИЗ МЯСА ВЫБРАКОВАННЫХ КОРОВ, ОБОГАЩЁННЫХ СЕЛЕНОМ И ЦИНКОМ

Эффективное использование мяса выбракованных коров представляет собой важную технологическую задачу для мясной промышленности ввиду изменчивости его функциональных и технологических свойств. Целью настоящего исследования была оценка комбинированного воздействия биозащитной культуры Lactobacillus Sakei и обогащения микроэлементами – селеном (Se) и цинком (Zn) – на качество, окислительную стабильность и микробиологическую безопасность мясных изделий, изготовленной из мяса выбракованных коров. Изучалось влияние Lactobacillus Sakei в сочетании с 50-процентным снижением уровня нитрита натрия на микробиологические показатели сырого мяса в процессе созревания. Использование L. Sakei значительно снизило общее количество микроорганизмов (с 6,4 до 5,6 log КОЕ/г) и подавило рост микроорганизмов, вызывающих порчу продуктов, включая Enterobacteriaceae, Pseudomonas spp. и Brochothrix thermosphacta. Патогенные микроорганизмы (Escherichia coli, Staphylococcus aureus, Listeria monocytogenes и Salmonella spp.) не были обнаружены. Образцы мясных изделий, содержащие L. Sakei и обогащенные L-селенометионином (0,525 мг/кг), цитратом цинка (150 мг/кг), исследовали на физико-химические и органолептические свойства. Перекисное число было исследовано при хранении образцов в холодильнике (4 °C, 30 дней). Обогащение микронутриентами снизило окисление липидов: через 30 дней показатели перекисного числа оказались ниже, чем в контрольных образцах. Значения pH (5,76-5,82) и водной активности (0,958-0,962) оставались стабильными, в то время как водоудерживающая способность увеличилась на 4 % в опытных образцах. Сенсорная оценка показала сопоставимое качество контрольных и опытных образцов в показателях цвета, вкуса и внешнего вида, в то время как показатели текстуры и нежности опытных образцов были улучшены.

Результаты демонстрируют, что совместное применение Lactobacillus Sakei и обогащения микронутриентами (Se и Zn) может улучшить окислительную стабильность и технологические свойства мясных изделий, произведенных из мяса выбракованных коров, при этом сохраняя микробиологическую безопасность и сенсорное качество.

Ключевые слова: *Lactobacillus sakei, селен, цинк, перекисное число, влагоудерживающая способность, микробиологическая безопасность.*

Сведения об авторах

Айгуль Маратовна Таева* – доктор технических наук, профессор, Алматинский технологический университет, Республика Казахстан, г. Алматы; e-mail: aigul.taeva@gmail.com.

Жанар Калибекқызы – кандидат биологических наук, ассоциированный профессор; Shakarim University, Республика Казахстан, г. Семей; e-mail: z.kalibekkyzy@shakarim.kz.

Алем Халитовна Бейсембаева – магистр, сеньор-лектор, Алматинский технологический университет, Республика Казахстан, г. Алматы; e-mail: alem_beisembaeva@mail.ru.

Назым Кылышбековна Абильмажинова – PhD, ассистент-профессор, Алматинский технологический университет, Республика Казахстан, г. Алматы; e-mail: abilmazhinova85@mail.ru.

Мамура Абсаттаркызы Абсалимова – PhD, ассистент-профессор, Алматинский технологический университет, Республика Казахстан, г. Алматы; e-mail: m.absalimova@atu.kz.

Авторлар туралы

Айгуль Маратовна Таева* – техника ғылымдарының докторы, профессор, Алматы технологиялық университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы; e-mail: aigul.taeva@gmail.com

Жанар Калибекқызы – биология ғылымдарының кандидаты, ассоц.профессор, Shakarim University, Қазақстан Республикасы, Семей; e-mail: z.kalibekkyzy@shakarim.kz.

Алем Халитовна Бейсембаева – магистр, сеньор-лектор, Қазақстан Республикасы, Алматы қаласы, Алматы технологиялық университеті; e-mail: alem_beisembaeva@mail.ru.
Назым Кылышбековна Абилмажинова – PhD, ассистент-профессор, Қазақстан Республикасы, Алматы қаласы, Алматы технологиялық университеті; e-mail: abilmazhinova85@mail.ru.
Мамура Абсаттаркызы Абсалимова – PhD, ассистент-профессор, Алматы технологиялық университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы; e-mail: m.absalimova@atu.kz.

About the authors
Aigul Tayeva* – Doctor of Technical Sciences, Professor; Almaty Technological University, Republic of Kazakhstan, Almaty; e-mail: aigul.taeva@gmail.com.
Zhanar Kalibekkyzy – Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Shakarim University, Republic of Kazakhstan, Semey; e-mail: z.kalibekkyzy@shakarim.kz.
Alem Beisembaeva – Master, Senior Lecturer; Almaty Technological University, Republic of Kazakhstan, Almaty; e-mail: alem_beisembaeva@mail.ru.
Nazym Abilmazhinova – PhD, Assistant Professor, Almaty Technological University, Republic of Kazakhstan, Almaty; e-mail: abilmazhinova85@mail.ru.
Mamura Absalimova – PhD, Assistant Professor; Almaty Technological University, Republic of Kazakhstan, Almaty; e-mail: m.absalimova@atu.kz.

Received 17.01.2026
Revised 15.03.2026
Accepted 16.03.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-55

CC BY 4.0
Check for updates

ҒТАХР: 65.59.31

А.К. Мустафаева*, Г.Т. Кажибаева[1], Ш.Б. Байтукенова[1],Г.Б. Абдилова[2], Е.Т. Кажибаева[1]
[1]Сәкен Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті,
010011, Қазақстан, Астана қаласы, Жеңіс даңғылы 62
[2]Шәкәрім университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинка к-сі, 20 А
e-mail: ayaulym.mustafa@mail.ru

БИОЛОГИЯЛЫҚ ҚОСПАЛАРДЫ ҚОЛДАНУ АРҚЫЛЫ ДАЙЫНДАЛҒАН ШҰЖЫҚ ӨНІМДЕРІНІҢ ҚҰРЫЛЫМДЫ-МЕХАНИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ

Аңдатпа: *Бұл мақалада биологиялық белсенді қоспаларды қосу арқылы дайындалған шұжық өнімдерінің құрылымдық-механикалық қасиеттеріне, ылғал байланыстырғыш қасиеттеріне, pH мәніне тәуелділігі қарастырылған. Қазіргі таңда тамақтану мен адамдардың денсаулық мәселелерін жақсарту үшін, ондаған ғасырлар бойы адамзаттың табиғи өсімдік және жануарлардан алынатын өнімдерді, минералдық табиғи көздерді рационалды қолдануды қамтамасыз ету мәселесі әрқашанда өзекті болып табылады. Сауатты тамақтану талаптарына сай келетін өнімдерге ең бірінші кезекте әртүрлі функционалдық бағыттағы өнімдерді, оның ішінде тағам өнімдеріне биологиялық белсенді қоспаларды жатқызуға болады. Бұл аталған бағыт адам баласының құнды тамақтануын қамтамасыз етуге, сонымен қатар аурулардың алдын алуға, адам денсаулығы мен оның еңбекке деген қабілеттілігін артыруға бағытталған.*

Зерттеу жүргізу барысында пісірілген шұжық өнімінің құрамына өсімдік және жануарлардың шикізаттары негізінде жасалған биологиялық қоспаны енгізудің мөлшері 10 % екендігі негізделді және биологиялық қоспа қосылған пісірілген шұжық өнімінің жаңа рецептурасы құрастырылды және технологиясы ұсынылды. Пісірілген шұжық өнімінің құрамына кешенді зерттеулер жүргізілді. Құрамына өсімдік және жануар тектес шикізаттар негізінде жасалған биологиялық қоспаның пісірілген шұжық өнімінің тағамдық және биологиялық қасиеттеріне оң әсер ететіндігі, сонымен қатар функционалды ингредиенттер дайын өнімнің сапалық көрсеткіштерін жақсартып, сақтау кезінде оң әсер ететіндігі дәлелденді. Дайын өнімнің физика-химиялық, құрылымды – механикалық, органолептикалық көрсеткіштерін анықтауға бағытталған зерттеу жұмыстары жүргізілді.

Түйін сөздер: *пісірілген шұжық, биологиялық белсенді қоспа, субөнімдер, дәнді дақылдар, күріш дақылы, ылғал байланыстырғыш қабілеттілік, органолептикалық көрсеткіштері.*

*А.К. Мустафаева, Г.Т. Кажибаева, Ш.Б. Байтукенова, Г.Б. Абдилова, Е.Т. Кажибаева, 2026

ҚР Үкіметінің 2021 жылғы 30 желтоқсандағы № 960 қаулысымен бекітілген Қазақстан Республикасының агроөнеркәсіптік кешенін дамытудың 2021-2030 жылдарға арналған тұжырымдамасына сәйкес өңделген өнім үлесін 70 пайызға жеткізу мен инновацияларды енгізу мәселелеріне көбірек көңіл бөлуді міндеттеген Президент жолдауының контекстінде қаралған. Осыған байланысты ет өнімдерін өндірудің мемлекеттің әлеуметтік саясатына байланысты маңызы жоғары [1].

Қазіргі таңда ет өнімдерінің құрамындағы тағамдық және биологиялық құндылықтарын арттыру үшін арнайы технологиялық өңдеулерден өткен шикізаттардан жасалған, технологиялық үрдістер көмегімен алынған тағамдық қоспаларды қоса отырып, жаңа ет өнімдерінің технологияларын жетілдірудің жаңаша әдістері пайда болуда [2].

Ет өндіру саласының мамандары өсімдік және жануар тектес шикізаттарды, сонымен қатар белгілі бір мөлшерде ет шикізатын өсімдік шикізатымен алмастыра отырып, ет өнімдеріндегі эссенциалды ингредиенттердің жетіспеушілігін туындатпас үшін шұжық өнімдерін жасауда. Қазіргі кезде пісірілген шұжықтарға нарықта сұраныс артып келеді. Оның себебін мындай факторларға сүйене отырып түсіндіруге болады, яғни пісірілген шұжықтардың жасалу технологиясы басқа шұжық өнімдерімен салыстырғанда өте қарапайымдылығымен ерекшеленеді. Тағы атап айтатын негізгі фактор – оның құрамына қосылатын шикізаттардың арзандығы және шығымының жоғары болуы.

Ет ауылшарушылық жануарларынан алынатын, ақуыздық құрамы өте жоғары, аминқышқылдық құрамы үйлестірілген, жоғары тағамдық және биологиялық құнды шикізат болып саналады. Сонымен қатар еттің құрамында минералдық заттар, дәрумендер өте көп. Етпен адам ағзасына 14% темір, 30% цинк, 14% B2 дәрумені, 21% B6 дәрумені, 22% B12 дәрумені, 19% D дәрумені және 37% ниацин түседі екен. Ет сонымен қатар функционалдық карнозин, ансерин, L-карнитин, таурин, шлутатион, креатин, Q10 коэнзим, холин, липоевті қышқыл, путресцин, коньюгирлі линольді қышқыл, спермидин және спермин және т.б. сияқты қоспаларға өте бай [3].

Биологиялық қоспаның құрамына Кеден одағы елдерінің талаптарына сай Мемлекет аралық МЕСТ 32244-2013 Өңделген ет субөнімдері. Техникалық шартқа сай көкбауыр таңдалынып алынды. Стандартқа сай басқа да субөнімдердің жалпы химиялық құрамдарының ішіндегі негізгі екі көрсеткіштері, майлылығы, ақуыз құрамдары бойынша таңдалынып алынды. Төмендегі 1-ші кестеде көрсеткіштері келтірілген.

Кесте 1 – Сиырдың субөнімдерінің химиялық құрамы.

№	Субөнімдер атаулары	Майлылығы г, көп емес	Ақуыз, г, көп емес	Калориялылығы, ккал, көп емес
1	Ми	9,0	10,0	121
2	Тіл	16,0	16,0	208
3	Жүрек	4,0	16,0	100
4	Өкпе	4,0	14,0	92
5	Бауыр	4,0	18,0	108
6	Бүйрек	3,0	15,0	87
7	Желін	20,0	12,0	228
8	Қарын	9,0	17,0	152
9	Көкбауыр	3,0	14,0	86

1-ші кестеден көріп отырғанымыздай, субөнімдердің химиялық құрамы жағынан барлығы дерлік жоғары биологиялық құндылыққа ие шикізаттар. Майлылығы төмен, калориялылығы төмен және ақуыздар құрамы жағынан да басқа субөнімдерден кем түспейтін көкбауырдың ерекшелігін атап айтқымыз келеді. Көкбауырдың құрамындағы 3 г майдың бар екенін ескерсек, басқаларының құрамындағы майдың мөлшері 1,5 және 4 есеге дейін көп екенін байқауға болады. Көкбауыр шырышты субөнімдердің қатарына жататын, тағамдық және биологиялық құндылығы жоғары субөнімдердің бірі. Көкбауырды аталған стандартқа сай болған жағдайда барлық ет өнімдері, аспаздық өнімдерді жасауда кеңінен қолдануға болады. Ірі қара малдардан алынған субөнімдердің категорияларына, қолданылу мақсатына қарай өте құнды шикізат деп айтуға толық негіз бар. Яғни, субөнімдерің қатысуымен жоғары биологиялық құнды өнім алуға болады. Елімізде жануар шикізаттарының ішіндегі субөнімдерді рационалды

пайдалану төменгі дәрежеде іске асып жатқаны белгілі. Сондықтан тағамдық және биологиялық құндылығы басқа екінішілік шикізаттармен салыстырғанда жоғары көрсеткіштерге ие сиырдың көкбауырын пісірілген шұжықтардың құрамына белігілі бір мөлшерде қосуға болады [4].

Зерттеу жүргізу барысында биологиялық қоспаны жасауға қолданылатын өсімдік және жануар тектес шикізаттардың түрлерін таңдап, олардың тағамдық және биологиялық құндылықтарына негіздеме жасалды. Сонымен қатар ет өнімдерінің құрамына қосылатын биологиялық қоспалардың негізгі компоненттерінің басым көпшілігі өсімдік тектес шикізаттар екені белгілі. Ол үшін өсімдік шикізаттарының да тағамдық және биологиялық құндылықтарына негіздеме жасап, олардың түрлерін таңдап алу үшін өсімдік тектес шикізаттың тағамдық және биологиялық құндылықтарын басқа өсімдік шикізаттары түрлерімен салыстыру арқылы теориялық сараптама жүргізілді. Биологиялық қоспаның құрамына қосылатын өсімдік шикізатының көрсеткіштерінің басқа өсімдік шикізаттарымен салыстырылуы 2-ші кестеде көрсетілген.

Кесте 2 – Дәнді-дақылдардың химиялық құрамы

Құрамы, %	Дәнді-дақылдар түрлері					
	қара бидай	арпа	сұлы	соя	жүгері	күріш
Ылғалдылық	14,00	14,50	13,50	12,50	14,50	14,00
Ақуыз	9,90	10,30	10,20	34,90	10,30	10,50
Май	2,20	2,40	6,20	17,30	4,90	0,58
Талшықтар	18,20	22,30	19,90	26,80	16,20	24,60
Крахмал	54,00	48,10	46,80	3,50	52,90	49,74
Күлділігі	1,70	2,40	3,40	5,00	1,20	0,58

2-ші кестеден көріп отырғанымыздай көрсетілген дәнді дақылдардың химиялық құрамдары әртүрлі болып келеді. Ақуыздық құрамы бойынша күріш соядан басқа дақылдардан кем емес, тіпті, қара бидайдан ақуыз құрамы жоғары екенін көреміз. Майлылығы жалпы дән массасының 0,58% құрап, салыстырылып отырған дақылдардың ішіндегі ең төмен көрсеткішке ие. Яғни, майлылығы төмен болғаны диеталық тамақтануға, калориялылығы төмен болып саналады. Талшықтары бойынша да жоғары көрсеткіштерге ие. 24,60% құрамында талшық болады екен, бұл көрсеткіші бойынша ет өнімдерінің құрамына жиі қосылатын соядан 8,4%-ға жоғары болып шықты.

3-ші кестеден көріп отырғанымыздай көрсетілген дәнді-дақылдардың құрамындағы 100 г ақуыздағы алмастырылмайтын аминқышқылдарының мөлшері мг есебімен берілген.

Кесте 3 – Дақылдардың құрамындағы ақуыздағы алмастырылмайтын аминқышқылдарының мөлшері, мг есебімен

Дақылдар түрі	Алмастырылмайтын аминқышқылдар							
	валин	изолицин	лейцин	лизин	метионин	треонин	триптофан	фенилалаин
Қара бидай	457	360	620	370	150	300	130	450
Сұлы	606	414	722	384	156	332	152	562
Арпа	534	385	739	370	180	350	120	555
Жүгері	416	112	1282	247	120	247	67	464
Соя	2090	1810	2670	2090	520	1390	450	1610
Күріш	400	283	689	290	150	260	90	410

Күріштің құрамындағы алмастырылмайтын аминқышқылдары тек сояның ақуыз құрамындағы алмастырылмайтын аминқышқылдарынан ғана төмен көрсеткіштер көрсетеді. Күріш елімізде көп мөлшерде өсірілетін шикізат екенін ескерсек, оған деген қолжетімділік өте жоғары. Сояны елімізде күрішпен салыстырғанда көп өсірмейді.

Функционалдық тамақтану ингредиенттерінің ішінде күрішке деген сұраныс өте жоғары және ол туралы ғалымдар түрлі зерттеулер жүргізіп жатыр. Күріштің әртүрлі фракциялары

аталған тамақтануда кеңінен қолданыс тауып келеді. Соның бірі ретінде күріштен алынған кебектің липофильді фракциясына қызығушылық өте жоғары. Майсыздандырылған күріштен алынған кебекті тұтыну қанның сарысуындағы холестириннің мөлшерінің төмендеуіне әсер етеді [5, 6].

Күріш кебегінің майының липид төмендетуші эффектісі оның құрамында токотриенолдардың – Е дәруменінің ерекше классының болуымен сипатталады. Сонымен қатар ол антитотықтырғыш және қабынуға қарсы әсерге ие қасиетімен де ерекшеленеді. Себебі күріш дақылының құрамындағы май қышқылдарының да полиқанықпаған түрлерінің көптеп кездесуінің нәтижесінде антитотықтырғыш қасиетінің жоғары болуын негіздейді. Күріштің осы аталған қаситеттерін ескере келе оның биологиялық қоспа жасауда кеңінен қолдануға мүмкіндік бар екенін көрсететеді. Биологиялық қоспаның осы сияқты негізгі қасиеттері болса, оны жоғары биологиялық құнды болып санауға болады [7].

Зерттеу әдіснамасы

Ғылыми зерттеу жұмыстары стандартты әдістер арқылы жүргізілді.

Бірінші кезеңде биологиялық қоспаның құрамына енетін өсімдік және жануар тектес шикізаттардың тағамдық және биологиялық құндылықтарын басқа шикізаттар түрімен салыстыра отырып негізделді. Алдымен таңдалынып алынған ингредиенттердің ара-қатынасы математикалық модельдеу арқылы, кейіннен органолептикалық қасиеттері бойынша анықталды.

Екінші кезеңде пісірілген шұжық турамасының тағамдық және биологиялық құндылықтарына, органолептикалық, физика-химиялық көрсеткіштеріне биологиялық қоспаның әртүрлі мөлшерлерінің әсерін зерттелді.

Үшінші кезеңде дайын пісірілген шұжық құрамына биологиялық қоспаның белгілі бір мөлшерлерін қоса отырып, оның тағамдық және биологиялық құндылықтары анықталды.

Биоқоспаның рецептурасын жасау үшін алдын ала таңдалынып, тағамдық және биологиялық құндылықтары негізделген шикізаттарды аламыз. Төмендегі 4-ші кестеде биологиялық қоспаның құрамына енетін ингредиенттердің МЕСТ-тары мен мөлшері көрсетілген [8-10].

Кесте 4 – Биологиялық қоспаның құрамына енетін ингредиенттердің мөлшері және МЕСТ-ы

№	Шикізат атауы	Мөлшері, %	Сәйкес МЕСТ-тері
1	Сиыр көкбауыры	70	Кеден одағы елдерінің талаптарына сай Мемлекет аралық МЕСТ 32244-2013 Өңделген ет субөнімдері.
2	Күріш ұны	20	МЕСТ 27168-86 Органолептикалық қасиеттері
3	Құрғақ сүт	15	МЕСТ 34255-2017 Сүт консервісі. Құрғақ сүт
4	Ерітілген май шикізаты	5	МЕСТ 32262-2013 Ерітілген май

4-ші кестеде көрсетілген шикізаттар негізінде биологиялық қоспа дайындалады. Дайын болған биологиялық қоспаның сыртқы түрі ашық қоңыр, біртекті паста тәріздес консистенцияда, иісі көкбауыр мен күріш дақылына тән жағымды иіске ие болды. Дайын болған қоспаны ары қарай пісірілген шұжық құрамына қосу үшін алдын ала t=2-4 ^{0}C, т=6-12 сақтаймыз. Пісірілген шұжық турамасын куттерлеу кезінде соңғы 1-2 мин қалғанда қосу ұсынылады.

Пісірілген шұжық өнімінің негізгі шикізатының белгілі бір мөлшерінің орнына биологиялық қоспаны қосу оның физика-химиялық, құрылымды-механикалық және органолептикалық қасиеттерінің өзгеруіне әкеп соғады.

Технологиялық факторлардың әсерінен туындайтын ет өнімдеріндегі физика-химиялық өзгерістерді ортаның pH мәні және ылғал ұстағыш қабілеттілігі бойынша анықталады. Көп жағдайда пісірілген шұжықтардың pH мәні олардың құрамына қосылған қсопалардың да жалпы химиялық құрамына, тікелей pH мәніне әсер етеді. Себебі тез тотығатын шикізаттардан жасалған қоспаларды қосу арқылы дайын өнімнің pH мәнін тез өзгеруге апаратын факторларға кездесіп жатады.

Дайын пісірілген шұжық өнімінің pH 1-ші суретте көрсетілген. Биологиялық қоспаның 10% қосқанда pH мәні 5,98-ге тең болды, 20% қосқанда pH мәні 6,45-ке тең болды, ал 30%

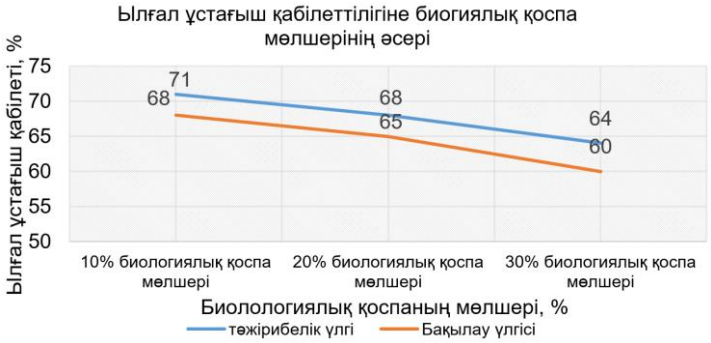
қосқанда pH мәні 6,51-ге тең болды. Бұл графиктен көретініміз неғұрлым биологиялық қоспаны көп қосқан сайын pH мәні сілтілік ортаға қарай жоғарлай береді. Яғни, биологиялық қоспа мөлшері көп болған сайын pH мәні жоғарылай береді деген тұжырым жасаймыз. Ол өз кезегінде дайын өнімнің де pH мәнін сілтілік ортаға қарай арттыра береді. Төмендегі 1-ші суретте биологиялық қоспа мөлшеріне қарай pH мәнінің өзгерісі көрсетілген.



Сурет 1 – Биологиялық қоспаның мөлшеріне байланысты pH мәніне тәуелділігі

1-ші суреттен көріп отырғандай өнімнің pH мәні сілтілік ортаға қарай өсуі оның сақталу мерзімін азайтады. Себебі қышқыл ортада тағам өнімдерінің құрамында дамитын микроағзалардың көбі белсенді дамымайды. Сақтау режиміне оңтайлы, қолайлы орта болып табылады. Егер сілтілік ортаға қарай жоғарылаған ортада өнімді сақтасақ микроағзалар көбейіп, өнімнің жарамдылық мерзімін қысқартады. Біз ұсынып отырған үш үлгінің ішінде бірінші үлгінің pH мәні тиімді деп санаймыз. Одан жоғары болу сақтау мерзімін азайтады деген қорытынды жасауға болады.

Пісірілген шұжықтың құрамындағы ылғал ұстағыш қабілеттілігіне (ЫҰҚ) оның құрамындағы шикізаттардың тікелей әсері бар. Пісірілген шұжық өнімдерінің рецептураларының көптеген түрлерінде шошқаның қыртыс майы, терісінен жасалған эмульсиялар қосылып жатады. Бұл аталған шикізаттардың майлылығы жоғары болып саналады. Яғни, майлылығы жоғары шикізаттардың ылғалды байланыстырғыш қасиеттері төмен болып келеді. Сол себепті пісірілген шұжық құрамына қосып отырған биологиялық қоспаның артықшылығы осында деп санаймыз. Рецептураға биологиялық қоспаның үш түрлі, яғни, 10%, 20% және 30% мөлшерін қосу арқылы ЫҰҚ қасиеті анықталды. Зерттеу нәтижесі төмендегі 2-ші суретте көрсетілген.



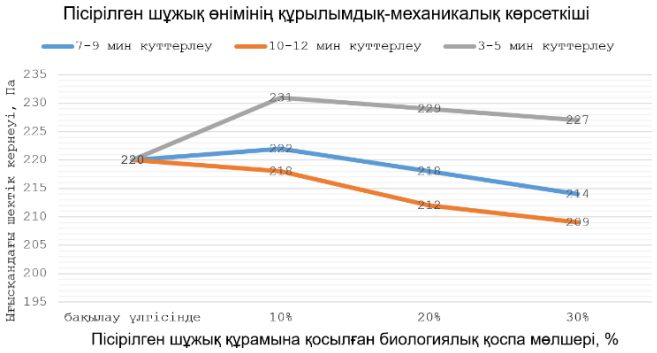
Сурет 2 – Биологиялық қоспаның мөлшеріне байланысты ЫҰҚ өзгеру динамикасы

2-ші суретте биологиялық қоспаның мөлшеріне байланысты ЫҰҚ өзгеруі көрсетілген. Тәжірибелік өнімнің ЫҰҚ 71% құрап, бақылау үлгісімен салыстырғанда 3%-ға жоғары болды. Құрамына қосылатын биологиялық қоспаның мөлшерін көбейткен сайын ЫҰҚ төмендеді. Мысалы 10% биологиялық қоспа қосу кезінде ЫҰҚ 71%-ды құрады, сәйкесінше 20 % қосқанда 68%, ал 30% биологиялық қоспаны қосқанда 64% төмендеді. Оның себебін неғұрлым құрамында ылғалдылығы жоғары болған сайын биологиялық қоспа өзінің құрамына ылғалды байланыстырғыш қабілеттілігінен айырылуымен түсіндіреміз. Сондықтан зерттеу нәтижесі көрсеткендей шұжық құрамына биологиялық қоспаның 10% қосу тиімді деп қорытындыладық.

ЫҰҚ жоғары болуы тәжірибелік өнімнің құрамында өзіне ылғалды жақсы ұстағыш күріш ұны шикізаты, құрғақ сүттің бар болуымен түсіндіруге болады. Пісірілген шұжықтың турамасын

куттерлеу нәтижесінде құрамына қосылған мұз және сумен аталған шикізаттар берік байланыстық қабілет түзеді. Нәтижесінде дайын өнімнің ЫҰҚ жоғарылайды [11, 12].

Келесі кезеңде пісірілген шұжық үлгілерінің құрылымдық-механикалық қасиеті зерттелді. Зерттеу барысында тәжірибелік үлгілерді бақылау үлгісімен салыстырып, ығысудың шектік кернеуі (ЫШК) анықталды. ЫШК тікелей әсер ететін технологиялық үрдістің бірі – куттерлеу. Пісірілген шұжықтардың турамаларын майда паста тәріздес консистенция пайда болғанға дейін куттерден өткізу қажет. Бірақ куттерлеудің өзінің режимдері бар, ол өнімнің ЫШК қаситтеріне тікелей әсер етеді. Төмендегі 3-ші суретте биологиялық қоспа қосылған пісірілген шұжықтың құрылымдық-механикалық қаситтері көрсетілген.



Сурет 3 – Биологиялық қоспа қосылған пісірілген шұжықтың құрылымдық-механикалық қаситтері

Зерттеу кезінде биологиялық қоспаны 10%, 20% және 30% қосып әртүрлі уақыт режимінде куттерлеуден өткіздік. Нәтижесін 3-ші суреттен көріп отырғандарыңыздай бақылау үлгісінің ЫШК тұрақты, себебі оның құрамы стандарт бойынша өзгерген жоқ.

Ал әртүрлі мөлшердегі биологиялық қоспа қосылған шұжық турамаларының үлгілерінің ЫШК өзгеріп отырды. Бірінші кезекте құрамында 10%, 20 % және 30 % биологиялық қоспа бар турамаларды 3-5 мин куттерледік. Нәтижесінде қоспалардың 10%, 20% және 30% сәйкес 231, 229 және 227 Па көрсетті. Бұл мәндері пісірілген шұжықтың турамасының тығыз, консистенциясы әлі нәзік емес, ірі кесекті екенін көрсетеді. Бақылау үлгісімен салыстырғанда жоғары көрсеткіштерді көрсетіп тұр.

Екінші кезекте 10%, 20% және 30% биологиялық қоспа бар турамаларды 7-9 мин куттерледік. Нәтижесінде қоспалардың 10%, 20% және 30% сәйкес 222, 218 және 214 Па шамасын көрсетті. Осы көрсеткішіміз бақылау үлгісінің мәндеріне жақын, консистециясы нәзік, «тістеліну» (кусаемость) бар жақсы көрсеткіштерге ие болды. Бұл көрсеткіштерді жақсарту мақсатында куттерлеудің уақытын ұзартып көрдік. Тура бастапқыдай мөлшердегі биологиялық қоспа мөлшерлерін қоса отырып, куттерлеуді 10-12 минутқа жеткіздік. Нәтижесін көріп отырғандарыңыздай, қоспалардың 10%, 20% және 30% сәйкес 218, 212 және 209 Па шамаларына төмендеп кетті. Сәйкесінше «тістеліну» (кусаемость) төмендеді, консистенциясы өте нәзік болып қалды. Осы ЫШК анықтаудан кейін шұжықтың турамаларының үлгілеріне 7-9 мин куттерлеу режимін таңдап алдық.

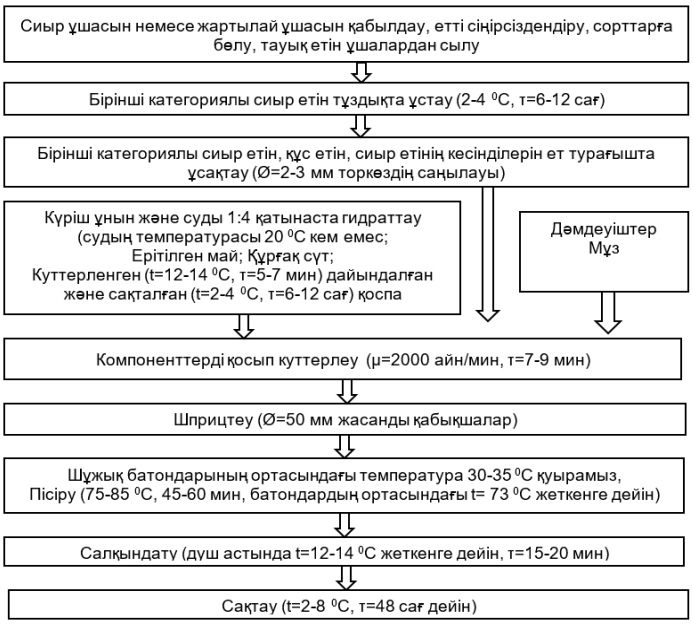
Зерттеу нәтижесі көрсеткендей, биологиялық қоспаның 10%-дық мөлшері пісірілген шұжық турамасына физика-химиялық, құрылымдық механикалық қасиеттеріне әсері басқа үлгілермен салыстырған жақсы көрсеткіштерді көрсетті.

Құрамына 10%-дық биологиялық қоспа қосылған пісірілген шұжық өнімінің рецептурасы төмендегі 5-ші кестеде көрсетілген. Барлық кешенді зерттеулерден кейін осындай қатынастағы рецептураны оңтайлы деп санадық.

Кесте 5 – Пісірілген шұжық өнімінің рецептурасы, 100 кг шикізатқа

Шикізаттар мен дәмдеуіштердің атауы	10% биологиялық қоспа қосылған пісірілген шұжық өнімі
Шикізаттар мен материалдар, г /100 г өнімге	
Тағамдық қоспа/Биологиялық қоспа	10
Бірінші сұрыпты сиыр еті	70
Тауық еті	20
Барлығы:	100

5-ші кестеде көрсетілген рецептураға сәйкес, құрамына 10% биологиялық қоспа қосылған, пісірілген шұжық өнімінің технологиясы құрастырылды. Төмендегі 4-ші суретте барлық технологиялық режимдері мен нұсқаулықтары көрсетілген.



Сурет 4 – Биологиялық қоспа қосылып пісірілген шұжықтың технологиялық сұлбасы

Осы биологиялық қоспаның 10%-дық мөлшері оңтайлы екендігі анықталған соң, оның тағамдық және биологиялық құндылықтарын зерттеу қажет. Сондықтан, бақылау үлгісі рентінде алып отырған RU 2511273 нөмірлі өнертабыстағы пісірілген шұжық өніміне қосылатын тағамдық қоспаның негізгі көрсеткіштері тәжірибелік үлгімен салыстырылды. Төмендегі 6-шы кестеде бақылау үлгісі және құрамына 10% биологиялық қоспа қосылған шұжықтардың химиялық құрамы көрсетілген.

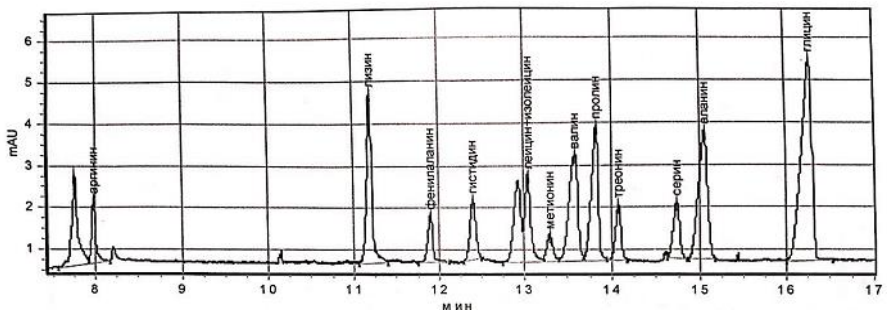
Кесте 6 – Биологиялық қоспа 10%-дық үлесі қосылған шұжықтың және бақылау үлгісінің химиялық құрамы

Химиялық көрсеткіштері, %	Бақылау үлгісі	Тәжірибелік үлгі
Ақуыздың массалық үлесі	14,67	15,5±1,40
Майдың массалық үлесі	20,16	30,56±1,69
Ылғалдылықтың массалық үлесі	63,72	60,0±0,29
Күлділіктің массалық үлесі	1,45	3,23±0,03

6-шы кестеден көріп отырғанымыздай тәжірибелік үлгінің ақуыздық, минералдық құрамы жағынан алғанда бақылау үлгісінен басым болғанын көреміз. Керісінше ылғалдылығы төмен болды. Оның себебін дайын өнімнің құрамындағы майлылықтың жоғары болуымен түсіндіріледі.

Тағам құрамындағы ақуыздық құндылығы оның құрамында болатын алмастырылатын және алмастырылмайтын аминқышқылдарының мөлшерімен бағаланады. Алматы қаласындағы «Алматы технологиялық университеті» АҚ-ның аккредитациядан өткен «Азық-түлік өнімдерінің сапасы мен қауіпсіздігін бағалау бойынша ғылыми-зерттеу зертханасында алмастырылатын және алмастырылмайтын аминқышқылдарының мөлшері анықталды, ол 5-ші суретте көрсетілген.

5-ші суреттен көріп отырғанымыздай, тәжірибелік пісірілген шұжық өнімінің құрамына адам ағзасына аса қажетті валин, лейцин+изолейцин, глицин, пролин сияқты аминқышқылдар бойынша көрсеткіштерін көруге болады. Астың жақсы сіңуіне және қалыпты ақуыз алмасуын қамтамсыз ету үшін алмастырылмайтын үш аминқышқылдардың арақатынасы үлкен рөл атқарады – лизин, лейцин, метионин + цистин. Сонымен, оңтайланған рецептура бойынша дайындалған пісірілген шұжық өнімінің үйлесімді тамақтану теориясының негізгі талаптарына сай келеді.



Сурет 5 – Құрамына 10%-дық биологиялық қоспа қосылған үлгісінің аминқышқылдық құрамын талдау

Қорытынды

Зерттеу барысында биологиялық қоспа қосылған шұжық өнімінің құрамына қосылатын өсімдік және жануар тектес ингредиенттерді қосуды негіздеп, олардың тағамдық және биологиялық құндылықтарына талдаулар жүргізілді. Биологиялық қоспа қосылған шұжық өнімінің құрамына өсімдік және екіншілік жануар тектес шикізаттардан жасалған биологиялық қоспаның 10% мөлшерін қосу оңтайлы болды. Биологиялық қоспа қосылған пісірілген шұжық өнімінің физика-химиялық және құрылымдық-мехникалық қасиеттері жоғары көрсеткіштерді көрсетті.

Әдебиеттер тізімі

1. Қазақстан Республикасының агроөнеркәсіптік кешенін дамытудың 2021-2030 жылдарға арналған тұжырымдамасын бекіту туралы. Қазақстан Республикасы Үкіметінің қаулысы № 960. – Астана, 2021.
2. Семенова А.А. Исследование характера изменения устойчивости водо-жировых эмульсий при различных параметрах ультразвуковой обработки / А.А. Семенова, Г.П. Горошко, Д.О. Трифонова // Сб. науч. тр. ВНИИМП. – 2008. – С. 148-152.
3. Эффективность использования новой кормовой добавки на основе органических кислот при производстве говядины: учебное пособие / Н.И. Искам и др. – Волгоград: ООО «СФЕРА», 2017. – 20 с.
4. Тугуз И.М. Разработка рецептур, совершенствование технологии и изучение потребительских свойств мясорастительных варёных колбас функционального назначения: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.18.15. – Краснодар, 2012. – 24 с.
5. Decrease Atherosclerotic Plaque Formation and Increase Antioxidant Status in Rabbits / W.H. Ling et al // The Journal of Nutrition. – 2001. – V. 131. – P. 1421-1426.
6. Химия пищи. Белки: структура, функции, роль в питании / И.А. Рогов и др. – Москва: Колос, 2000. – 384 с.
7. Cholestin inhibits cholesterol synthesis and secretion in hepatic cells (HepG2) / R.Y. Man et al // Molecular and Cellular Biochemistry. – 2012. – V. 233. – № 1–2. – P. 153-158.
8. ГОСТ 23042-86. Мясо и мясные продукты. Методы определения жира. – Москва: Стандартинформ, 2010. – 5 с.
9. ГОСТ 25011-81. Мясо и мясные продукты. Методы определения белка. – Москва: Стандартинформ, 2010. – 7 с.
10. ГОСТ 9959-91. Продукты мясные. Общие условия проведения органолептической оценки. – Москва: Стандартинформ, 2010.
11. Chia (Salvia hispanica L.) mucilage as a new fat substitute in emulsified meat products: technological, physicochemical, and rheological characterization / A.K.F.I. Câmara et al // LWT. – 2020. – V. 125. – Article 109193.
12. Microstructure and physiochemical properties of meat sausages based on nanocellulose-stabilized emulsions / W. Qi et al // International Journal of Biological Macromolecules. – 2020. – V. 152. – P. 567-575.

References

1. Kazakstan Respublikasynyn agroonerkasiptik keshenin damytudyn 2021-2030 zhyldarga arnalgan tuzhyrymdamasyn bekitu turaly. Kazakstan Respublikasy Ykimetinin kaulysy № 960. – Astana, 2021. (In Kazakh).

2. Semenova A.A. Issledovanie kharaktera izmeneniya ustoichivosti vodo-zhirovykh ehmul'sii pri razlichnykh parametrakh ul'trazvukovoi obrabotki / A.A. Semenova, G.P. Goroshko, D.O. Trifonova // Sb. nauch. tr. VNIIMP. – 2008. – S. 148-152. (In Russian).
3. Ehffektivnost' ispol'zovaniya novoi kormovoi dobavki na osnove organicheskikh kislot pri proizvodstve govyadiny: uchebnoe posobie / N.I. Iskam i dr. – Volgograd: OOO «SFERA», 2017. – 20 s. (In Russian).
4. Tuguz I.M. Razrabotka retseptur, sovershenstvovanie tekhnologii i izuchenie potrebitel'skikh svoistv myasorastitel'nykh varenykh kolbas funktsional'nogo naznacheniya: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.18.15. – Krasnodar, 2012. – 24 s. (In Russian).
5. Decrease Atherosclerotic Plaque Formation and Increase Antioxidant Status in Rabbits / W.H. Ling et al // The Journal of Nutrition. – 2001. – V. 131. – R. 1421-1426. (In English).
6. Khimiya pishchi. Belki: struktura, funktsii, rol' v pitanii / I.A. Rogov i dr. – Moskva: Kolos, 2000. – 384 s. (In Russian).
7. Cholestin inhibits cholesterol synthesis and secretion in hepatic cells (HepG2) / R.Y. Man et al // Molecular and Cellular Biochemistry. – 2012. – V. 233. – № 1–2. – R. 153-158. (In English).
8. GOST 23042-86. Myaso i myasnye produkty. Metody opredeleniya zhira. – Moskva: Standartinform, 2010. – 5 s. (In Russian).
9. GOST 25011-81. Myaso i myasnye produkty. Metody opredeleniya belka. – Moskva: Standartinform, 2010. – 7 s. (In Russian).
10. GOST 9959-91. Produkty myasnye. Obshchie usloviya provedeniya organolepticheskoi otsenki. – Moskva: Standartinform, 2010. (In Russian).
11. Chia (Salvia hispanica L.) mucilage as a new fat substitute in emulsified meat products: technological, physicochemical, and rheological characterization / A.K.F.I. Câmara et al // LWT. – 2020. – V. 125. – Article 109193. (In English).
12. Microstructure and physiochemical properties of meat sausages based on nanocellulose-stabilized emulsions / W. Qi et al // International Journal of Biological Macromolecules. – 2020. – V. 152. – R. 567-575. (In English).

А.К. Мустафаева[1*], Г.Т. Кажибаева[1], Ш.Б. Байтукенова[1], Г.Б. Абдилова[2], Е.Т. Кажибаева[1]
Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина,
010011, Республика Казахстан, г. Астана, пр. Женис, 62
[2]Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А
e-mail: ayaulym.mustafa@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОЛБАСНЫХ ИЗДЕЛИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ДОБАВКИ

В данной статье рассматривается зависимость структурно-механических свойств, таких как влагосвязывающих свойств и значения pH колбасных изделий, приготовленных с добавлением биологически активных добавок. В настоящее время, в целях улучшения питания и здоровья человека, все большую актуальность приобретает вопрос обеспечения рационального использования натуральных продуктов растительного и животного происхождения, минеральных природных источников, которые используются человечеством на протяжении десятилетий. К продуктам, отвечающим требованиям здорового питания, относятся, прежде всего, продукты различного функционального направления, в том числе биологически активные добавки к пищевым продуктам. Данное исследование направлено на обеспечение полноценного питания человека, а также на профилактику заболеваний, повышение здоровья и работоспособности человека.

В ходе исследования обосновано добавляемое количество 10 % биологической добавки, вводимой в состав вареных колбасных изделий. Разработана новая рецептура и предложена технология вареных колбасных изделий с добавлением биологических добавок. Проведены комплексные исследования состава вареных колбасных изделий. Доказано, что биологическая добавка на основе растительного и животного сырья положительно влияет на пищевые и биологические свойства вареных колбасных изделий, а функциональные ингредиенты улучшают качественные показатели готового продукта и положительно влияют на его сохранность. Проведены исследования по определению

физико-химических, структурно-механических и органолептических показателей готового продукта.

Ключевые слова: *вареная колбаса, биологическая добавка, субпродукты, рисовая крупа, влагосвязывающая способность, органолептические показатели.*

A. Mustafayeva[*], G. Kazhibayeva[1], Sh. Baytukenova[1], G. Abdilova[2], Ye. Kazhibayeva[1]
S. Seifullin Kazakh Agrotechnical 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

A STUDY OF THE STRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF SAUSAGE PRODUCTS USING A BIOLOGICAL ADDITIVE

This article examines the relationship between structural and mechanical properties, such as water-binding capacity and pH, of sausages prepared with the addition of biologically active additives. Currently, to improve human nutrition and health, the rational use of natural products of plant and animal origin, as well as natural mineral sources, which have been used by humanity for decades, is becoming increasingly important. Products that meet healthy nutritional requirements primarily include products with various functional uses, including biologically active food additives. This study aims to ensure adequate human nutrition, as well as disease prevention, and improve human health and performance.

The study substantiated the addition of 10% biological additive to cooked sausages. A new recipe was developed and a technology for cooking sausages with the addition of biological additives was proposed. Comprehensive studies of the composition of cooked sausages were conducted. It has been proven that a biological additive based on plant and animal raw materials positively influences the nutritional and biological properties of cooked sausages, while functional ingredients improve the quality of the finished product and enhance its shelf life. Studies were conducted to determine the physicochemical, structural, mechanical, and organoleptic properties of the finished product.

Key words: *cooked sausage, biological additive, by-products, rice cereal, moisture-binding capacity, organoleptic properties.*

Авторлар туралы мәлімет

Аяулым Какеновна Мустафаева* – техника ғылымдарының кандидаты, «Тамақ және қайта өңдеу өндірістерінің технологиясы» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, «С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті», Қазақстан Республикасы; e-mail: ayaulym.mustafa@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9627-7543.

Галия Тулеуевна Кажибаева – техника ғылымдарының кандидаты, «Тамақ және қайта өңдеу өндірістерінің технологиясы» кафедрасының профессоры, «С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті», Қазақстан Республикасы; e-mail: docent-1965@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5889-6546.

Шолпан Байдильдаевна Байтукенова – техника ғылымдарының кандидаты, «Тамақ және қайта өңдеу өндірістерінің технологиясы» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, «С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті», Қазақстан Республикасы; e-mail: baytukenova75@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0200-8455.

Галия Бекеновна Абдилова – техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, «Биоинженерлік жүйелер» кафедрасы, Шәкәрім университеті, Семей, Қазақстан Республикасы; e-mail: abdilova1979@bk.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002- 6647-6314.

Еркежан Тулеубаевна Кажибаева – техника ғылымдарының магистрі, «Тамақ және қайта өңдеу өндірісінің технологиясы» кафедрасы, «С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті», Қазақстан Республикасы; e-mail: kazhybaeva.erkezhan@mail.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-9806-6735.

Сведения об авторах

Аяулым Какеновна Мустафаева* – кандидат технических наук, ассоциированный профессор кафедры «Технологии пищевых и перерабатывающих производств», Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Республика Казахстан; e-mail: ayaulym.mustafa@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9627-7543.

Галия Тулеуевна Кажибаева – кандидат технических наук, профессор кафедры «Технологии пищевых и перерабатывающих производств», Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Республика Казахстан; e-mail: docent-1965@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5889-6546.

Шолпан Байдильдаевна Байтукенова – кандидат технических наук, ассоциированный профессор кафедры «Технологии пищевых и перерабатывающих производств»; Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Республика Казахстан; e-mail: baytukenova75@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0200-8455.

Галия Бекеновна Абдилова – кандидат технических наук, ассоциированный профессор, кафедра «Биоинженерные системы», Университет Шакарима, Семей, Республика Казахстан, e-mail: abdilova1979@bk.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6647-6314.

Еркежан Тулеубаевна Кажибаева – магистр технических наук, кафедра «Технологии пищевых и перерабатывающих производств», Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Республика Казахстан; e-mail: kazhybaeva.erkezhan@mail.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-9806-6735.

Information about the authors

Ayaulym Mustafayeva* – Candidate of Technical Science, Associate professor of the department «Technology of food and processing industries», S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University; Republic of Kazakhstan; e-mail: ayaulym.mustafa@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002- 9627-7543.

Galiya Kazhibayeva – Candidate of Technical Science, professor of the department «Technology of food and processing industries», S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University; Republic of Kazakhstan; e-mail: docent-1965@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5889-6546.

Sholpan Baytukenova – Candidate of Technical Science, Associate professor of the department «Technology of food and processing industries», S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Republic of Kazakhstan; e-mail: baytukenova75@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003- 0200-8455.

Galiya Abdilova – candidate of technical sciences, associate professor, department of Bioengineering Systems, Shakarim University, Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: abdilova1979@bk.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6647-6314.

Yerkezhan Kazhibayeva – Master of Technical science, department «Technology of food and processing industries»; S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Republic of Kazakhstan; e-mail: kazhybaeva.erkezhan@mail.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-9806-6735.

Редакцияға енуі 03.12.2025
Өңдеуден кейін түсуі 17.12.2025
Жариялауға қабылданды 17.12.2025

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-56

МРНТИ: 67.07.53

CC BY 4.0
Check for updates

Ж.К. Алдажуманов*, Е.Н. Мясоедова, Д.В. Мясоедов, К.С. Зарыкбаева, А.Е. Сатыбалдинова
Шәкәрім университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинки 20А көш
*e-mail: aldazhumanov.zhan@yandex.kz

СЕМЕЙ ҚАЛАСЫНДАҒЫ ТҰРҒЫН ҮЙДІҢ ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ АУДИТІ

Аңдатпа: *Мақалада Семей қаласындағы көпқабатты тұрғын үйге жүргізілген энергетикалық аудиттің нәтижелері келтірілген. Зерттеу нысаны ретінде Физкультура көшесінде орналасқан панельді тұрғын үй таңдалды, себебі оның жылу тұтынуы ұқсас ғимараттарға қарағанда жоғары және қасбеттерінде жылу шығынының көрінетін белгілері байқалады. Жұмыстың мақсаты – ғимараттың қоршаушы құрылымдарындағы жылу шығындарын термография әдісімен анықтап, жылуэнергетикалық тиімділікті арттыруға бағытталған техникалық және ұйымдастырушылық іс-шараларды негіздеу.*

Әдіс ретінде инфрақызыл термография (Easir-9 жылу бейнегішінің көмегімен), жылутехникалық есептеулер және жылу энергиясының жылдық шығынын бағалаудың нормативтік тәсілдері қолданылды. Өлшеулер жүргізу кезінде сыртқы және ішкі ауа температурасы, эмиссия коэффициенті, қашықтық пен аспаптың негізгі метрологиялық сипаттамалары ескерілді. Нәтижесінде панель түйіспелерінде, терезе ойықтарында, цоколь аймағында және кіреберіс тораптарында «суық көпірлердің» шоғырланған аймақтары анықталды, олар жалпы жылу шығындарының елеулі үлесін құрайды.

Ұсынылған энергия үнемдеу іс-шараларына қасбеттерді жылу оқшаулау, жылыту жүйесін гидравликалық теңгерімдеу, радиаторлық терморегуляторларды орнату және жылу энергиясын есепке алу құралдарын енгізу жатады. Экономикалық бағалау бұл шараларды іске асыру кезінде жылу энергиясын тұтынуды шамамен 15-20%-ға дейін қысқартуға және тұрғын үй иелері үшін қызмет көрсету шығындарын азайтуға мүмкіндік беретінін көрсетті. Жұмыстың практикалық маңыздылығы нақты тұрғын үй қоры үшін қолдануға болатын кешенді тәсіл ұсынуымен, сондай-ақ Семей қаласының және Қазақстан Республикасының басқа да қалаларының ұқсас ғимараттары үшін әдістемелік негіз қалыптастыруымен сипатталады.

Түйін сөздер: *энергоаудит, энергия үнемдеу, жылулық бейнелеу талдауы, жылу оқшаулау, жылыту жүйесін автоматтандыру.*

Кіріспе

Тұрғын үйге энергетикалық тексеру жүргізудің мақсаты, кез келген басқа объект сияқты, энергия ресурстарын пайдалануды оңтайландыру, үй иелерінің ТЭР шығындарын азайту болып табылады. Ғимараттар мен кәсіпорындардың энергия аудиті объектіні сертификаттау және оған энергия тиімділігі класын беру үшін қажет энергия үнемдеу әлеуетін сипаттайтын әзірленетін іс-шаралар кешенінен тұрады.

Тұрғын үйді энергетикалық зерттеу құрылымына кіретін тармақтар:

– пайдаланылатын энергетикалық ресурстардың көлемі туралы объективті деректер алу;

– аспаптық өлшеулер жүргізу (термовизиялық түсірілім, микроклимат параметрлерін өлшеу, жеткізу-жылыту және сору желдету параметрлерін өлшеу, жарық деңгейін өлшеу, электр энергиясының сапасын өлшеу және т. б.);

– ғимаратты тұрғызуда қолданылатын конструкциялар материалдарының сапасын бағалау;

©Ж.К. Алдажуманов, Е.Н. Мясоедова, Д.В. Мясоедов, К.С. Зарыкбаева, А.Е. Сатыбалдинова, 2026

– энергия тұтынуды есепке алу, бақылау және басқару жүйелерінің жай-күйін бағалау;

– отын-энергетикалық ресурстарды тұтыну теңгерімін жасау;

– энергетикалық ресурстарды пайдалану тиімділігін талдау;

– зерттелетін ғимараттың энергия тиімділігі класын беру;

– ТЭР пайдалану тиімділігін арттыруға бағытталған жұмыстарды жүргізу бойынша ұсыныстар мен іс-шараларды әзірлеу;

– негізгі ұсынымдарды баяндай отырып, есептілікті қалыптастыру, көрсеткіштерді цифрлық салыстыру және ұсынылған шаралардың нақты негіздемесі;

– энергетикалық паспорт жасау.

Соңғы жылдары Қазақстан Республикасында энергия тиімділігі мен энергия үнемдеуді арттыру мәселесі мемлекеттік деңгейде басым бағыттардың бірі ретінде қарастырылуда. Тұрғын және қоғамдық ғимараттардың жылутехникалық көрсеткіштеріне қойылатын талаптар қолданыстағы құрылыс нормаларында, соның ішінде СН РК 2.04-07-2022 «Тепловая защита зданий» (ҚР ҚН 2.04-07-2022 «Ғимараттардың жылу қорғанысы») құжатында айқындалған [1]. Энергия үнемдеу және энергия тиімділігін арттырудың жалпы құқықтық және ұйымдастырушылық негіздері Қазақстан Республикасының 2012 жылғы 13 қаңтардағы № 541-IV «Энергия үнемдеу және энергия тиімділігін арттыру туралы» Заңында белгіленген [2]. Ішкі микроклимат параметрлері мен жайлылық жағдайлары ГОСТ 30494-2011 «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях» стандартымен регламенттеледі [3]. Энергетикалық аудитті жүргізу тәртібі мен энергия үнемдеу әлеуетін бағалау әдістері халықаралық ISO 50002:2014 «Energy audits - Requirements with guidance for use» стандартының талаптарымен үйлесімді тәсілдерге негізделуі тиіс [4]. Осы нормативтік базаға қарамастан, қолданыстағы тұрғын үй қорының едәуір бөлігі жылу қорғау сипаттамалары төмен және жылу энергиясын артық тұтынады, бұл мақсатты энергетикалық аудит жүргізуді қажет етеді.

Тұрғын үйлердің нақты жағдайын бағалау кезінде объектінің түріне, дизайн ерекшеліктеріне, құбырсым жүйелерінің жағдайына, пайдаланылған құрылыс және жылу оқшаулағыш материалдарға, мүмкін проблемалық аймақтарға назар аударылады. Тексеру барысында алынған сенімді деректер негізінде бірінші кезекте энергия ресурстарын ұтымды пайдалануға бағытталған іс-шаралар қабылданады. Нәтижесінде, ұсынылған шараларды сақтап, тұрғын үйдің энергия тиімділігі көрсеткіштері артады, әрбір пәтер иесінің және жалпы тұрғын үйдің энергия ресурстарын пайдалану шығындары қысқарады.

Энергия аудиті қазірдің өзінде салынған ғимараттарда энергияны үнемдеуге ықпал етеді. Тиісті тексеру және оның негізінде ұсынылатын шараларды енгізу тұтынылатын энергияның айтарлықтай төмендеуіне әкелуі керек. Алайда, іс жүзінде бұл әрдайым бола бермейді. Мұны растау нақты объектілерді энергия аудитінің нәтижелерін зерттеу болды, энергия аудиторларының жүйелік қателіктерін анықтауға мүмкіндік берді. Нашар орындалған аудит біз қалағандай жоғары емес үнемдеуге немесе оның мүлдем болмауына, кейбір жағдайларда тіпті энергия шығындарының өсуіне, мағынасыз инвестициялауға әкеледі. Бұл үй иелерінің наразылығын және жалпы энергия үнемдеу идеясының беделін түсіреді [5, 6].

Ұсынылып отырған жұмыстың ғылыми жаңалығы төмендегідей:

– Семей қаласындағы типтік панельді тұрғын үйге инфрақызыл термографияны, жылутехникалық есептеулерді және энергия тұтынудың экономикалық талдауын біріктіретін кешенді әдістеме қолданылды.

– Термографиялық түсірілім нәтижелері негізінде панель түйіспелері, терезе ойықтары, цоколь және кіреберіс аймақтары үшін «суық көпірлердің» типтік конфигурациялары мен олардың жылу шығындарына ықпалы жүйелендірілді.

– Қоршау конструкцияларын жылу оқшаулау, жылыту жүйесін гидравликалық теңгерімдеу және жылу энергиясын есепке алу құралдарын енгізу сияқты іс-шаралар үшін нақты ғимаратқа бейімделген энергия үнемдеу алгоритмі ұсынылды.

Жұмыстың практикалық маңыздылығы Семей қаласының тұрғын үй қоры жағдайында қолдануға болатын энергетикалық аудитті ұйымдастырудың және энергия үнемдеу іс-шараларын таңдаудың қолданбалы алгоритмін ұсынуымен, сондай-ақ алынған нәтижелерді Қазақстанның басқа өңірлеріндегі ұқсас ғимараттарға бейімдеу мүмкіндігімен сипатталады.

Осыған байланысты зерттеудің мақсаты – Семей қаласындағы типтік панельді тұрғын үйге энергетикалық аудит жүргізу арқылы оның жылуэнергетикалық жай-күйін бағалау және энергия тиімділігін арттыруға бағытталған техникалық және ұйымдастырушылық іс-шаралар кешенін негіздеу.

Материалдар мен әдістері

Зерттеу объектісі ретінде Семей қаласының Физкультурная көшесінде орналасқан көпқабатты кірпіш тұрғын үй таңдалды (мекенжайы: Физкультурная көшесі, № 9/7). Ғимарат 2007 жылы салынған, жалпы қабат саны – 9, подъезд саны – 2, пәтерлер саны – 72.

Сыртқы қабырғалары кірпіштен жасалған, жобалық қалыңдығы – 380 мм. Қабырға кірпіштің жылу оқшаулағыш қабаты пенополистиролден ПСБ-С материалынан (тығыздығы 30 кг/м^3, есептік жылуөткізгіштігі λ = 0,04 Вт/(м·°С)) тұрады. Межпанельдік жіктер цемент-құмды ерітіндімен толтырылған, олардың бастапқы герметизациясына салу кезінде мастика/герметик түріндегі битумді мастика қолданылған.

Терезелер бастапқыда ағаш қаңқалы біркамерлі әйнекпен орындалған, кейіннен олардың бір бөлігі ПВХ профильді екікамерлі әйнекпакеттерге ауыстырылған. Жертөле және шатыр жабдығының конструкциялары стандартты панельді тұрғын үйге тән шешімдермен сипатталады.

Зерттеу барысында ғимараттың қасбеттері мен ішкі беттеріндегі температуралық өрістерді бағалау үшін инфрақызыл термография әдісі қолданылды. Өлшеулер портативті EasIR-9 типті жылу бейнегішпен жүргізілді (1-сурет), оның негізгі техникалық сипаттамалары 1-кестеде келтірілген [7-9].



Сурет 1 – Easir-9 Тепловизоры

Термограммалар сыртқы ауаның орташа температурасы -16°С, ал ішкі ауа температурасы +22…+24°С болған кезде алынды. Түсірілім кезінде аспаптың оптикалық осі зерттелетін бетке шамамен перпендикуляр бағытталды, түсіру қашықтығы 5-15 м аралығында өзгерді. Қоршау конструкциялары материалдары үшін эмиссия коэффициенті ретінде сыланған бетон және боялған панельдерге сәйкес ε = 0,90-0,94 мәндері қабылданды.

Әрбір қасбет пен торап (панель түйіспелері, терезе ойықтары, цоколь аймағы, кіреберіс жерлері) үшін бірнеше термограмма түсіріліп, кейіннен арнайы бағдарламалық қамтамасыз ету көмегімен талданды. Термограммаларда локалды температура максимумдары мен минимумдары, сондай-ақ «суық көпірлердің» сызықтық аймақтары анықталды. Осы мәліметтер негізінде қоршаушы құрылымдардағы жылу ағындарының жоғарылау аймақтары сапалық және жартылай сандық түрде бағаланды.

EasIR-9 жылу бейнегішінің негізгі техникалық сипаттамалары 1-кестеде келтірілген.

Кесте 1 – Техникалық сипаттама

Детектор түрі	Салқындатылмаған FPA микроболо-метр (384x288 пиксель, 25 нм)
Жылу сезімталдығы	≤ 0,08 °C тан 30 °C дейін
Температура диапазоны	-20 °C ÷ 250 °C
Дәлдік	Өлшенген мәннің ± 2 °C немесе ± 2 %
Файл форматы	JPG
Дауыстық аннотация	60 секундқа дейін жазу
Жұмыс уақыты	2 сағаттан астам
Жұмыс температурасы	0 °C ÷ 50 °C
Сақтау температурасы	- 20 °C ÷ 60 °C
Ылғалдылық	Жұмыс және сақтау кезінде 10 % = 95%, конденсациясыз

Термограммалар сыртқы ауаның орташа температурасы –16°С, ал ішкі ауа температурасы +22…+24°С болған кезде алынды. Түсірілім алдында аспап өндіруші ұсынымдарына сәйкес калибрленді, қоршаған орта температурасы мен салыстырмалы ылғалдылығы енгізілді. Түсірілім кезінде жылу бейнегіштің оптикалық осі зерттелетін бетке шамамен перпендикуляр бағытталды, түсіру қашықтығы 5-15 м аралығында өзгерді.

Қоршау конструкциялары материалдары үшін эмиссивтік қабілет коэффициенті ретінде сыланған бетон және боялған панельдерге сәйкес ε = 0,90-0,94 мәндері қабылданды. Әрбір қасбет пен торап (панель түйіспелері, терезе ойықтары, цоколь аймағы, кіреберіс жерлері) үшін бірнеше термограмма түсіріліп, кейіннен арнайы бағдарламалық қамтамасыз ету көмегімен талданды.

Өлшеу қателіктерін бағалау. Жылу бейнегішпен алынған температуралық мәліметтердің нақтылығы аспаптың өзіндік қателігіне, эмиссия коэффициентін таңдауға және түсіру жағдайларына тәуелді. EasIR-9 құрылғысы үшін өндіруші температураны өлшеудің негізгі қателігін ±2°C немесе көрсетілген мәннің ±2% шамасында көрсетеді. Эмиссия коэффициентін таңдаудағы белгісіздік (±0,02-0,03) сәуле шығару температурасының есептелген мәніне қосымша жүйелік қателік енгізеді, ол тәжірибелік бағалаулар бойынша ±0,5…1,0°C шамасында болуы мүмкін. Жеке факторлардың әсерін ескеріп, бір нүктеде температураны өлшеудің жиынтық кеңейтілген белгісіздігін шамамен ±2,5…3,0°C деп бағалауға болады.

Нәтижелерді интерпретациялау кезінде абсолюттік температура мәндерімен қатар, зерттелетін ақаулы аймақ пен фон беткейлері арасындағы ΔT салыстырмалы температура айырмашылығына ерекше назар аударылды.

Нәтижелер және талқылау

Қоршау конструкцияларын жылулық бейнелеу әдісімен талдау

Термографиялық әдіспен қоршау конструкцияларына талдау жүргізілді. Зерттеу нысандары ретінде изоляция алдындағы ғимарат таңдалды. Алдын ала оқшауланған ғимарат ретінде Семей қаласының Физкультурная көшесіндегі 9/7 тұрғын үйі алынды.

Зерттеудің мақсаты зерттелетін объектінің қоршау конструкцияларының энергия тиімділігін талдау болып табылады.

Термовизиялық тексеру жүргізу үшін Easir-9 тепловизоры пайдаланылды. Алынған суреттерді талдау үшін launch Guide IrAnalyser бағдарламасы қолданылды.

Түсірілім таңертеңгі сағат тоғыздан бастап жауын-шашын, ашық күн шуақты ауа-райы, тұман және дұрыс талдауға кедергі келтіретін басқа да табиғи құбылыстар болмаған кезде жүргізілді. Термографиялау сырты теріс және іші оң температурада жүргізілді. Сыртқы түсірілім -16°C температурада, ішкі түсірілім 24°C температурада жүргізілді.

Термографиялық түсірілім нәтижелері 2-7-суреттерде келтірілген. Әрбір суретте ғимараттың нақты фотосуретімен қатар, сол аймақтың инфрақызыл кескіні және таңдалған сызық бойындағы температураның өзгеру графигі көрсетілген. Бұл жылу ағындарының таралуын және «суық көпірлердің» орналасуын визуалды түрде талдауға мүмкіндік береді [10-13].



а б в

а – термографиялық сурет; б – нақты көрініс; в – сызық бойынша температура графигі

Сурет 2 – № 11 термографиялық сурет



а б в

а – термографиялық сурет; б – нақты көрініс; в – сызық бойынша температура графигі.

Сурет 3 – № 12 термографиялық сурет



(а) (б) (в)

а – термографиялық сурет; б – нақты көрініс; в – сызық бойынша температура графигі

Сурет 4 – № 13 термографиялық сурет



а б в

а – термографиялық сурет; б – нақты көрініс; в – сызық бойынша температура графигі

Сурет 5 – № 14 термографиялық сурет



а б в

а – термографиялық сурет; б – нақты көрініс; в – сызық бойынша температура графигі

Сурет 6 – № 15 термографиялық сурет



а б в

а – термографиялық сурет; б – нақты көрініс; в – сызық бойынша температура графигі

Сурет 7 – № 16 термографиялық сурет

Солтүстік қасбет бойынша жүргізілген түсірілімдер панельдердің тік және көлденең түйіспелерінде, сондай-ақ панельдер мен терезе қораптары түйіскен жерлерінде температура өрістерінің айтарлықтай біртексіздігін көрсетті. Инфрақызыл суреттерде бұл аймақтар қоршау конструкциясының фондық беткейлеріне қарағанда басқа түске боялған және изотермалардың тығыздалуымен сипатталады, бұл жылу ағынының артуын және жылу шығындарының жоғарылығын білдіреді.

Терезе ойықтары аймағында, әсіресе терезе үстіндегі және бүйір жақтауларындағы белдемдерде «суық көпірлердің» айқын аймақтары байқалады. Бұл бастапқыда орнатылған терезе блоктарының жеткіліксіз жылуоқшаулағыш қасиеттерімен, монтаждық жіктердің герметизациясының нашарлауымен және қаптама материалдарының тозуымен түсіндіріледі. Цоколь аймағында да панельдер түйіспелерінің маңында және қаптама бұзылған орындарда температура өрісінің өзгеруі байқалып, жылу шығындарының шоғырланған учаскелері қалыптасады.

Кіреберіс тораптары мен баспалдақ алаңдарына жақын учаскелерде ішкі жылы ауа ағынының инфильтрациясы мен эксфильтрациясы салдарынан жергілікті қызып тұрған немесе салқындаған аймақтар тіркеледі. Бұл тұрғын емес үй-жайлардың есік-терезе толтыруларының, тамбурлардың және желдету арналарын оқшаулаудың жеткіліксіздігін көрсетеді.

Жалпы алғанда, 2-7-суреттерде ұсынылған термографиялық материалдар қасбеттерде, терезе ойықтарында, цоколь бөлігінде және инженерлік тораптар аймағында «суық көпірлердің» кеңінен таралғанын, ал алдын ала жылу оқшауланбаған ғимаратта қоршау конструкциялары арқылы жылу шығындарының елеулі екенін айқын көрсетеді. Бұл нәтижелер қасбеттерді қосымша жылу оқшаулау, монтаждық жіктерді қайта герметизациялау және терезе блоктарын ауыстыру немесе жақсарту қажеттігін негіздейді.

Нәтижесінде, алдын-ала оқшауланбаған ғимаратта үлкен жылу шығыны бар деген қорытынды жасауға болады. Жылу қорғауды арттыру шарасы ретінде жылу оқшаулағыш материалмен оқшаулау таңдалды. Ең тиімдісін таңдау үшін жылу оқшаулағыш материалдарды эксперименттік зерттеу жүргізіледі [14-17].

Энергия үнемдеу технологиялары туралы жалпы мағлұмат

Жалпы энергия үнемдеу ұғымы қай салада болмасын еліміздегі актуальді мәселелердің бірі.Энергия үнемдеу шаралары әр түрлі болуы мүмкін. Энергия қолданудың эффективтілігін арттыру үшін ең оңтайлы әдіс – заманауи энергия үнемдеу технологияларды пайдалану.

Энергия үнемдеу технологиялары тек белгіленген энергетикалық шығындарды ғана азайтып қоймайды,сонымен қатар экологиялық жағынан да тиімді. Ғимараттарда энергия үнемдеудегі негізгі шаралар мақсатында жылыту аспаптарына автоматикалық реттегіштер орнату болып табылады.

Желдету жүйесін қолдану, яғни жылу энергиясын қайта қолдану функциясы болса,біршама энергия үнемдеуге мүмкіндік береді.

Жылыту жүйесін жаңғырту: жылыту жүйесінің тіреушелерін баланстау, жылыту жүйесінің көтеруші және түсіруші құбырларының термостатты вентильдерін монтаждау. Бұл іс-шара жылутасымалдағыштың жылыту жүйесінің көтеруші және түсіруші құбырлары арасындағы параметрлерін ретке келтіреді.

Қоршау конструкцияларын энергия үнемдеу тұрғысынан жаңғырту үшін әртүрлі жылу оқшаулағыш материалдардың нұсқалары қарастырылды (минералды мақта плиталары, пенополистирол, сұйық керамикалық жабындар және т.б.). Зерттелетін тұрғын үй үшін «Изоллат-1» типті сұйық жылуоқшаулағыш жабындыны қолдану ұсынылды, себебі ол жұмыс жағдайлары мен монтаждау ерекшеліктері бойынша бірқатар артықшылықтарға ие.

Өндіруші деректеріне сәйкес, «Изоллат» жабындысының есептік жылуөткізгіштігі $\lambda \approx 0{,}002\text{-}0{,}007$ Вт/(м·°С) диапазонында жатады, ал 1 мм жабын минералды мақтаның 40-50 мм қабатына баламалы жылутехникалық әсер береді. Мұндай жабындыны панельді қасбет бетіне жұқа қабатпен жағу арқылы қосымша жылу кедергісін қамтамасыз етуге және ғимараттың геометриялық өлшемдерін іс жүзінде өзгертпей архитектуралық келбетін сақтауға болады. Сонымен қатар, сұйық жылу оқшаулағыш материалдың қолданылуы қасбеттің күрделі қайта жоспарлануын талап етпей, қолданыстағы қасбет жөндеу жұмыстарымен біріктіруге мүмкіндік береді.

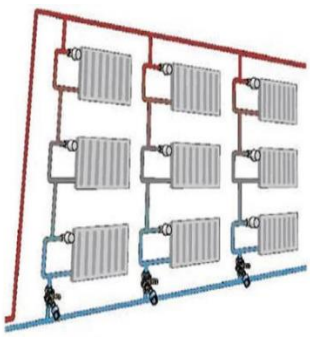
Қолданыстағы СН РК 2.04-07-2022 «Ғимараттардың жылу қорғанысы» талаптарына сәйкес сыртқы қабырғалардың жиынтық жылу кедергісі R_қажет мәнінен төмен болмауы тиіс. Жобалық және нақты деректер негізінде сыртқы қабырғаның бастапқы жылу кедергісі $R = 4{,}3$ $м^2 \cdot °С/Вт$, ал «Изоллат-1» жабындысының $\delta_{из}$ қабатын енгізгеннен кейінгі қосымша жылу кедергісі өрнегі бойынша бағаланды.

Теңестіруші клапандарды қолдану

Кез-келген жылыту жүйесі міндетті түрде гидравликалық реттелуі тиіс. Жылыту жүйесінің гидравликалық реттелуі – жүйенің тұйықталған бөліктері бойымен әрбір радиатор және әрбір контур арқылы жылутасымалдағыштың қажетті көлемі өтетіндей қайта бөлінуі.

Айналымдық контурлар бір-бірімен өзара байланысты,бұл теңгеру барысында қиындық туғызады:бір контурда судың шығыны азайғанда, қысым құламасы салдарынан басқа контурда су шығыны артып кетеді және керісінше.Сондықтан күрделі автоматикамен жабдықталған,бірақ гидравликалық теңгерілмеген жүйелерде де әр түрлі жағымсыз жағдайлар туындауы мүмкін. Мысалы радиаторлардың немесе контурдың біреуі қажетті шығынды алмаса, ал басқа радиатор немесе контур арқылы шығын белгіленгеннен көп болса, бірінші бөлменің температурасы жоғары,ал екінші бөлменікі жеткіліксіз болады [18].

Гидравликалық реттеу мәселесін теңестіруші клапандардың көмегімен шешуге болады (8 сурет). Бұл клапандар жылыту жүйесінің жатық тармақтарында немесе тіреушелерінде қысым құламасын реттеу мақсатында, жылутасымалдағыштың тұрақты шығынын қамтамасыз ету үшін қолданылады). Қазіргі кездегі теңестіруші клапандардың каталог бойынша көп қабатты ғимараттардың жылыту жүйесіне ең көп талап етілетіні автоматтандырылған түрі.



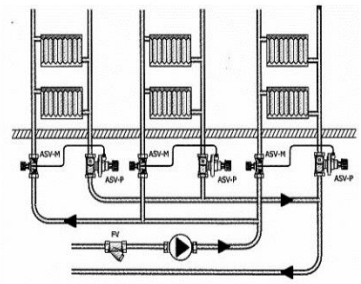
Сурет 8 – Теңестіруші клапандарды монтаждау мысалы

Danfoss маркалы автоматтандырылған теңестіруші клапандар сериясы: ASV-P, ASV-PV. ASV-P және ASV-PV клапандары (9-сурет) екі құбырлы,автоматтандырылған радиаторлық термореттегіші бар көлденең орналасқан жылыту жүйесіндегі тіреуішке орнатылады (10-сурет). Бұл термореттегіштің оптимальді режимде жұмыс істеуін қарастырады.

Автоматтандырылмаған теңестіруші клапан вентиль типтес болады.Ол автоматтандырылған реттеуші қондырғылар істен шыққан кезде дроссельдік диафрагмамен құбырлы желілерді реттейді. Danfoss маркалы автоматтандырылмаған теңестіруші клапандар сериясы:MSV-I, MSV-M, USV-I, MSV-C, MSV-F2.



Сурет 9 – Екіқұбырлы жылыту жүйесі үшін ASV-PV және ASV-M типті теңестіруші клапандар



Сурет 10 – Жылыту жүйесінде теңестіруші клапанды әр тіреуішке қойған кездегі сұлбасы

Радиаторлы термореттегіштерді қолдану

Радиаторлы термореттегіш (11 сурет) – жылытылатын бөлменің ауа температурасын индивидуальді реттеп , бірқалыпты деңгейде ұстайтын қондырғы.Қондырғы екі негізгі бөліктен тұрады:клапан және термостатикалық бөлік. Бұл екі бөлік қосымша энергия шығынын талап етпейді.Термостатикалық бөлігі сұйық элементтен, жетектен, реттеуіштен тұрады. Бөлмедегі температураның өзгеруі келесі фактілерге байланысты:

– сыртқы ауа температурасы;

– желдету және күн сәулесі;

қосымша жылу көздері: адамдар, құбыр желісіндегі ыстық су, қосым-ша тұрмыстық және т.б.



Сурет 11 – Радиаторлы термореттегіш

Жұмыс істеу принципі

Негізгі сезімтал элемент жұмыстық заты – сильфон. Қондырғы бөлмедегі температураның өзгерісіне байланысты көлемін өзгертеді.Бұл көрсеткіш термостатикалық клапанның штогына беріледі,жылыту қондырғысындағы жылутасығыштың берілісін реттейді, қуатын өзгертеді.

Герметикалық газоконденсаттық сильфон, термосезімтал затпен толтырылған, ішкі беті жылжымалы гофрирдан жасалған жабық сыйымдылық. Сальник жұқа,бірақ нық шток тотықпайтын болаттан жасалған [19].

Аталған қондырғыны қолдану барысында ғимаратты жылытуға жұмсалатын жылу энергиясының 15%-ын үнемдеуге болады.

Экономикалық есептеулер

Бір ғимарат үшін жылудың және жылытудың жылдық шығыны мына кейіптеме бойынша анықталады:

$$Q_{ж} = q_0 * a * K_t * V_c\left(t_{ауа} - t_{орт.ж}\right) * Z_{ж} * 24, \text{ Гкал/жыл} \quad (1)$$

q_0 – ғимараттың меншікті жылулық сипаттамасы, 0,27ккал/м^3·сағ·°С;

a – сыртқы ауаның шоғырлану (инфильтрация) еселеуіші = 1,05;

K_t – сыртқы ауаның есептік температурасының өзгерісін ескеретін еселеуіш = 1,08;

V_c – сыртқы өлшемі бойынша ғимараттың көлемі, 20000м^3;

$t_{ауа}$ – ғимарат ішіндегі ауаның температурасы,18°С;

$t_{орт.ж}$ – жылыту кезеңіндегі сыртқы ауаның орташа температурасы (ғимарат бойынша);

$Z_{ж}$ – жылыту кезеңінің ұзақтығы, тәулік(ғимарат бойьшша); 24 – бір тәуліктегі сағат саны.

$Q_{ж}$ = 0,27·1,05·1,08·15036·(18-(-2,1))·167·24 = 370,880Гкал/жыл№

Ыстық сумен қамдау кезіндегі жылудың жылдық шығыны:

$$Q_{ыс.су} = M * C * \left(t_{ыс.су} - t_{с.су.ж.}\right) * Z_{ж} * 0.8 + M * C * \left(t_{ыс.су} - t_{с.су\,қ}\right) * Z_{қ} = 180 * 1,0 * \quad (2)$$

$$(65 - 15) * (365 - 201) * 0,8 + 180 * 1,0 * (65 - 5) * 201 = 2,8 \text{ Гкал/адам*жыл}$$

$M_{ыс.су}$ – ыстық судың тәуліктік шығыны, бір адамға тәулігіне 180 литрден деп есептеледі;

С – судың салыстырмалы жылу сыйымдылығы = 1,0ккал/кг; $t_{ыс.су}$-ыстық су температурасы = 65°С;

$t_{с.су\,қ}$, $t_{с.су\,ж}$– қыс (жылыту) және жаз кезеңдеріндегі суық су температурасы, 5 және 15°С;

$Z_{ж}$, $Z_{қ}$ – қыс және жаз кезеңдерінің ұзақтығы, тәулік. $Q^{жыл}_{ыс.су}$ = 2,8·216 = 604,8 Гкал/жыл

Бұл ғимарат 1999 жылы салынғандықтан энергоүнемділігі салыстырмалы төмен болады. Қоршау конструкцияларына жүргізілген жылутехникалық есеп бойынша сыртқы қабырғалардың жылуоқшауланулы нормаға сәйкес емес екендігі анықталды.

Сыртқы қабырғалардың келтірілген нақтылы термиялық кедергісі:

$$R_0^{факт} = \frac{1}{\alpha_в} + \frac{\delta_{бет}}{\lambda_{бет}} + \frac{\delta_{шт}}{\lambda_{шт}} + \frac{\delta_{шт}}{\lambda_{шт}} + \frac{1}{\alpha_н} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,4}{0,85} + \frac{0,04}{0,08} + \frac{0,02}{0,16} + \frac{1}{23} = 1,4 \ \frac{м^2 * ℃}{Вт} \quad (3)$$

Санитарлы–гигиеналық және жайлылық жағдайларға сәйкес ЖМГТ = 3356тәу °С үшін сыртқы қабырғаның жылу таратуға келтірілген кедергісінің нақты мәні есептелінеді:

$$R_{req} = \alpha * D_d + b = 0,00045 * 3356 + 1,9 = 2,57 \ \frac{м^{2\circ}С}{Вт}$$

Ғимараттың жалпы жылу жоғалтуы:

$$Q_{факт} = \frac{\left(t_{іш} - t_{сырт}\right) * A_{ст}}{R_0^{факт}} = \frac{(18 + 2,1)}{1,4} * 5120 = 190360 \text{ Вт} \quad (4)$$

$t_{іш}$, $t_{сырт}$ – бөлме ішіндегі және жылыту кезеңіндегі сыртқы ауаның орташа температурасы, ($t_{іш}$=18 °С, $t_{сырт}$ = 2.1°С)

Семей қаласы үшін жылыту кезеңінің ұзақтығы 167 күн. Жылытуда ғимараттың жалпы жылу жоғалтуы:

$$Q^{/}_{факт} = Q_{факт} * T_{жыл} * 24 \quad (5)$$

$Q^{/}_{факт}$=190360*167*24=762963 квт*сағ/жыл

Сырқы қоршаушы қабырғаларғалардың келтірілген термиялық кедергісін арттыруда жылуоқшаулау ұсынылады. Сондықтан жылуоқшаулағыштың түрін және қалыңдығын анықтаймыз.

$R_{req} = 2,57 \ \frac{м^{2}*°С}{Вт}$ болғанда нормативтік жылу анықтаймыз:

$$Q^{/}_{норм} = \frac{(18 + 2,1)}{2,57} * 5120 * 167 * 24 = 417783 \text{ кВт} * \frac{сағ}{жыл} = 360 \text{ Гкал/жыл}$$

Жылдық қаржылық үнемдеу:

$$\Delta C = \Delta Q * T = 360\ \frac{\text{Гкал}}{\text{жыл}} * \frac{5711\ \text{тг}}{\text{Гкал}} = 1834890\ \text{тг/жыл}$$

Жылуоқшаулағышты орнату үшін кететін капиталды шығындар жылуоқшаулағыштың құнынан, проект бағасынан, құрылыс-монтаждау жұмыстарынан тұрады. Жылуоқшаулағыш ретінде Изоллат-1 жылуоқшаулағыш бояуы таңдалды (кесте 2, 3) [10].

Кесте 2 – Жылуоқшаулағыштың бағасы

Изоллат-1 бояуының шығыны, 1 м^2-қа 1 мм (2 қабат), л	1 л бағасы	1 м^2-ға 1 мм қалыңдыққа жұмсалатын қаражат, тг	Жалпы жұмсалатын қаражат,тг
0,7	1950	1365	7353800

Кесте 3 – Жұмыс ақысына кететін шығындар

Мамандық	Саны, адам	Енгізу мерзімі, ай	Айлық еңбекақысы, теңге	Барлығы, теңге
Инженер-жобалаушы	1	1	100000	100000
Құрылысшылар	5	1	90000	450000
Барлығы $\Delta C_{жалпы}$:				550000

Аударылымдарды есептегендегі еңбекақы:

$$C_{\text{өнд.е.а}} = \left(C_{\text{жалпы}} - C_{\text{жалпы}} \frac{H_{\text{зейн.қоры}}}{100}\right) \frac{H_{\text{әлеу.қаж}}}{100} + C_{\text{жалпы}} \quad (6)$$

Қорытынды

Жүргізілген энергетикалық аудиттің нәтижелері Семей қаласындағы зерттелген көпқабатты панельді тұрғын үйдің жылуэнергетикалық жай-күйі қанағаттанарлықсыз екенін көрсетті. Инфрақызыл термография панель түйіспелерінде, терезе ойықтарында, цоколь бөлігінде және инженерлік тораптар аймағында «суық көпірлердің» шоғырланған аймақтарын айқын көрсетті, бұл қоршаушы құрылымдар арқылы жылу шығындарының артуына әкеледі.

Жылутехникалық және энергетикалық есептеулерді талдау нәтижесінде қасбеттерді қосымша жылу оқшаулау, жылыту жүйесін гидравликалық теңгерімдеу, радиаторлық терморегуляторларды орнату және жылу энергиясын есепке алу жүйесін енгізу сияқты кешенді энергия үнемдеу іс-шаралары ұсынылды. Алдын ала экономикалық бағалау бұл шараларды іске асыру жылу энергиясын тұтынуды шамамен 15-20%-ға дейін қысқартуға және тұрғындардың пайдалану шығындарын едәуір төмендетуге мүмкіндік беретінін көрсетті.

Жұмыстың практикалық маңыздылығы нақты тұрғын үйді мысалға ала отырып, панельді ғимараттарға арналған энергетикалық аудит пен энергия үнемдеу іс-шараларын негіздеудің қолданбалы алгоритмін ұсынуында. Ұсынылған тәсіл тұрғын үй қорын басқарушы ұйымдарға, жобалаушыларға және жергілікті атқарушы органдарға жылу шығындарын азайту, жылуэнергетикалық ресурстарды үнемді пайдалану және тұрғындардың жайлылығын арттыру жөніндегі шешімдерді әзірлеуде пайдалануға мүмкіндік береді.

Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, инфрақызыл термографияны нормативтік талаптарға (ҚР ҚНжЕ, ГОСТ, ISO) сәйкес жылутехникалық есептеулермен үйлестіре отырып қолдану тұрғын үй қорының энергия тиімділігін арттыру бағытындағы шешімдерді негіздеу үшін тиімді құрал болып табылады. Алынған әдістемелік тәсілдер мен нәтижелер Семей қаласының ғана емес, Қазақстанның басқа да өңірлеріндегі ұқсас ғимараттарға энергетикалық аудит жүргізу тәжірибесінде қолданылуы мүмкін.

Әдебиеттер тізімі

1. СН РК 2.04-07-2022. Тепловая защита зданий (ҚР ҚН 2.04-07-2022 «Ғимараттардың жылу қорғанысы») [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=35669805&doc_id2=31741316#pos=1;-16&sel_link=1009335515 (дата обращения: 01.12.2025).

2. Қазақстан Республикасының 2012 жылғы 13 қаңтардағы № 541-IV «Энергия үнемдеу және энергия тиімділігін арттыру туралы» Заңы (өзгертулері мен толықтыруларымен) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://adilet.zan.kz/kaz/docs/Z1200000541 (дата обращения: 01.12.2025).

3. ГОСТ 30494-2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=31335849 (дата обращения: 01.12.2025).
4. ISO 50002:2014. «Аудит в области энергетики. Требования и руководство по его проведению» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=38306545 (дата обращения: 01.12.2025).
5. Республика Казахстан. РК 1.04-101-2012. Обследование и оценка технического состояния зданий и сооружений. – Астана: KAZGOR, 2015.
6. Романенко Е.Ю. Повышение энергетической эффективности ограждающих конструкций – путь повышения эффективности эксплуатации зданий и сооружений / Е.Ю. Романенко // Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 4. – С. 255-260.
7. Теребов Д.Н. Обследование зданий и сооружений / Д.Н. Теребов, Д.Н. Лазарев, Д.В. Зорин // Инновационная наука. – 2016. – № 4. – С. 174-176.
8. Морозов А.А. Обзор методик наблюдения за деформациями при инструментальном обследовании зданий и сооружений / А.А. Морозов, Л.А. Грибкова, В.Л. Шаповалов // Научные труды КубГТУ. – 2016. – № 8. – С. 64-74.
9. К вопросу обследования технического состояния гражданских зданий / Л.А. Сулейманова и др. // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2016. – № 7. – С. 32-36.
10. Krarti M. Energy Audit of Building Systems: An Engineering Approach / M. Krarti // 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2020. 658 p.
11. Capehart B.L. Guide to Energy Management / B.L. Capehart, W.C. Turner, W.J. Kennedy // 8th ed. Lilburn: Fairmont Press, 2016. – 630 p.
12. Thumann A. Handbook of Energy Audits / A. Thumann, W.J. Younger, T. Niehus // 9th ed. Lilburn: Fairmont Press, 2020. – 460 p.
13. Rossiter A.P. Energy Management and Efficiency for the Process Industries / A.P. Rossiter // Hoboken: Wiley, 2015. – 400 p.
14. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). Procedures for Commercial Building Energy Audits. 2nd ed. Atlanta: ASHRAE, 2011. – 162 p.
15. International Organization for Standardization (ISO). ISO 50002:2014. Energy audits – Requirements with guidance for use. Geneva: ISO, 2014. – 22 p.
16. Shapiro I.M. Energy Audits and Improvements for Commercial Buildings / I.M. Shapiro // Hoboken: Wiley, 2016. – 384 p.
17. Wulfinghoff D.R. Energy Efficiency Manual / D.R. Wulfinghoff // Energy Institute Press, 2000. – 1512 p.
18. Doty S. Commercial Energy Auditing Reference Handbook / S. Doty // 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2016. – 1102 p.
19. International Organization for Standardization (ISO). ISO/DIS 50002-1. Energy audits – Part 1: General requirements with guidance for use. Geneva: ISO, 2024.

References

1. SN RK 2.04-07-2022. Teplovaya zashchita zdanii (ҚR ҚN 2.04-07-2022 «Ғimarattardyң zhylu қorғanysY») [Ehlektronnyi resurs]. – Rezhim dostupa: https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=35669805&doc_id2=31741316#pos=1;-16&sel_link=1009335515 (data obrashcheniya: 01.12.2025). (In Russian).
2. Kazakstan Respublikasynyn 2012 zhylgy 13 kantardағgy № 541-IV «Ehnergiya ynemdeu zhane ehnergiya tiimdiligin arttyru turaly» Zany (ozgertuleri men tolyktyrularymen) [Ehlektronnyi resurs]. – Rezhim dostupa: https://adilet.zan.kz/kaz/docs/Z1200000541 (data obrashcheniya: 01.12.2025). (In Kazakh).
3. GOST 30494-2011. Zdaniya zhilye i obshchestvennye. Parametry mikroklimata v pomeshcheniyakh [Ehlektronnyi resurs]. – Rezhim dostupa: https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=31335849 (data obrashcheniya: 01.12.2025). (In Russian).
4. ISO 50002:2014. «Audit v oblasti ehnergetiki. Trebovaniya i rukovodstvo po ego provedeniYU» [Ehlektronnyi resurs]. – Rezhim dostupa: https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=38306545 (data obrashcheniya: 01.12.2025). (In Russian).

5. Respublika Kazakhstan. RK 1.04-101-2012. Obsledovanie i otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya zdanii i sooruzhenii. – Astana: KAZGOR, 2015. (In Russian).
6. Romanenko E.YU. Povyshenie ehnergeticheskoi ehffektivnosti ograzhdayushchikh konstruktsii – put' povysheniya ehffektivnosti ehkspluatatsii zdanii i sooruzhenii / E.YU. Romanenko // Inzhenernyi vestnik Dona. – 2013. – № 4. – S. 255-260. (In Russian).
7. Terebov D.N. Obsledovanie zdanii i sooruzhenii / D.N. Terebov, D.N. Lazarev, D.V. Zorin // Innovatsionnaya nauka. – 2016. – № 4. – S. 174-176. (In Russian).
8. Morozov A.A. Obzor metodik nablyudeniya za deformatsiyami pri instrumental'nom obsledovanii zdanii i sooruzhenii / A.A. Morozov, L.A. Gribkova, V.L. Shapovalov // Nauchnye trudy KuBGTU. – 2016. – № 8. – S. 64-74. (In Russian).
9. K voprosu obsledovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya grazhdanskikh zdanii / L.A. Suleimanova i dr. // Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova. – 2016. – № 7. – S. 32-36. (In Russian).
10. Krarti M. Energy Audit of Building Systems: An Engineering Approach / M. Krarti // 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2020. 658 p. (In English).
11. Capehart B.L. Guide to Energy Management / B.L. Capehart, W.C. Turner, W.J. Kennedy // 8th ed. Lilburn: Fairmont Press, 2016. – 630 p. (In English).
12. Thumann A. Handbook of Energy Audits / A. Thumann, W.J. Younger, T. Niehus // 9th ed. Lilburn: Fairmont Press, 2020. – 460 p. (In English).
13. Rossiter A.P. Energy Management and Efficiency for the Process Industries / A.P. Rossiter // Hoboken: Wiley, 2015. – 400 p. (In English).
14. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). Procedures for Commercial Building Energy Audits. 2nd ed. Atlanta: ASHRAE, 2011. – 162 p. (In English).
15. International Organization for Standardization (ISO). ISO 50002:2014. Energy audits – Requirements with guidance for use. Geneva: ISO, 2014. – 22 p. (In English).
16. Shapiro I.M. Energy Audits and Improvements for Commercial Buildings / I.M. Shapiro // Hoboken: Wiley, 2016. – 384 p. (In English).
17. Wulfinghoff D.R. Energy Efficiency Manual / D.R. Wulfinghoff // Energy Institute Press, 2000. – 1512 p. (In English).
18. Doty S. Commercial Energy Auditing Reference Handbook / S. Doty // 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2016. – 1102 p. (In English).
19. International Organization for Standardization (ISO). ISO/DIS 50002-1. Energy audits – Part 1: General requirements with guidance for use. Geneva: ISO, 2024. (In English).

Ж.К. Алдажуманов*, Е.Н. Мясоедова, Д.В. Мясоедов, К.С. Зарыкбаева, А.Е. Сатыбалдинова
Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки 20а
*e-mail: aldazhumanov.zhan@yandex.kz

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ АУДИТ ЖИЛОГО ДОМА В ГОРОДЕ СЕМЕЙ

В статье приведены результаты энергетического аудита многоквартирного жилого дома в городе Семей. В качестве объекта исследования выбран панельный жилой дом, расположенный по улице Физкультура, поскольку его фактическое потребление тепловой энергии выше, чем у аналогичных зданий, и на его фасадах наблюдаются визуальные признаки повышенных теплопотерь. Цель работы заключается в определении теплопотерь через ограждающие конструкции здания методом термографии и обосновании комплекса технических и организационных мероприятий, направленных на повышение его теплоэнергетической эффективности.

В качестве методов исследования использованы инфракрасная термография (с применением тепловизора Easir-9), теплотехнические расчёты и нормативные подходы к оценке годового расхода тепловой энергии. При проведении измерений учитывались наружная и внутренняя температура воздуха, коэффициент излучательной способности, расстояние до объекта и основные метрологические характеристики прибора. В результате в зонах стыков панелей, оконных проёмов, цокольной части и инженерных узлов были выявлены области концентрации «мостиков холода», которые вносят существенный вклад в общие теплопотери здания.

Предлагаемый комплекс энергосберегающих мероприятий включает дополнительное утепление фасадов, гидравлическую балансировку системы отопления, установку радиаторных терморегуляторов и внедрение приборов учёта тепловой энергии. Экономическая оценка показала, что реализация указанных мер позволяет сократить потребление тепловой энергии примерно на 15-20 % и снизить эксплуатационные расходы для собственников жилья. Практическая значимость работы заключается в предложении комплексного подхода, который может быть использован для реального жилого фонда, а также в формировании методической основы для аналогичных зданий в городе Семей и других городах Республики Казахстан.

Ключевые слова: *энергоаудит, энергосбережение, анализ тепловизионной съемки, теплоизоляция, автоматизация системы отопления.*

Zh. Aldazhumanov*, E. Myassoedova, D. Myassoedov, **K. Zarykbaeva, A. Satybaldinova**
Shakarim University,
071412, Republic of Kazakhstan, Semey, Glinka St. 20a
*e-mail: aldazhumanov.zhan@yandex.kz

ENERGY AUDIT OF A RESIDENTIAL BUILDING IN THE CITY OF SEMEY

The article presents the results of an energy audit of a multi-storey residential building in the city of Semey. The object of the study is a panel residential building located on Fizkultura Street, which was selected because its heat consumption is higher than that of similar buildings and visible signs of increased heat losses are observed on its façades. The aim of the work is to determine heat losses through the building envelope using thermographic techniques and to justify a set of technical and organizational measures aimed at improving its thermal and energy efficiency.

Infrared thermography (with an Easir-9 thermal imager), heat engineering calculations and normative approaches to estimating the annual heat consumption were used as the main research methods. During the measurements, the outdoor and indoor air temperatures, surface emissivity, distance to the object and the basic metrological characteristics of the instrument were taken into account. As a result, concentrated areas of thermal bridges were identified at panel joints, window openings, the plinth zone and engineering nodes, which make a significant contribution to the total heat losses of the building.

The proposed set of energy-saving measures includes additional façade insulation, hydraulic balancing of the heating system, installation of radiator thermostatic valves and implementation of heat metering devices. The economic assessment has shown that the implementation of these measures can reduce heat consumption by approximately 15-20% and decrease operation and maintenance costs for the residents. The practical significance of the study lies in providing a comprehensive approach that can be applied to the existing housing stock, as well as in forming a methodological basis for similar buildings in Semey and other cities of the Republic of Kazakhstan.

Key words: *energy audit, energy saving, thermal imaging analysis, thermal insulation, heating system automation.*

Авторлар туралы мәліметтер

Жан Касенович Алдажуманов* – техника ғылымдарының магистрі, «Техникалық физика және жылуэнергетика» кафедрасының аға оқытушы, Шәкәрім университеті, Қазақстан; e-mail: aldazhumanov.zhan@yandex.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-1683-1089.

Екатерина Николаевна Мясоедова – техника ғылымдарының магистрі, «Техникалық физика және жылуэнергетика» кафедрасының оқытушы, Шәкәрім университеті, Қазақстан; e-mail: Kate_white89@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-2142-3483.

Дмитрий Викторович Мясоедов – техника ғылымдарының магистрі, «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасының аға оқытушы, Шәкәрім университеті, Қазақстан; e-mail: dmitriy880@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-3279-0994.

Камшат Серикхановна Зарыкбаева – техника ғылымдарының магистрі, «Техникалық физика және жылуэнергетика» кафедрасының аға оқытушы, Шәкәрім университеті, Қазақстан; e-mail: kamshat.ru@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-8115-357X.

Айгерим Еркеновна Сатыбалдинова – техника ғылымдарының магистрі, «Техникалық физика және жылуэнергетика» кафедрасының оқытушы, Шәкәрім университеті, Қазақстан; e-mail: aigerimsemei@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-7610-9058.

Сведения об авторах

Жан Касенович Алдажуманов* – магистр технических наук, старший преподаватель кафедры «Техническая физика и теплоэнергетика», Шәкәрім университеті, Республика Казахстан; e-mail: aldazhumanov.zhan@yandex.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-1683-1089.

Екатерина Николаевна Мясоедова – магистр технических наук, преподаватель кафедры «Техническая физика и теплоэнергетика», Шәкәрім университеті, Республика Казахстан; e-mail: Kate_white89@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-2142-3483.

Дмитрий Викторович Мясоедов – магистр технических наук, старший преподаватель кафедры «Автоматизации и информационных технологий», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: dmitriy880@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-3279-0994.

Камшат Серикхановна Зарыкбаева – магистр технических наук, старший преподаватель кафедры «Техническая физика и теплоэнергетика», Шәкәрім университеті, Республика Казахстан; e-mail: kamshat.ru@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-8115-357X .

Айгерим Еркеновна Сатыбалдинова – магистр технических наук, преподаватель кафедры «Техническая физика и теплоэнергетика», Шәкәрім университеті, Республика Казахстан; e-mail: aigerimsemei@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-7610-9058.

Information about the authors

Zhan Aldazhumanov* – Master of of technical sciences, senior lecturer «Technical physics and thermal power engineering», Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: aldazhumanov.zhan@yandex.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-1683-1089.

Ekaterina Myassoedova – Master of of technical sciences, lecturer «Technical physics and thermal power engineering», Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: Kate_white89@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-2142-3483.

Dmitry Myassoedov – Master of of technical sciences, senior lecturer «Department of Automation and Information Technologies», Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: dmitriy880@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-3279-0994.

Kamshat Zarykbaeva – Master of of technical sciences, senior lecturer «Technical physics and thermal power engineering», Shakarim University of Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: kamshat.ru@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-8115-357X.

Aigerim Satybaldinova – Master of of technical sciences, lecturer «Technical physics and thermal power engineering», Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: aigerimsemei@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-7610-9058.

Редакцияға енуі 24.10.2025
Өңдеуден кейін түсуі 08.12.2025
Жариялауға қабылданды 15.12.2025

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-57

МРНТИ: 44.31.35

BY 4.0
Check for updates

А.Қ. Садықова[1*], А.К. Ниязбаев[2], М.Ж. Хазимов[1,2]
[1]Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева,
050013, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Байтурсынулы, дом 126/1
[2]Казахский национальный аграрный исследовательский университет,
050010, Республика Казахстан, г. Алматы, проспект Абая, дом 8
*e-mail: ai.sadykova@aues.kz

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ СОЕВОЙ ОКАРЫ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ТЕПЛОВОЙ ПРОЦЕСС ВИХРЕВОЙ СУШКИ

Аннотация: *В работе исследованы деформационные свойства соевой окары при различной влажности с использованием структурометра СТ-2. Установлены зависимости абсолютной деформации, относительной деформации, механического напряжения и модуля упругости от содержания влаги в образцах. Абсолютная деформация изменялась от 4,33 мм при влажности 28% до 17,04 мм при 76%, а относительная деформация – от 0,072 до 0,284 в тех же условиях. Значения модуля упругости изменялись в пределах от 6815 г/см² при 28% влажности до 1729 г/см² при 76%. Показано, что при влажности 40-56 % формируется оптимальное сочетание механической стабильности частиц и интенсивности теплопередачи, что обеспечивает снижение удельных энергозатрат на 8-12 % и устойчивость теплового режима. Полученные зависимости абсолютной и относительной деформации, механического напряжения и модуля упругости позволяют*

©А.Қ. Садықова, А.К. Ниязбаев, М.Ж. Хазимов, 2026

обосновать рациональные режимы вихревой сушки, что имеет практическую значимость для теплоэнергетических процессов обезвоживания пищевых материалов. Показано, что деформационные характеристики напрямую связаны с энергозатратами при вихревой сушке, влияя на равномерность тепломассообмена и эффективность использования тепловой энергии. Полученные результаты могут быть использованы при расчёте режимов вихревой сушки, для снижения затраты энергии тепломассообменных процессов и проектировании энергоэффективных сушильных установок.

Ключевые слова: *вихревая сушка, энергоэффективность, деформационные свойства, теплопередача, соевая окара, структурометр СТ-2.*

Введение

В мировой практике всё большее распространение получают методы интенсификации тепломассообменных процессов, основанные на управлении структурой потока, температурными градиентами и свойствами обрабатываемого материала. Среди таких методов особое внимание уделяется вихревой сушке, которая обеспечивает эффективное использование тепловой энергии за счёт развития турбулентности и повышения коэффициента теплопередачи. Однако при проектировании и эксплуатации вихревых систем остаются недостаточно исследованными вопросы влияния физико-механических свойств материала на устойчивость и энергоэффективность теплового режима [1, 2].

Современные направления прикладной теплоэнергетики ориентированы на разработку энергоэффективных технологий тепловой обработки дисперсных и капиллярно-пористых материалов. Одной из актуальных задач является повышение эффективности процессов сушки, которые сопровождаются значительными потерями тепла и высоким удельным энергопотреблением [3]. Важное значение имеют исследования, направленные на снижение расхода тепловой энергии при сохранении стабильности температурного режима и равномерности прогрева материала [4].

Особый интерес представляют процессы вихревой сушки, основанные на использовании закрученного потока горячего воздуха. Вихревой принцип организации теплообмена обеспечивает интенсивное испарение влаги и эффективное использование подводимого тепла за счёт развития турбулентности и увеличения коэффициента теплопередачи. Такие установки широко применяются для обезвоживания дисперсных биоматериалов и других высоковлажных масс [5].

Энергоэффективность вихревой сушки определяется не только параметрами теплоносителя, но и физико-механическими свойствами высушиваемого материала. Изменение влажности существенно влияет на его деформационные характеристики, пористость и теплопроводность, что в конечном итоге отражается на интенсивности тепломассообмена и равномерности прогрева [6, 7]. Однако данный аспект недостаточно изучен, что затрудняет разработку оптимальных режимов сушки и расчёт энергоэффективных конструкций сушильных установок [8].

В настоящей работе рассматривается влияние деформационных свойств соевой окары на энергоэффективность теплового процесса вихревой сушки [9, 10]. Окара использовалась как дисперсный материал растительного происхождения, характеризующийся капиллярно-пористой структурой, высокой влагоёмкостью и выраженными изменениями механических свойств при варьировании влажности [11].

Соевая окара обладает высоким содержанием влаги (80-85%), что делает ее нестабильной и не подходящей для длительного хранения. Для успешной интеграции соевой окары в различные производственные процессы необходимо снижение влажности до оптимального уровня [6]. Особое значение имеют деформационные характеристики материала, которые определяют механические энергозатраты на перемешивание и диспергирование частиц [12]. При высокой влажности окара пластична и легко вовлекается в поток, при низкой – жёсткая и требует повышенных энергозатрат на диспергирование. Таким образом, исследование зависимости деформационных свойств от влажности позволяет определить оптимальные режимы сушки и снизить суммарное энергопотребление [13, 14].

Для исследования деформационных свойств соевой окары метод структурометра СТ-2 представляет собой эффективный инструмент, обладая рядом значимых преимуществ [15, 16]. Его высокая точность измерений вязкости и пластичности материала обеспечивает надежные данные, необходимые для улучшения технологических процессов производства [17]. Простота использования структурометра СТ-2 делает его удобным выбором как для

научных исследований, так и для промышленных приложений, где требуется быстрое и точное измерение деформационных параметров [18].

В условиях вихревой сушки деформационные свойства дисперсного материала определяют характер его взаимодействия с закрученным потоком теплоносителя. Пластичность, модуль упругости и сопротивление деформации влияют на степень диспергирования частиц, формирование эффективной поверхности теплообмена, а также устойчивость вихревой структуры потока. Изменение механических свойств материала при варьировании влажности приводит к перераспределению тепловых и механических энергозатрат, что непосредственно отражается на теплоэнергетической эффективности процесса сушки.

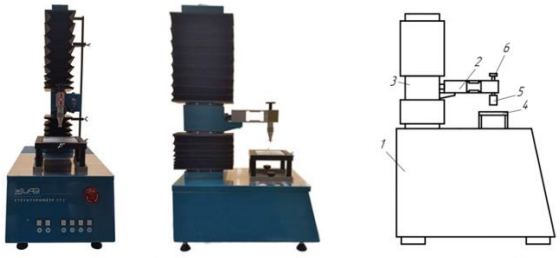
Полученные в настоящей работе результаты являются частью комплексных исследований, направленных на разработку и обоснование энергоэффективной технологии вихревой сушки соевой окары. На основе выявленных закономерностей деформационных свойств и их влияния на тепломассообмен была разработана и запатентована технологическая установка для сушки окары (патент на изобретение) [19].

Научная новизна данного исследования заключается в получении зависимостей механического напряжения, величины относительной деформации и модуля упругости от влажности соевой окары. Результаты исследования могут иметь значимость для разработки более эффективных и устойчивых методов предварительного обезвоживания до сушки путем центрифугирования или прессования. Так как в этих механических процессах обезвоживания полученные закономерности играет ключевую роль управлением режимов механизмов для снижения энергозатраты.

Цель исследования заключается в установлении закономерностей деформационных характеристик соевой окары при различной влажности и анализе их влияния на теплоэнергетическую эффективность процесса вихревой сушки.

Условия и методы исследования

Устройство прибора представляет собой: аналитический механизм с микропроцессорным управлением; идентор, создающий нагрузку на испытуемый объект; тензобалку и прикреплённый к ней тензодатчик, фиксирующий и измеряющий степень деформации объекта; съёмный столик для испытаний; регуляторы расположения тензодатчика; сменные насадки тензодатчика; кнопки ручного управления прибором, кнопку аварийного отключения, а также порты для кабеля питания и подключения к ПК. На рисунке 1 показаны конструкция и схема структурометра СТ – 2.



а – общий вид структурометра СТ-2; б – схема структурометра СТ-2;
1 – блок управления; 2 – тензобалка; 3 – штанга; 4 – столик для испытаний; 5 – идентор «цилиндр»;
6 – регуляторы расположения тензодатчика

Рисунок 1 – Структурометр СТ-2

Процесс исследования осуществляется благодаря: сравнению статистических показателей механической нагрузки на объект; измерений силы нагрузки и требуемых усилий для её осуществления (Измерения осуществляются благодаря тензодатчику и подключаемых к нему насадок-идентеров);

Процедура испытания структурометром СТ-2 проходит по методикам исследования двух типов:

– методики, в которых скорость фиксирована, и измеряет скорость перемещения идентеров в мм/с. Данные методики подходят для измерения жидкостей и степени их вязкости;

– методики, также подразумевающие фиксированную скорость, и замеряющие скорость нагружения в г/с, методики этого типа подходят для анализов, связанных с более твёрдыми веществами и показателями пластичности [20].

Для проведения исследования необходимо придерживаться следующего алгоритма:

1. Температура в помещении для анализа должна быть в диапазоне от 10 до 35°С, а относительная влажность воздуха не должна превышать 80% (при температуре 25°С).

2. Установить структурометр на устойчивом столе или столе, предусматривающем бетонной или гранитную платформу, а также обеспечить прибору защиту от попадания прямых солнечных лучей.

3. Подключить кабель питания, USB шнур для соединения с ПК, а также двусторонний кабель, соединяющий прибор и тензобалку.

4. Убедиться в том, что на ПК установлено необходимое программное обеспечение и драйверы структурометра.

Перед первым запуском прибора, а также в случаях замены идентора или тензодатчика, необходимо проводить калибровку. Калибровка структурометра осуществляется благодаря эталонной гире, входящей в комплект. Проведение калибровки осуществляется непосредственно в программе структурометра, а полный её процесс подробно описан в инструкции по эксплуатации.

Тестирование и анализ результатов происходит в автоматическом режиме на компьютере, который с помощью специального программного обеспечения управляет Структурометром СТ 2. Перед началом эксперимента был задан режим работы прибора. Выбор инструмента, приспособлений и подготовку образца осуществляют в соответствии с методическими указаниями. Для анализа в качестве инструмента был взят индентор «Цилиндр». Методика основана на определении общей, пластической и упругой деформаций соевой окары при сжатии его индентором «Цилиндр Ø36» со скоростью движения 0,5 мм/с после касания мякиша с усилием 7г до конечного усилия нагружения 500г, после чего начинается реверсивное движение индентора с той же скоростью движения до усилия в 7г.

Соевую окару плотно закладывали шпателем в цилиндрическую емкость (банку). Первоначальное значение высоты образцов, (h_0) – 60 мм. Емкость с соевой окарой помещают на столик строго по оси инструмента. После этого с помощью программного обеспечения стрелками «↑» и «↓» устанавливали столик в наиболее подходящее для проведения измерений положение. Затем после нажатия на кнопку «Старт» начинается автоматическое движение «Цилиндра», т.е. происходит погружение индентора в испытуемый образец. Программное обеспечение автоматически считывает показания прибора. После погружения и возврата индентора завершаем измерения нажатием кнопки «Стоп». После чего данные эксперимента сохраняются в виде таблицы и графиков. На рисунке 2 представлен Структурометр СТ-2 с индентором «Цилиндр».



Рисунок 2 – Структурометр СТ-2 с индентором «Цилиндр»

Данные на компьютер передаются в формате «*.xis», т.е. с расширением Microsoft Excel, что значительно упрощает обработку данных.

При использовании цилиндра образец нагружают с постоянной скоростью, а возникающую при этом силу измеряют как функцию высоты пробы *F(h)*. Для определения деформационных констант необходимо рассчитать механическое напряжение и относительную деформацию, возникающие при деформации образца.

Относительная деформация вычислялась по формуле:

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0}, \quad (1)$$

где ε – относительная деформация;

Δh – абсолютная деформация, мм;

h_0 – первоначальное значение высоты образов, мм.

Механическое напряжение определялось по формуле:

$$\sigma = \frac{F_{max}}{S}, \quad (2)$$

где σ – напряжение, г/см^2;

F_{max} – усилие нагружения, г;

S – площадь сечения цилиндрического индентера, см^2.

В зависимости от формулы (1) и (2) определили модуль упругости:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}, \quad (3)$$

где E – модуль упругости, г/см^2;

σ – напряжение, г/см^2;

ε – относительная деформация.

Для эксперимента были взяты 5 образцов соевой окары, с различной влажностью (рис. 3, б). Влажность исследуемого материала была определена перед каждым исследованием деформационных характеристик [21]. Партии исследуемых образцов предварительно подвергались к тепловой обработке путем изменения экспозиции времени для получения различной влажности образцов. Влажность определялась Анализатором влажности «Sartorius» (рис. 3, а) [21].



а) б)

а – анализатор влажности «Sartorius»; б – образцы соевой окары различной влажности

Рисунок 3 – Установка для определения влажности

Для количественной оценки влияния деформационных свойств соевой окары на теплоэнергетическую эффективность вихревой сушки был выполнен расчёт тепловых и механических составляющих энергозатрат при снижении влажности материала с 76% до 28%.

Масса испаряемой влаги при сушке определяется по выражению:

$$m_{вл} = W_1 - W_2, \quad (4)$$

где $m_{вл}$ – масса испаряемой влаги, кг;

W_1 – начальная массовая доля влаги, кг;

W_2 – конечная массовая доля влаги, кг.

Удельные тепловые затраты на испарение влаги рассчитываются по формуле:

$$Q_{исп} = m_{вл} \cdot r, \quad (5)$$

где $Q_{исп}$ – удельные тепловые затраты, кДж;

$m_{вл}$ – масса испаряемой влаги, кг;

r – удельная теплота парообразования воды, кДж/кг. $r = 2258$ кДж/кг.

Результаты и обсуждения

Деформационные характеристики материала отражают его микроструктурное состояние. Снижение модуля упругости и рост относительной деформации при увеличении влажности свидетельствуют о повышении пористости и ослаблении межчастичных связей, что согласуется с известными представлениями о поведении капиллярно-пористых биоматериалов при тепловой обработке [7, 8]. Микроструктурные изменения материала опосредованно отражаются в изменении его деформационных характеристик, что позволяет

использовать механические показатели как интегральные параметры структуры. Таким образом, механические испытания позволяют косвенно оценивать изменения микроструктуры без привлечения сложных методов визуализации.

При 76% влажности абсолютная деформация составила 17,04 мм, что соответствует относительной деформации 0,284. Модуль упругости при этом минимален – всего 1729 г/см², что указывает на высокую пластичность и податливость материала к нагрузке. Однако высокая влажность приводит к значительным тепловым затратам на испарение влаги, что снижает общую энергоэффективность. На рисунке 4 представлена зависимость деформации соевой окары от усилия при влажности 76%.

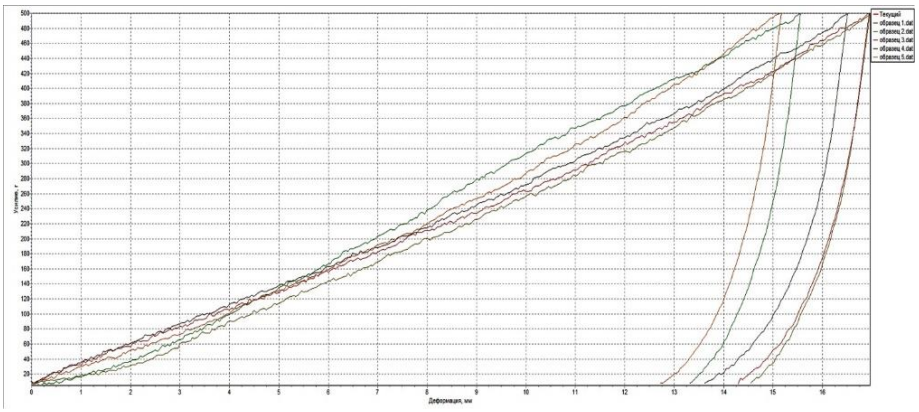


Рисунок 4 – Результаты определения деформационных характеристик соевой окары при влажности 76%

Для образцов с влажностью 64% абсолютная деформация достигла 16,91 мм, а относительная – 0,282. Модуль упругости составил 1742 г/см², что близко к показателям при 76%. Механические энергозатраты остаются низкими, но тепловая нагрузка немного снижается по сравнению с 76%. Такой режим ближе к оптимальному по совокупным энергозатратам. На рисунке 5 представлена зависимость деформации соевой окары от усилия при влажности 64%.

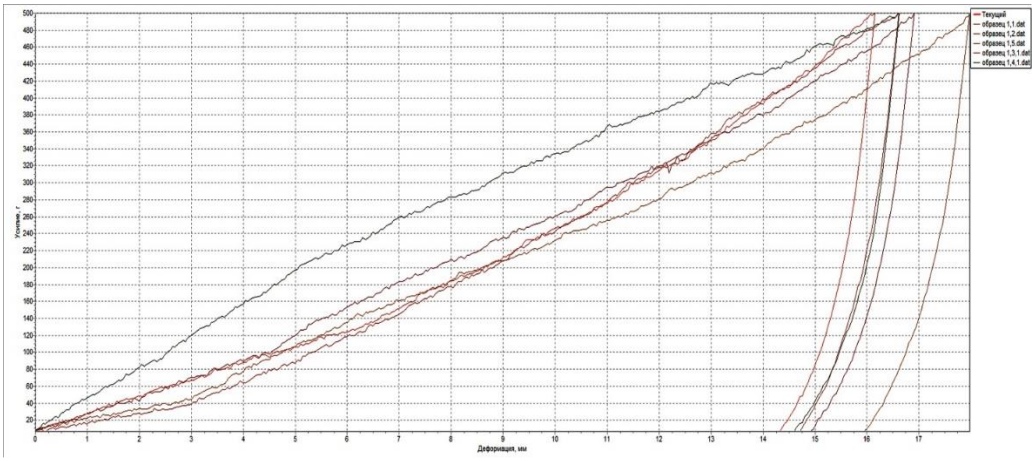


Рисунок 5 – Результаты определения деформационных характеристик соевой окары при влажности 64%

При снижении влажности до 56% абсолютная деформация составила 15,84 мм, относительная – 0,264, а модуль упругости увеличился до 1860 г/см². Соевая окара проявляет выраженные упругие свойства, возрастает сопротивляемость нагрузке, кривые нагружения становятся более крутыми. Это означает рост механических энергозатрат на перемешивание, однако при этом тепловая нагрузка снижается. На рисунке 6 представлена зависимость деформации соевой окары от усилия при влажности 56%.

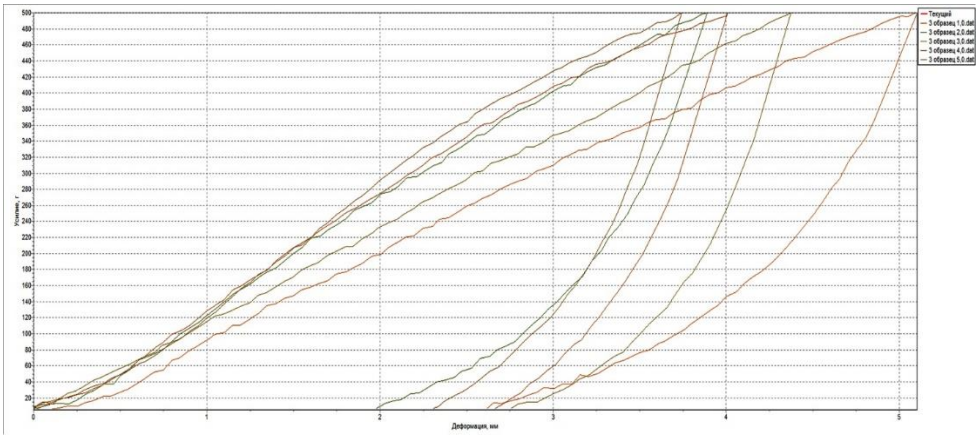


Рисунок 6 – Результаты определения деформационных характеристик соевой окары при влажности 56%

При влажности 40% зафиксирована абсолютная деформация 10,40 мм, относительная – 0,173. Модуль упругости вырос до 2837 г/см², что почти в 1,5 раза выше по сравнению с 56%. Материал становится жёстким, его структура уплотняется. Для вихревой сушилки это приводит к увеличению энергозатрат на перемешивание и диспергирование частиц. На рисунке 7 представлена зависимость деформации соевой окары от усилия при влажности 40%.

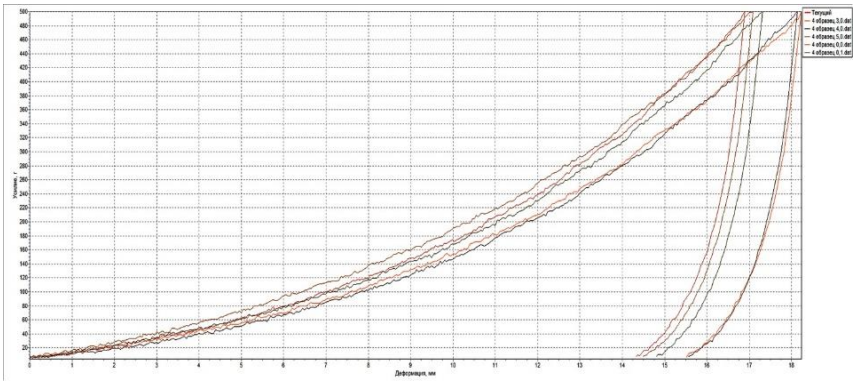


Рисунок 7– Результаты определения деформационных характеристик соевой окары при влажности 40%

Наименьшая влажность (28%) соответствует минимальной абсолютной деформации 4,33 мм и относительной деформации 0,072. При этом модуль упругости достиг максимального значения – 6815 г/см², что говорит о высокой жёсткости и низкой пластичности материала. Механические энергозатраты возрастают многократно, тепломассообмен нарушается. На рисунке 8 представлена зависимость деформации соевой окары от усилия при влажности 28%.

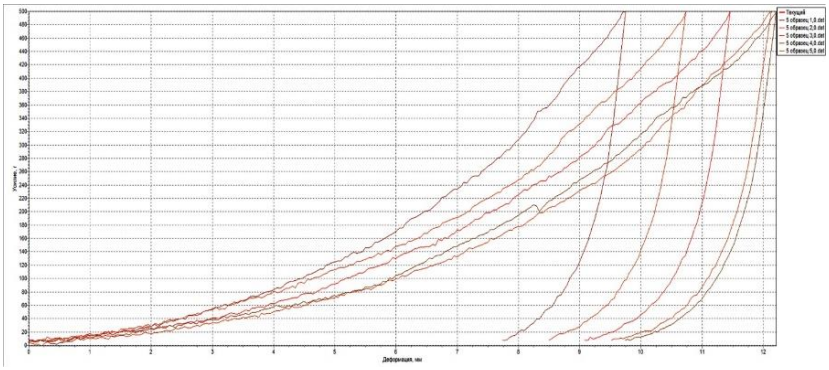


Рисунок 8 – Результаты исследования деформационных характеристик при влажности 28%

Вихревая сушка характеризуется интенсивным тепломассообменом, эффективность которого определяется устойчивостью вихревого движения и равномерностью распределения частиц в объёме сушильной камеры. При высокой влажности (64-76%) соевая окара обладает повышенной пластичностью и низким модулем упругости, что облегчает её вовлечение в поток и снижает механические энергозатраты. Однако при этом увеличивается тепловая нагрузка, связанная с испарением избыточной влаги.

При дальнейшем снижении влажности (до 28%) резкое увеличение модуля упругости приводит к росту сопротивления деформации, ухудшению диспергирования и нарушению равномерности тепломассообмена. Это вызывает увеличение как механических, так и тепловых энергозатрат, что снижает общую энергоэффективность вихревой сушки. Таким образом, при снижении влажности соевой окары с 76% до 28% 1084 кДж тепловой энергии на испарение влаги $Q_{\text{исп}}$ расходуется исключительно на фазовый переход влаги. В настоящей работе тепловая составляющая энергозатрат рассматривалась как энергия, необходимая для фазового перехода влаги при сушке материала. Механическая составляющая энергопотребления, связанная с деформацией, диспергированием и перемешиванием частиц в вихревом потоке, оценивалась качественно на основе изменения деформационных характеристик материала при различной влажности. Принятые допущения позволяют сопоставить вклад тепловых и механических факторов в общую энергоэффективность процесса вихревой сушки.

Установленные зависимости деформационных характеристик соевой окары от влажности имеют значение при проектировании и эксплуатации вихревых сушильных установок. В разработанной технологической установке для сушки соевой окары, защищённой патентом, деформационные свойства материала учитываются при выборе скорости закрученного воздушного потока, температуры теплоносителя и интенсивности механического воздействия.

В диапазоне влажности 40-56% обеспечивается оптимальное соотношение пластичности и упругости частиц, что способствует устойчивому вихревому режиму, равномерному распределению материала в сушильной камере и интенсификации тепломассообмена. При этом снижается вероятность агломерации частиц и уменьшаются механические потери энергии на диспергирование, что подтверждает снижение удельных энергозатрат на 8-12%. Указанный диапазон влажности является рациональным для вихревых сушильных аппаратов с интенсивным турбулентным режимом теплоносителя.

Таким образом, деформационные свойства соевой окары являются одним из ключевых факторов, определяющих теплоэнергетическую эффективность вихревой сушки, и должны учитываться при расчёте конструктивных и режимных параметров сушильных установок промышленного назначения.

В результате экспериментальных исследований установлена зависимость абсолютной и относительной деформаций материала от его влажности (рис. 9). Анализ полученных данных показывает, что с увеличением влажности материала наблюдается выраженный рост как абсолютной, так и относительной деформации, что свидетельствует о снижении жёсткости и увеличении податливости материала при увлажнении.

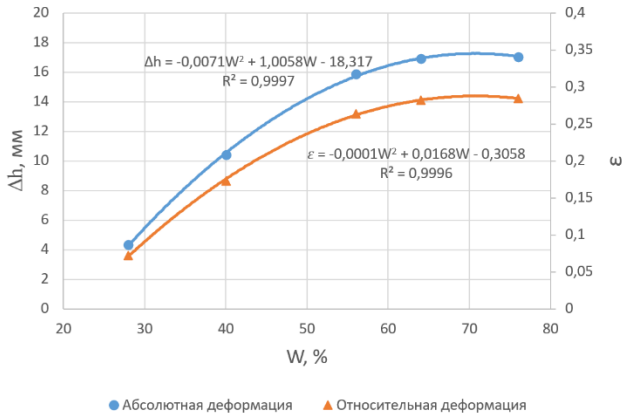


Рисунок 9 – Зависимость абсолютной и относительной деформаци соевой окары от влажности

Абсолютная деформация материала возрастает в диапазоне влажности от 28 до 64%, достигая максимальных значений порядка 16-17 мм. Дальнейшее увеличение влажности до 76% не приводит к существенному росту деформации, что указывает на тенденцию к стабилизации деформационных свойств.

Аналогичный характер изменения наблюдается и для относительной деформации. При увеличении влажности от 28 до 64% относительная деформация возрастает почти в три раза, после чего рост замедляется и переходит в стадию насыщения. Максимальные значения относительной деформации достигают порядка 0,26-0,28, что подтверждает значительное влияние влаги на структурное состояние материала.

В ходе экспериментальных исследований была установлена зависимость напряжения и модуля упругости материала от его влажности (рис. 10). Анализ экспериментальных данных показывает, что изменение влажности оказывает различное влияние на прочностные и упругие характеристики материала.

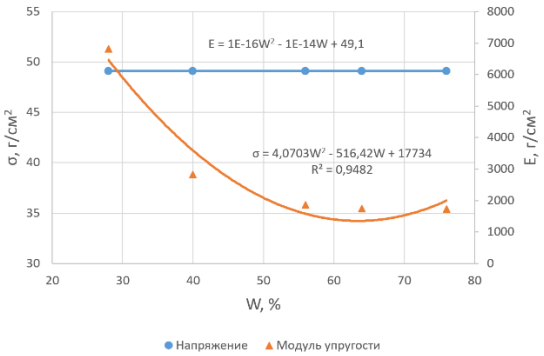


Рисунок 10 – Зависимость напряжения и модуля упругости соевой окары от влажности

Напряжение σ при нагрузке 500 г остаётся практически постоянным, что указывает на стабильность сопротивления материала в данных условиях.

В отличие от напряжения, модуль упругости демонстрирует выраженную зависимость от влажности материала. С увеличением влажности от 28 до 64% наблюдается резкое снижение модуля упругости более чем в два раза, что указывает на существенное уменьшение жёсткости материала под воздействием влаги. Минимальные значения модуля упругости достигаются при влажности 64%, после чего при дальнейшем увеличении влажности до 76 % отмечается незначительный рост данной характеристики. Повышение модуля упругости материала при снижении влажности приводит к изменению характера межфазного контакта частиц с теплоносителем, что отражается на интенсивности теплообмена и суммарных энергозатратах процесса вихревой сушки.

Совместный анализ напряжения и модуля упругости показывает, что при повышении влажности основное изменение механического поведения материала связано не с изменением предельных напряжений, а с уменьшением его упругой жёсткости. Это приводит к увеличению деформируемости материала при практически неизменных значениях напряжений, что согласуется с результатами анализа деформационных характеристик, представленными ранее. Полученные зависимости могут быть использованы при расчёте рациональных режимов вихревой сушки с целью повышения теплоэнергетической эффективности процесса. Экспериментальные исследования процесса сушки в вихревой сушилке являются предметом дальнейших исследований.

Заключение

Проведённые исследования показали, что деформационные характеристики соевой окары существенно зависят от её влажности. Можно сделать вывод, что энергия, затрачиваемая на перемещение и деформацию материала, перераспределяется, при низкой влажности она расходуется на преодоление упругих сил, а при высокой – на пластическую деформацию. Оптимальный диапазон влажности для вихревой сушки находится в области 40-56%, где достигается баланс между тепловыми и механическими затратами. Таким образом, повышение влажности приводит к росту деформационных характеристик и снижению жёсткости материала, что необходимо учитывать при выборе режимов сушки и

механической обработки, а также при разработке технологий получения пищевых порошков и комбинированных продуктов. Результаты исследования могут быть интегрированы в математические модели тепломассообмена, использованы при разработке сушильных установок, а также применены в промышленности для повышения энергоэффективности и устойчивости производственных процессов. Полученные экспериментальные зависимости использованы при разработке и патентовании технологической установки для вихревой сушки соевой окары. Результаты исследования представляют практический интерес для предприятий агропромышленного комплекса и могут быть использованы при проектировании и модернизации вихревых сушильных установок. Полученные зависимости были применены в рамках договорных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ с промышленным партнёром ТОО «AGRITECH».

Список литературы

1. Пиралишвили С.А. Вихревой эффект и интенсификация процессов тепло- и массообмена в элементах энергетической техники / С.А. Пиралишвили, С.В. Веретенников // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2011. – № 1(10). – С. 175-181.
2. He Y.-L. Advances and Outlooks of Heat Transfer Enhancement by Longitudinal Vortex Generators / Y.-L. He, Y. Zhang // Applied Thermal Engineering. – 2016. – Vol. 94. – P. 728-745.
3. Shrinkage properties of porous materials during drying / J. Li et al // Frontiers in Materials. – 2024. – Vol. 11. – Art. 1330599.
4. Niu Z. Investigation of Heat and Moisture Transfer during the Drying of Packed-Bed Porous Media in Soybeans / Z. Niu, X. Lu, Z. Li // Applied Sciences. – 2024. – Vol. 14(5), 1935. https://doi.org/10.3390/app14051935.
5. Pavlenko A. Heat and Mass Transfer in Hygroscopic Porous Media: Consequences of Invoking Tóth's Sorption Isotherm / A. Pavlenko // Transport in Porous Media. – 2023. – Vol. 148. – P. 137-156. https://doi.org/10.1007/s11242-023-01931-7.
6. Бабич А.А. Соя на корм / А.А. Бабич. – М.: Колос, 2000.–112 с.
7. Study on the Enhancement Mechanism of Heat and Moisture Transfer in Deformable Porous Media / P. Li et al // Processes. – 2023. – № 11(9). – P. 2699. https://doi.org/10.3390/pr11092699.
8. Drying of porous media by concurrent drainage and evaporation: A pore network modeling study / H. Wu et al // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2019. – Vol. 149. – P. 119158. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118718.
9. Enhancement of 3D mass and heat transfer within a porous ceramic heat exchanger by flow-induced vibration / R. Rzig et al // ACS Omega. – 2022. – Vol. 7, № 15. – P. 13280-13289. https://doi.org/10.1021/acsomega.2c00907.
10. Water status and predictive models of moisture content for soybean dregs during hot-air drying / T. Chen et al // Molecules. – 2022. – Vol. 27(14), Article 4421. https://doi.org/10.3390/molecules27144421.
11. Thermodynamic properties and drying kinetics of 'okara' / R.M. Guimarães et al // Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. – 2018. – Vol. 22, № 6. – P. 418-423. https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n6p418-423.
12. Хазимов К.М. Интенсификация процесса сушки продуктов растительного происхождения с использованием солнечной энергии // Диссертация на соискание ученой степени доктора философии (PhD), Казахский национальный аграрный университет, Алматы. 2015 http://www.kaznau.kz/page/dissovet/dissovet_2015/diss_khazimov.pdf.
13. Recundo-Cuenca A. Soybean seeds and its by-product okara as sources of dietary fibre / A. Recundo-Cuenca, MJ Villaneuva-Suárez, I. Mateos-Aparicio // Measurement by AOAC and Englyst methods. Food Chem. – 2008. – № 108. – P. 1099-1105.
14. Верфел, Д.Б. Получение соевого масла и шрота: пер. с англ.; под ред. В.В. Ключкина, М.Л. Доморощенковой / Д.Б. Верфел, Н.Х. Витт. – М.: Колос, 2014. – 81 с.
15. Hamdami N. Transport properties of a high porosity model food at above and sub-freezing temperatures / N. Hamdami, J.Y. Monteau, A. Le Bail // Part 2: Evaluation of the effective moisture diffusivity from drying data. Journal of Food Engineering. – 2004. – № 62. – P. 385-392.
16. Njie D.N. Thermal properties of cassava, yam and plantain / D.N. Njie, T.R. Rumsey, R.P. Singh // Journal of Food Engineering. – 1998. – № 37. – P. 63-76.

17. Доморощенкова М.Л. Современные технологии получения пищевых белков из соевого шрота / М.Л. Доморощенкова // Пищевая пром-сть. – 2001. – № 4. – С. 6-10.
18. Енкина В.Б. Соя / В.Б. Енкина. – М.: Колос, 1970.
19. Пат. 37358 Республика Казахстан. МПК F26B 3/02, F26B 9/06, F26B 21/00, F26B 23/00. Технологическая установка для сушки окары / Хазимов М.Ж., Погуляев А.Д., Хазимов К.М., Ниязбаев А.К., Садықова А.Қ. – Заявл. 13.03.2024; опубл. 19.09.2025, Бюл. № 38. – URL: https://gosreestr.kazpatent.kz/Invention/Details?docNumber=393987.
20. Иган Ж.П. Соя! Соя! Соя! Великолепные рецепты здорового питания: пер. с англ. С. Холоднова // Ж.П. Иган.– М.: ФАИР-ПРЕСС, 2002. – 160 с.
21. Садықова А.Қ. Определение деформационных характеристик соевой окары / А.Қ. Садықова, А.К. Ниязбаев, А.М. Калиев // Технико-технологическое обеспечение инноваций в агропромышленном комплексе. Материалы III Международной научно-практической конференции. Мелитополь, 2024. – С. 264-268.

References

1. Piralishvili S.A. Vikhrevoi ehffekt i intensifikatsiya protsessov teplo- i massoobmena v ehlementakh ehnergeticheskoi tekhniki / S.A. Piralishvili, S.V. Veretennikov // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aehrokosmicheskogo universiteta. – 2011. – № 1(10). – S. 175-181. (In Russian).
2. He Y.-L. Advances and Outlooks of Heat Transfer Enhancement by Longitudinal Vortex Generators / Y.-L. He, Y. Zhang // Applied Thermal Engineering. – 2016. – Vol. 94. – P. 728-745. (In English).
3. Shrinkage properties of porous materials during drying / J. Li et al // Frontiers in Materials. – 2024. – Vol. 11. – Art. 1330599. (In English).
4. Niu Z. Investigation of Heat and Moisture Transfer during the Drying of Packed-Bed Porous Media in Soybeans / Z. Niu, X. Lu, Z. Li // Applied Sciences. – 2024. – Vol. 14(5), 1935. https://doi.org/10.3390/app14051935. (In English).
5. Pavlenko A. Heat and Mass Transfer in Hygroscopic Porous Media: Consequences of Invoking Tóth's Sorption Isotherm / A. Pavlenko // Transport in Porous Media. – 2023. – Vol. 148. – R. 137-156. https://doi.org/10.1007/s11242-023-01931-7. (In English).
6. Babich A.A. Soya na korm / A.A. Babich. – M.: Kolos, 2000.–112 s. (In Russian).
7. Study on the Enhancement Mechanism of Heat and Moisture Transfer in Deformable Porous Media / R. Li et al // Processes. – 2023. – № 11(9). – R. 2699. https://doi.org/10.3390/pr11092699. (In English).
8. Drying of porous media by concurrent drainage and evaporation: A pore network modeling study / H. Wu et al // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2019. – Vol. 149. – P. 119158. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118718. (In English).
9. Enhancement of 3D mass and heat transfer within a porous ceramic heat exchanger by flow-induced vibration / R. Rzig et al // ACS Omega. – 2022. – Vol. 7, № 15. – P. 13280-13289. https://doi.org/10.1021/acsomega.2c00907. (In English).
10. Water status and predictive models of moisture content for soybean dregs during hot-air drying / T. Chen et al // Molecules. – 2022. – Vol. 27(14), Article 4421. https://doi.org/10.3390/molecules27144421. (In English).
11. Thermodynamic properties and drying kinetics of 'okara' / R.M. Guimarães et al // Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. – 2018. – Vol. 22, № 6. – P. 418-423. https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n6p418-423. (In English).
12. Khazimov K.M. Intensifikatsiya protsessa sushki produktov rastitel'nogo proiskhozhdeniya s ispol'zovaniem solnechnoi ehnergii // Dissertatsiya na soiskanie uchenoi stepeni doktora filosofii (PhD), Kazakhskii natsional'nyi agrarnyi universitet, Almaty. 2015 http://www.kaznau.kz/page/dissovet/dissovet_2015/diss_khazimov.pdf. (In Russian).
13. Recundo-Cuenca A. Soybean seeds and its by-product okara as sources of dietary fibre / A. Recundo-Cuenca, MJ Villaneuva-Suárez, I. Mateos-Aparicio // Measurement by AOAC and Englyst methods. Food Chem. – 2008. – № 108. – R. 1099-1105. (In English).
14. Verfel, D.B. Poluchenie soevogo masla i shrota: per. s angl.; pod red. V.V. Klyuchkina, M.L. Domoroshchenkovoi / D.B. Verfel, N.KH. Vitt. – M.: Kolos, 2014. – 81 s. (In Russian).

15. Hamdami N. Transport properties of a high porosity model food at above and sub-freezing temperatures / N. Hamdami, J.Y. Monteau, A. Le Bail // Part 2: Evaluation of the effective moisture diffusivity from drying data. Journal of Food Engineering. – 2004. – № 62. – R. 385-392. (In English).
16. Njie D.N. Thermal properties of cassava, yam and plantain / D.N. Njie, T.R. Rumsey, R.P. Singh // Journal of Food Engineering. – 1998. – № 37. – R. 63-76. (In English).
17. Domoroshchenkova M.L. Sovremennye tekhnologii polucheniya pishchevykh belkov iz soevogo shrota / M.L. Domoroshchenkova // Pishchevaya prom-st'. – 2001. – № 4. – S. 6-10. (In Russian).
18. Enkina V.B. Soya / V.B. Enkina. – M.: Kolos, 1970. (In Russian).
19. Pat. 37358 Respublika Kazakhstan. MPK F26B 3/02, F26B 9/06, F26B 21/00, F26B 23/00. Tekhnologicheskaya ustanovka dlya sushki okary / Khazimov M.ZH., Pogulyaev A.D., Khazimov K.M., Niyazbaev A.K., Sadyқova A.Қ. – Zayavl. 13.03.2024; opubl. 19.09.2025, Byul. № 38. – URL: https://gosreestr.kazpatent.kz/Invention/Details?docNumber=393987. (In Russian).
20. Igan ZH.P. Soya! Soya! Soya! Velikolepnye retsepty zdorovogo pitaniya: per. s angl. S. Kholodnova // ZH.P. Igan.– M.: FAIR-PRESS, 2002. – 160 s. (In Russian).
21. Sadyқova A.Қ. Opredelenie deformatsionnykh kharakteristik soevoi okary / A.Қ. Sadyқova, A.K. Niyazbaev, A.M. Kaliev // Tekhniko-tekhnologicheskoe obespechenie innovatsii v agropromyshlennom komplekse. Materialy III Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. Melitopol', 2024. – S. 264-268. (In Russian).

А.Қ. Садықова[1*], А.К. Ниязбаев[2], М.Ж. Хазимов[1,2]
[1]Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті,
050013, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Байтұрсынұлы көшесі, 126/1 үй
[2]Қазақ ұлттық аграрлық зерттеу университеті,
050010, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Абай даңғылы, 8 үй
*e-mail: ai.sadykova@aues.kz

СОЯ ОКАРАСЫНЫҢ ДЕФОРМАЦИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ ЖӘНЕ ОЛАРДЫҢ ҚҰЙЫНДЫҚ КЕПТІРУДІҢ ЖЫЛУ ҮДЕРІСІНЕ ӘСЕРІ

Бұл жұмыста соя окарасының әртүрлі ылғалдылық жағдайларындағы деформациялық қасиеттері СТ-2 құрылымометрінің көмегімен зерттелді. Үлгілердегі ылғал мөлшеріне байланысты абсолюттік деформация, салыстырмалы деформация, механикалық кернеу және серпімділік модулінің тәуелділіктері анықталды. Абсолюттік деформация 28% ылғалдылықта 4,33 мм-ден 76% кезінде 17,04 мм-ге дейін, ал салыстырмалы деформация – 0,072-ден 0,284-ке дейін өзгерді. Серпімділік модулі 28% ылғалдылықта 6815 г/см²-ден 76% кезінде 1729 г/см² аралығында болды. Ылғалдылық 40-56% болғанда бөлшектердің механикалық тұрақтылығы мен жылуөткізгіштіктің қарқындылығының оңтайлы үйлесімі қалыптасатыны анықталды, бұл меншікті энергия шығынын 8-12% төмендетіп, жылулық режимнің тұрақтылығын қамтамасыз етеді. Абсолюттік және салыстырмалы деформация, механикалық кернеу және серпімділік модулінің анықталған тәуелділіктері құйындық кептірудің ұтымды режимдерін негіздеуге мүмкіндік береді және тағамдық материалдарды сусыздандырудың жылуэнергетикалық үдерістерінде практикалық маңызға ие. Деформациялық сипаттамалар құйындық кептіру кезіндегі энергия шығынымен тікелей байланысты екені көрсетілді, бұл жылу-масса алмасудың біркелкілігіне және жылу энергиясын пайдалану тиімділігіне әсер етеді. Алынған нәтижелер құйындық кептіру режимдерін есептеу, жылу-масса алмасу үдерістеріндегі энергия шығынын азайту және энергия үнемдейтін кептіру қондырғыларын жобалау үшін пайдаланылуы мүмкін.

Түйін сөздер: *құйындық кептіру, энергия тиімділігі, деформациялық қасиеттер, жылуөткізгіштік, соя окарасы, СТ-2 құрылымометры.*

A.K. Sadykova[1*], A.K. Niyazbaev[2], M.Zh. Khazimov[1,2]
[1]Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeyev,
050013, Republic of Kazakhstan, Almaty, Baitursynuly Street, Building 126/1
[2]Kazakh National Agrarian Research University,
050010, Republic of Kazakhstan, Almaty, Abay Avenue, Building 8
*e-mail: ai.sadykova@aues.kz

STUDY OF THE DEFORMATION PROPERTIES OF SOY OKARA AND THEIR INFLUENCE ON THE HEAT PROCESS OF VORTEX DRYING

The deformation properties of soy okara at various moisture contents were studied using a Structurometer ST-2. The dependencies of absolute deformation, relative deformation, mechanical stress, and

modulus of elasticity on moisture content in the samples were established. The absolute deformation varied from 4.33 mm at 28% moisture to 17.04 mm at 76%, while relative deformation ranged from 0.072 to 0.284 under the same conditions. The modulus of elasticity ranged from 6815 g/cm² at 28% moisture to 1729 g/cm² at 76%. It was shown that at a moisture content of 40-56%, an optimal combination of particle mechanical stability and heat transfer intensity is achieved, resulting in an 8-12% reduction in specific energy consumption and improved thermal stability. The obtained dependencies of absolute and relative deformation, mechanical stress, and modulus of elasticity make it possible to justify rational vortex drying modes, which are practically significant for thermal energy processes of food material dehydration. It was demonstrated that deformation characteristics are directly related to energy consumption during vortex drying, affecting the uniformity of heat and mass transfer and the efficiency of heat utilization. The obtained results can be used to calculate vortex drying parameters, reduce energy consumption in heat and mass transfer processes, and design energy-efficient drying units.

Key words: *vortex drying, energy efficiency, deformation properties, heat transfer, soy okara, Structurometer ST-2.*

Сведения об авторах

Айкүміс Қанатқызы Садықова* – докторант кафедры «Теплоэнергетика» Алматинского университета энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, Республика Казахстан; e-mail: ai.sadykova@aues.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-9896-4822.

Адильхан Кизатоллинович Ниязбаев – PhD, ассоциированный профессор кафедры «Машиноиспользование» имени И.В. Сахарова Казахского национального аграрного университета, Республика Казахстан; e-mail: adil77@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6753-5489.

Марат Жалелович Хазимов – кандидат технических наук, профессор-преподаватель кафедры «Теплоэнергетика» Алматинского университета энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, профессор кафедры «Машиноиспользование» имени И.В. Сахарова Казахского национального аграрного университета, Республика Казахстан; e-mail: mkhazimov@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5448-3122.

Авторлар туралы мәліметтер

Айкүміс Қанатқызы Садықова* – Г. Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университетінің «Жылуэнергетика» кафедрасының докторанты, Қазақстан Республикасы; e-mail: ai.sadykova@aues.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-9896-4822.

Адильхан Кизатоллинович Ниязбаев – PhD, И.В. Сахаров атындағы Қазақ ұлттық аграрлық зерттеу университетінің «Машина пайдалану» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Қазақстан Республикасы; e-mail: adil77@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6753-5489.

Марат Жалелович Хазимов – техника ғылымдарының кандидаты, Г. Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университетінің «Жылуэнергетика» кафедрасының профессор-оқытушысы, И.В. Сахаров атындағы Қазақ ұлттық аграрлық зерттеу университетінің «Машина пайдалану» кафедрасының профессоры, Қазақстан Республикасы; e-mail: mkhazimov@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5448-3122.

Information about the authors

Aikumis Kanatkyzy Sadykova* – Doctoral student of the Department of Thermal Power Engineering, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeyev, Republic of Kazakhstan; e-mail: ai.sadykova@aues.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-9896-4822.

Adilkhan Kizatollinovich Niyazbayev – PhD, Associate Professor of the Department of Machine Utilization named after I.V. Sakharov, Kazakh National Agrarian Research University, Republic of Kazakhstan; e-mail: adil77@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6753-5489.

Marat Zhalelovich Khazimov – Candidate of Technical Sciences, Professor-Lecturer of the Department of Thermal Power Engineering, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeyev, and Professor of the Department of Machine Utilization named after I.V. Sakharov, Kazakh National Agrarian Research University, Republic of Kazakhstan; e-mail: mkhazimov@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5448-3122.

Поступила в редакцию 27.10.2025
Поступила после доработки 28.01.2026
Принята к публикации 30.01.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-58

МРНТИ: 29.19.22

А.Н. Шалаганова, О.А. Степанова, М.В. Ермоленко, А.Р. Хажидинова, Е.П. Евлампиева
Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А
*e-mail: m.ermolenko@shakarim.kz

ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ НА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МОДИФИЦИРОВАННЫХ АНТИФРИЗОВ – ОБЗОР

Аннотация: *В статье представлен научно-исследовательский обзор современных публикаций, посвященных теплофизическим свойствам антифризов и нанофлюидов на основе этиленгликоля, пропиленгликоля и глицерина, применяемых в теплоэнергетических и инженерных системах. Рассмотрены основные типы низкотемпературных теплоносителей, их температурные диапазоны эксплуатации, а также ключевые требования, предъявляемые к ним при использовании в условиях холодного климата, характерного для регионов с резко континентальными температурными условиями.*

Особое внимание уделено анализу влияния добавления наночастиц оксидов металлов и углеродных наноструктур (Al_2O_3, CuO, TiO_2, SiO_2, ZnO, CNT, графен) на теплопроводность, вязкость, плотность и удельную теплоемкость гликолевых теплоносителей. Согласно данным литературы отмечается, что введение наночастиц позволяет существенно повысить коэффициент теплопроводности и интенсивность теплопередачи, однако сопровождается увеличением вязкости, что может приводить к росту гидравлических потерь и энергозатрат на циркуляцию теплоносителя.

В рамках работы выполнен библиометрический анализ научных публикаций за период 2020–2025 гг., позволивший выявить ведущие страны и научные центры, активно развивающие данное направление исследований. Полученные результаты подтверждают перспективность использования наномодифицированных антифризов для повышения энергоэффективности теплотехнических систем и подчеркивают необходимость оптимального подбора состава и концентрации нанодобавок при их практическом применении.

Ключевые слова: *антифриз, нанофлюиды, теплофизические свойства, усиление теплопередачи, наночастицы, повышение энергоэффективности.*

Введение

В условиях совершенствования теплоэнергетического оборудования и внедрения энергосберегающих технологий тепловые нагрузки в системах технической физики, теплоэнергетики, холодильной и климатической техники неуклонно возрастают. В связи с этим к теплообменному оборудованию и используемым теплоносителям предъявляются повышенные требования, прежде всего в части теплофизических характеристик, эксплуатационной надежности и энергоэффективности. Решение данных задач напрямую связано с принципами устойчивого развития, направленного на рациональное использование энергии, уменьшение выбросов парниковых газов, снижению углеродного следа и повышению энергоэффективности.

Традиционные теплоносители, такие как вода и водные солевые растворы, не всегда обеспечивают требуемую интенсивность теплоотдачи. Кроме того, высокая температура кристаллизации воды (0 °C) и ее склонность к объемному расширению при замерзании существенно ограничивают применение водяных теплоносителей в холодильных установках и системах, эксплуатируемых в условиях отрицательных температур.

В этой связи актуальным является использование незамерзающих теплоносителей – антифризов, способных работать при отрицательных температурах и характеризующихся стабильными эксплуатационными свойствами. Особый интерес представляет модификация таких теплоносителей наночастицами высокотеплопроводных материалов, что позволяет рассматривать наножидкости как перспективное средство интенсификации процессов теплообмена.

©А.Н. Шалаганова, О.А. Степанова, М.В. Ермоленко, А.Р. Хажидинова, Е.П. Евлампиева, 2026

Целью данной обзорной статьи является анализ современных научных исследований, посвященных теплофизическим свойствам и тепловым характеристикам наножидкостей, а также оценка перспектив применения наномодифицированных теплоносителей для интенсификации процессов теплообмена в теплоэнергетических системах.

Методы исследования

Настоящая обзорная статья основана на систематическом анализе современных научных публикаций, посвященных исследованию теплофизических свойств и тепловых характеристик наножидкостей, а также оценке эффективности применения наномодифицированных теплоносителей для интенсификации теплообмена в теплоэнергетических системах.

Поиск и отбор литературных источников осуществлялся с использованием международных баз данных Scopus, Web of Science, обеспечивающих доступ к рецензируемым научным журналам. Анализируемые публикации охватывают временной период с 2008 по 2025 годы, что позволяет отразить современные тенденции и актуальное состояние исследуемой области.

В обзор включались научные публикации, соответствующие следующим критериям:

– статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах;

– работы, посвященные экспериментальным, теоретическим или численным исследованиям теплофизических свойств наножидкостей;

– исследования, рассматривающие применение наномодифицированных теплоносителей в теплоэнергетических и теплотехнических системах;

– публикации, содержащие количественные показатели теплофизических характеристик и эффективности теплообмена.

Отобранные публикации были систематизированы и проанализированы для выявления основных закономерностей влияния типа наночастиц, их концентрации и базовой жидкости на теплофизические свойства наножидкостей, а также определения наиболее перспективных направлений дальнейших исследований.

Результаты исследований

Антифризы представляют собой специализированные низкозамерзающие теплоносители, предназначенные для обеспечения стабильной работы отопительных, холодильных и климатических систем при отрицательных температурах. В отличие от автомобильных охлаждающих жидкостей, антифризы для инженерных систем имеют иной химический состав и набор присадок, рассчитанных на длительную циркуляцию, широкий диапазон рабочих температур и совместимость с материалами теплотехнического оборудования.

Основными требованиями к теплоносителям данного типа являются: низкая температура замерзания, высокая термическая стабильность, оптимальная вязкость, химическая инертность, антикоррозионная устойчивость, отсутствие склонности к пенообразованию, а также безопасность эксплуатации. Эти параметры определяют эффективность теплообмена, долговечность оборудования и стабильность теплотехнических процессов. Совокупность указанных характеристик определяет эффективность теплообмена, долговечность оборудования и стабильность теплотехнических процессов, что подтверждается результатами исследований физических свойств антифризов, представленных в работе А. Н. Кувшинова и соавторов [1].

Использование антифризов особенно актуально для климатических условий Казахстана, где температура воздуха в зимний период достигает от минус 30 до минус 45 °С [2], что делает эксплуатацию водяных теплоносителей рискованной. Антифризы предотвращают замерзание и разрушение трубопроводов, энергоагрегатов и теплообменных устройств, обеспечивая надежную работу инженерных систем в автономных и централизованных схемах [2].

Химическая классификация антифризов. Антифризы для инженерных систем могут быть классифицированы в зависимости от химического состава, природы базовой жидкости и типа ингибиторов коррозии. Наиболее широко применяются следующие типы теплоносителей:

Этиленгликолевые антифризы (EG). Этиленгликоль (HO–CH_2–CH_2–OH) – наиболее распространенная основа низкозамерзающих жидкостей. При смешивании с водой образует растворы, замерзающие при температуре до минус 65 °С. Основные характеристики:

- диапазон рабочих температур: (−30÷−65) °С;
- верхняя граница нагрева: (105÷110) °С;
- оптимальные концентрации: (40÷65) %.

Удельная теплоемкость водных растворов этиленгликоля при температуре 20 °С и концентрации (40÷50) % составляет в среднем (3,4÷3,7) кДж/(кг·К), что ниже теплоёмкости воды, но обеспечивает достаточную теплоаккумулирующую способность для большинства теплотехнических систем. Этиленгликолевые теплоносители характеризуются низкой стоимостью, стабильной работой при низких температурах и хорошими условиями теплообмена. Основным недостатком является токсичность, что ограничивает применение в жилых помещениях и системах горячего водоснабжения [2,3].

Пропиленгликолевые антифризы (PG). Пропиленгликоль (CH_3–CHOH–CH_2OH) является нетоксичным и безопасным теплоносителем, широко используемым в жилых зданиях, медицинских учреждениях, пищевой промышленности и автономных отопительных системах.

- диапазон рабочих температур: (−25÷−55) °С;
- верхняя граница нагрева: +120 °С;
- концентрации: (30÷50) %.

Удельная теплоемкость водных растворов пропиленгликоля при температуре 20°С и концентрации (40÷50) % составляет (3,6÷3,9) кДж/(кг·К), что на (3÷5) % выше, чем у этиленгликолевых растворов аналогичной концентрации. Преимуществом пропиленгликолевых антифризов является безопасность, экологичность, высокая совместимость с алюминием и полимерами, а недостатком – повышенная стоимость по сравнению с этиленгликолем [1, 2, 4].

Глицерин содержащие антифризы (GL). Глицериновые теплоносители представляют собой экологичные жидкости с удовлетворительными низкотемпературными свойствами. Они менее текучие, но устойчивы к разложению и безопасны для жилых помещений.

- диапазон работы: (−20÷−40) °С;
- температуры нагрева: до +105 °С.

Основной минус – высокая вязкость, требующая установки насосов повышенной мощности. Вязкость глицерин содержащих антифризов при концентрации (40÷50) % и температуре 20 °С в (4÷10) раз выше, чем у этиленгликолевых, и в (3÷6) раз выше, чем у пропиленгликолевых теплоносителей, что существенно ограничивает их применение в циркуляционных системах [2, 3].

Несмотря на значительное количество исследований, посвященных теплофизическим свойствам и тепловым характеристикам наножидкостей, остается недостаточно изученным вопрос влияния различных типов наночастиц на теплопроводность теплоносителя.

Одним из эффективных технологических подходов к повышению интенсивности теплообмена является введение в состав базового теплоносителя твердых наночастиц материалов с высокой теплопроводностью.

На рисунке 1 на основании данных [1-3] показаны различия в температурных диапазонах эксплуатации этиленгликолевых, пропиленгликолевых и глицериновых антифризов.

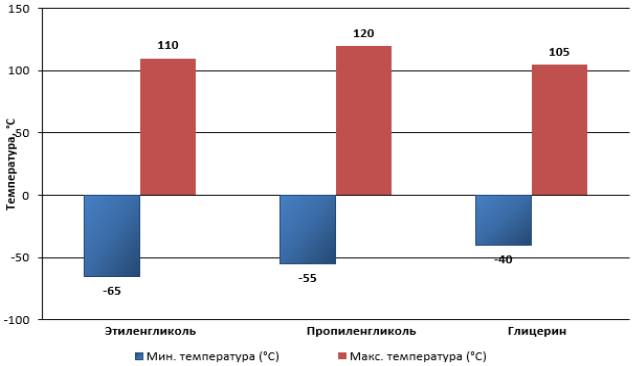


Рисунок 1 – Сравнение рабочих температур различных типов антифризов

Этиленгликоль характеризуется наибольшим диапазоном рабочих температур. Это делает их наиболее эффективными для применения в условиях сурового холодного климата. Пропиленгликолевые антифризы несмотря на худшие низкотемпературные свойства по сравнению с этиленгликолем, выигрывают за счёт более высокой термической стабильности. Глицериновые антифризы обладают ограниченным диапазоном применения вследствие высокой вязкости.

Использование нанофлюидов в современных технологиях началось с 1995 года, после введения понятия «нанофлюид» (nanofluid) ученым Choi S. U. S. [5].

Khlieva O.Ya., Ryabikin S.S. в своей статье отметили ряд преимуществ применения нанофлюидов в качестве теплоносителей по сравнению с использованием истинных растворов:

– при хорошей агрегативной стабильности наночастиц они обладают отличной сегментационной устойчивостью и находятся в жидкости в состоянии броуновского движения;

– нанофлюиды можно использовать в качестве теплоносителей в миниатюрных теплообменных устройствах без опасения засорения теплообменных поверхностей и каналов;

– несмотря на то, что вязкость нанофлюида обычно выше, чем базовой жидкости, потери напора при его циркуляции, отнесенные к переданному количеству теплоты, будут ниже, поскольку интенсивность передачи тепла за счет использования нанофлюидов существенно возрастает;

– свойства нанофлюидов (прежде всего вязкость и теплопроводность) можно регулировать, подбирая требуемую концентрацию наночастиц в базовой жидкости [6].

Наножидкости считаются перспективным способом улучшения теплопередающей способности базовых жидкостей, что подтверждается исследованиями в области применения нанотехнологий для интенсификации теплообмена. Результаты многочисленных научных работ показывают, что добавление наночастиц в теплоносители приводит к увеличению теплопроводности и коэффициента теплоотдачи, что делает наножидкости эффективным средством повышения энергоэффективности теплотехнических и энергетических систем [7-13].

В работе Харисова И.Д. и Осинцева К.В. показано, что введение наночастиц в теплоносители позволяет повысить их теплопроводность и коэффициент теплоотдачи, тем самым интенсифицируя процессы теплообмена и улучшая энергетическую эффективность теплотехнических систем [14].

В статье Sekrani G., Poncet S. предлагается обширный обзор самых последних и актуальных экспериментальных и численных работ по изучению теплофизических свойств и характеристик наножидкостей на основе этилена или пропиленгликоля [15]. В исследовании Krishnan S.S.J., Manjakuppam M. рассмотрены проблемы в исследовании наножидкостей, а также перспективы их дальнейшего изучения, обусловленные долгосрочной целью расширения областей применения наножидкостей [16].

Исследования в этой области обобщены в таблице 1

Проведенный обзор научных публикаций показывает, что введение наночастиц в базовые теплоносители (вода, этиленгликоль, пропиленгликоль) позволяет существенно улучшить их теплофизические свойства. Наиболее эффективными являются наночастицы меди, оксида алюминия, оксида меди и углеродных нанотрубок. В работах отмечано, что рост теплопроводности может достигать 150 %, однако он существенно зависит от концентрации, размера и формы наночастиц, температуры и режима течения. Антифризы на основе этилена- и пропиленгликоля с нанодобавками представляют особый интерес для применения в условиях холодного климата Казахстана, обеспечивая повышение энергоэффективности теплотехнических систем.

Исследование Mirsafi F.S., Zaheer M.U., а также 18 Wang X.Q., Mujumdar A.S. показывают, что использование наножидкостей в качестве охлаждающей жидкости существенно влияет на величину коэффициента теплопередачи [17-18]. Наножидкости, содержащие металлы, оксиды металлов, карбиды, углеродные наноструктуры (CNT, графен и др.), демонстрируют улучшенные теплопередающие свойства и высокую стабильность [17-22].

Таблица 1 – Обзор литературы по наночастицам в теплоносителях

Авторы	Наночастицы	Базовая жидкость	Влияние на теплофизику	Рост теплопроводности	Основные выводы	Работа
Choi S.U.S.	Al_2O_3 CuO, ZnO, TiO_2, SiO_2	вода	повышение теплопроводности	до 40%	введено понятие нанофлюидов	[5]
Khlieva O.Ya., Ryabikin S.S.	Al_2O_3	антифриз	рост теплоотдачи и вязкости	до 25 %	зависимость от концентрации и формы	[6]
Дудинских С.В., Шеремет Е.О.	Al_2O_3, TiO_2	вода, антифриз	рост теплоотдачи в системах отопления	до 20 %	применение в отоплении	[7]
Ajith K., Brusly S.A., Sharifpur M.	металлооксиды	вода, EG, PG	рост теплопроводности и теплоотдачи	(10÷60) %	механизмы усиления теплообмена	[10]
Das S.K., Choi S.U.S., Patel H.E.	Al_2O_3,CuO	вода	улучшение теплообмена	до 40 %	основы теплопереноса	[12]
Харисов И.Д., Осинцев К.В.	наночастицы	вода	интенсификация теплообмена	до 30 %	подтверждена эффективность нанотехнологий	[14]
Sekrani G., Poncet S.	Al_2O_3, CuO, ZnO, TiO_2	EG, PG	улучшение теплообмена	(10÷60) %	перспективны для энергетики	[15]
Mirsafi F.S., Zaheer M.U	Металлы, оксиды, углеродные наноструктуры	вода, EG, PG	повышение эффективности охлаждения	(20÷100) %	наножидкости в системах охлаждения	[17]
Wang X.Q., Mujumdar A.S.	Металлы, CNT (углеродные нанотрубки)	вода	улучшение теплоотдачи	до 150 %	зависимость от условий	[18]
Mohite D.D., Goyal A., Londhe P.V.	Al_2O_3,TiO_2, CuO, ZnO и углеродные наноструктуры	вода, EG, PG	улучшение тепловых характеристик	(10÷60) %	технический обзор наножидкостей	[19]
Suganthi K.S., Rajan K.S.	Металлооксиды	вода, EG, PG	свойства и эффективность	(10÷50) %	металлооксидныена ножидкости	[20]
Rani C.V., Kumar P.	(TiO_2+ CuO, Al_2O_3+ ZnO)	вода, EG, PG	улучшение теплопередачи	(15÷70) %	обзор наночастиц и эффектов	[21]
Shimchuk N.A., Geller V.Z.	Металлооксиды	вода	нелинейный рост теплопроводности	До 50 %	влияние температуры и концентрации	[24]
Гирфанова В.В., Велькин В.И.	Al_2O_3	вода, EG	оптимизация теплоснабжения	до 25 %	эффект зависит от концентрации	[27]
Бондаренко Б.И.	металлооксиды	вода	улучшение теплофизических свойств	(15÷40) %	наножидкости перспективны для энергетики	[28]
Bello A. N., Abdulkareem A. S.	Al_2O_3, TiO_2, CuO, CNT	вода, EG, PG	улучшение теплообмена	(10÷60) %	системный обзор наноохладителей	[29]
Морозова М.А.	Al_2O_3, SiO_2, TiO_2	вода, EG, PG	теплопроводность и вязкость	(5÷35) %	закономерности эесперимента	[31]
Слободина Е.Н. и др.	Al_2O_3	вода	интенсификация теплообмена	до 30 %	подтверждение расчётных моделей	[32]
Yu W. et al.	металлы, оксиды	вода	рост теплопроводности	(10÷50) %	анализ результатов эксперимента	[33]
Pastoriza-Gallego M.J., Lugo L.	Al_2O_3	EG	рост теплопроводности и вязкости	(8÷30) %	результаты экспериментов	[40]
Zhang L., Sun J., Qu P.	Cu	PG/EG	комплексная теплоотдача	(60÷120) %	Cu-нанофлюиды оптимальны	[42]
Rudyak V.Y., Minakov A.V.	Al_2O_3, CuO, ZnO, TiO_2, SiO_2	вода	изменение вязкости и теплопроводности	(15÷30) %	режим течения	[44]
Ignatowicz M., Palm B.	виды наночастиц не указаны	EG, PG	изменение теплоемкости	(5÷15) %	актуально для тепловых насосов	[45,46]
Kusain A.K., Kasymov A.B.	Al_2O_3	EG/вода (60:40)	улучшение теплофизических свойств	до 27%	оптимальная концентрация наночастиц 3 %	[48]
Касымов А., Адылканова А.	TiO_2 + CuO, ZnO, Al_2O_3 (гибрид)	EG, PG	улучшение теплофизических свойств	14 %	влияние гибридных добавок	[49]

Существсвует большое количество научных работ по исследованию воздействия наночастиц на теплопроводность теплоносителей [5, 23-30]. Обзор представленных работ позволяет сделать вывод, что добавки нанометаллов (оксиды металлов, металлы и углеродные нанотрубки) могут приводить как к существенному (до 150 %) так и к незначительному (примерно на 1 %) увеличению теплопроводности базовой жидкости.

Теплофизические свойства наножидкостей. Для более глубокого понимания эффективности применения наножидкостей в качестве теплоносителей и охлаждающих сред необходимо детально рассмотреть их основные теплофизические свойства, к которым относятся теплопроводность, динамическая вязкость, плотность и удельная теплоемкость. Указанные параметры в значительной степени определяют интенсивность теплообмена, гидродинамические характеристики потока и энергетическую эффективность теплоэнергетических систем. Существенный вклад в данное направление внесён в диссертационной работе М.А. Морозовой, где подробно изучены теплопроводность и вязкость наножидкостей с различными типами наночастиц, а также проанализировано влияние их концентрации, температуры и характеристик дисперсной фазы на теплофизические свойства теплоносителей [31].

Анализ литературных источников показывает, что в последние годы опубликовано значительное количество экспериментальных и теоретических работ, посвященных исследованию теплофизических свойств наножидкостей [32-35], в том числе и на основе этиленгликоля (EG) и пропиленгликоля (PG) [19, 36-40]. Обобщающие обзоры, выполненные Sekrani G. и Poncet S. охватывают исследования плотности, удельной теплоемкости и теплопроводности наножидкостей, а также анализируют влияние типа базовой жидкости и природы наночастиц на указанные свойства [15].

Теплопроводность. Одним из ключевых факторов, определяющих перспективность наножидкостей, является увеличение коэффициента теплопроводности по сравнению с базовыми теплоносителями. В ряде исследований показано, что введение наночастиц оксидов металлов и углеродных наноструктур приводит к существенному росту теплопроводности, величина которого зависит от концентрации, размера и формы наночастиц, а также от температуры рабочей среды.

Satti J.R., Das D.K. и Ray D.R. установили, что повышение теплопроводности наножидкостей на основе пропиленгликоля может быть достигнуто (8÷35) % как за счет увеличения концентрации наночастиц, так и при повышении температуры. Кроме того, по мере увеличения диаметра наночастиц наблюдается рост коэффициента теплопроводности наножидкости [41].

Исследования Khlieva O.Ya., Ryabikin S.S. показали, что добавки наночастиц Al_2O_3 приводят к увеличению теплопроводности до 25 % по сравнению с базовой жидкостью, причем эффект усиливается с ростом концентрации нанодобавок [6]. Аналогичные выводы представлены в работах Zhang L., Sun J. и Qu P., где установлено, что наножидкости на основе Cu–пропиленгликоль–вода и Cu–этиленгликоль–вода демонстрируют наилучшие показатели комплексной теплопередачи [42].

На рисунке 2 представлена сравнительная характеристика влияния различных типов наночастиц (Al2O3, CuO, TiO2, SiO2, ZnO) на относительное увеличение теплопроводности базовой жидкости. Анализ графический данных показывает, что оксидные наночастицы обеспечивают умеренный, но стабильный рост теплопроводности, что подтверждает целесообразность их использования в теплоэнергетических системах.

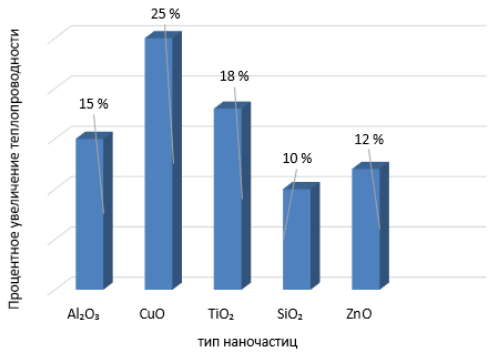


Рисунок 2 – Влияние различных типов наночастиц на теплопроводность теплоносителя

Вязкость. Динамическая вязкость является важнейшей характеристикой наножидкостей, определяющей гидродинамическое сопротивление потока и энергетические затраты на циркуляцию теплоносителя. Анализ экспериментальных данных свидетельствует

о том, что введение наночастиц, как правило, приводит к увеличению вязкости по сравнению с базовой жидкостью.

Согласно обобщённым экспериментальным данным, представленным в работе Mahbubul I.M., Saidur R., Amalina M.A, введение наночастиц, как правило, приводит к увеличению вязкости наножидкости по сравнению с базовой жидкостью в среднем на (10÷40) % при объёмных концентрациях частиц до (1÷2) %, при этом для более высоких концентраций рост вязкости может достигать (50÷100) %. Также отмечается, что повышение температуры приводит к снижению динамической вязкости наножидкостей на (20÷60) % в зависимости от состава и диапазона температур [43].

В работе Khlieva O.Ya., Ryabikin S.S. отмечено, что вязкость наножидкостей возрастает до (20÷25) % при увеличением концентрации наночастиц, а также зависит от их формы, размера и наличия поверхностно-активных веществ в составе нанофлюида [6].

В статье Rudyak V.Y., Minakov A.V. установлено, что увеличение вязкости наножидкостей примерно на (20÷80) % связано с уменьшением размера наночастиц, тогда как рост теплопроводности до 30 % соотносится с увеличением их характерных размеров. Исследование показало, что коэффициент теплопередачи определяется режимом течения наножидкости (ламинарный или турбулентный) [44].

Сравнительный анализ наножидкостей на основе EG и PG показывает, что системы на основе пропиленгликоля, как правило, характеризуются более высокой вязкостью, что может ограничивать их применение при высоких скоростях течения и требует оптимизации концентрации наночастиц.

Плотность и удельная теплоемкость. Плотность и удельная теплоемкость наножидкостей оказывают влияние на теплоаккумулирующую способность теплоносителя и расчет тепловых нагрузок в теплоэнергетических системах. Исследования Satti J.R., Das D.K. и Ray D.R. показали, что плотность наножидкостей на основе пропиленгликоля не зависит от размера наночастиц, однако увеличивается с ростом их концентрации и уменьшается при повышении температуры [41].

На рисунке 3 приведено сравнение теплофизических свойств наножидкостей на основе этиленгликоля и пропиленгликоля, модифицированных наночастицами оксидов металлов. Из представленных данных следует, что наножидкости на основе EG обладают более высокой теплопроводностью, тогда как системы на основе PG характеризуются повышенной вязкостью, что необходимо учитывать при выборе теплоносителя для теплоэнергетических установок.

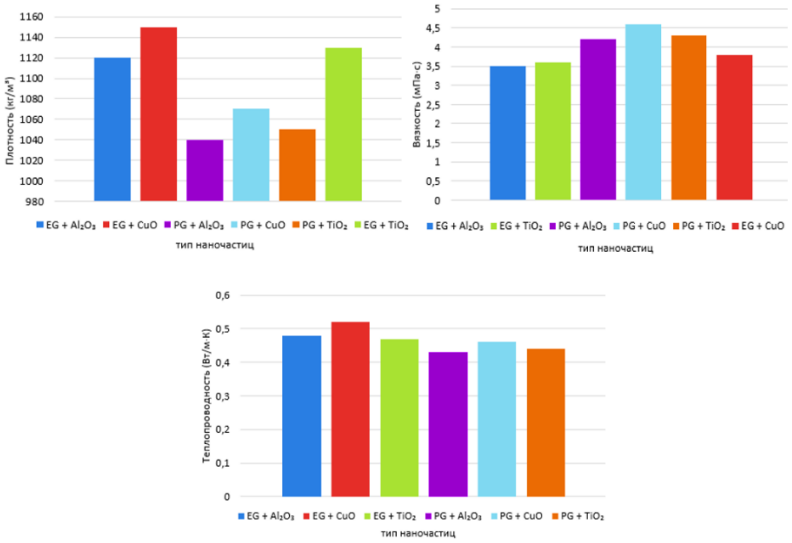


Рисунок 3 – Сравнение теплофизических свойств наножидкостей на основе разных базовых жидкостей (EG, PG)

В работах Ignatowicz M. и Palm B. выполнены детальные исследования теплофизических свойств растворов этиленгликоля и пропиленгликоля при низких температурах, характерных для холодильных и тепловых насосных установок. Авторы показали, что использование растворов с заданной температурой замерзания (−5÷−50 °C) позволяет более корректно оценить эксплуатационные свойства теплоносителей [45, 46].

Дополнительные данные по плотности, вязкости, теплопроводности и теплоемкости нанотеплоносителей на основе растворов пропиленгликоль/вода с добавками наночастиц TiO_2 представлены в работе [47]. Экспериментальные результаты демонстрируют хорошее согласование с теоретическими моделями, что подтверждает достоверность полученных зависимостей [42, 48].

Результаты исследований Kasymov A., Adylkanova A., Bektemissov A показали, что все наножидкости демонстрируют улучшенную теплопроводность (максимально ~14 %), повышение вязкости (максимально ~140 %) относительно чистой воды [49].

На рисунке 4 показана картограмма географического распределения научных публикаций по тематике теплофизических свойств нанофлюидов и антифризов на основе этиленгликоля, пропиленгликоля и глицерина. Визуализация выполнена с использованием геоинформационной системы QGIS 3.44.7 [50] и отражает пространственную структуру научной активности по странам за период 2020-2025 гг., на основе публикаций, отобранных по ключевым словам.

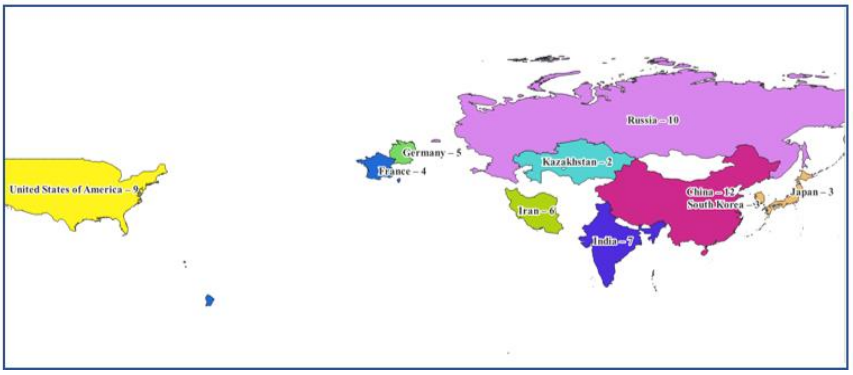


Рисунок 4 – География научных исследований в области теплофизических свойств наножидкостей

Числа на карте показывают количество публикаций по странам. Лидером является Китай (12 публикаций), за ним идут Россия (10) и США (9). Значительный вклад также внесли Индия (7) и Иран (6). Германия (5) и Франция (4) демонстрируют умеренную активность, а Япония и Южная Корея (по 3 публикации) сосредоточены на специализированных исследованиях. Казахстан представлен 2 публикациями, что указывает на имеющийся интерес к теме в регионе.

Следует отметить, что картограмма основана на библиометрических данных, полученных в результате анализа научных баз данных (Scopus, Web of Science, Google Scholar и др.). В список литературы настоящей статьи включены наиболее значимые публикации, непосредственно используемые для анализа, методического обоснования и обсуждения результатов.

Картограмма служит инструментом обобщенного анализа научной активности и выявляет ведущие страны и регионы с перспективами развития в области нанофлюидов.

Обсуждение научных результатов

Проведенный анализ теплофизических свойств антифризов и наножидкостей на их основе подтверждает перспективность использования гликолевых теплоносителей, модифицированных наночастицами, для повышения эффективности теплопередачи, особенно в условиях холодного климата.

Согласно данным, представленным в научной литературе этиленгликолевые антифризы обладают наилучшими низкотемпературными характеристиками – минимальная температура эксплуатации достигает минус 65°С, максимальная рабочая температура составляет около 110°С. Однако их применение ограничено токсичностью. Пропиленгликоль демонстрирует более высокий уровень эксплуатационной безопасности при несколько худших теплофизических показателях: минимальная температура составляет около минус 55°С, а максимальная достигает 120°С. Глицерин характеризуется повышенной вязкостью – в (4÷10) раз выше, чем у этиленгликолевых, и в (3÷6) раз выше, чем у пропиленгликолевых теплоносителей, что снижает его практическую эффективность без дополнительной оптимизации состава.

Анализ литературных данных показал, что введение наночастиц (Al2O3, CuO, TiO2, SiO2, ZnO) в базовые теплоносители приводит к увеличению теплопроводности в диапазоне от 1% до 150% и интенсификации теплообмена. При этом величина эффекта определяется концентрацией, размером и материалом наночастиц, а также температурой рабочей среды. Наиболее выраженный рост теплопроводности (до 60%) характерен для нанофлюидов на основе этиленгликоля и пропиленгликоля, а максимальное улучшение теплоотдачи может достигать 150% в зависимости от условий.

Вместе с тем в ряде публикаций отмечается, что повышение теплопроводности сопровождается ростом динамической вязкости, который варьируется в пределах (10÷40)%, что может приводить к увеличению гидравлических потерь. Данный фактор ограничивает практическое применение наножидкостей и требует оптимального выбора концентрации наночастиц и режима течения.

Обзор научных исследований показывает, что плотность наножидкостей в основном определяется температурой и массовой долей наночастиц, что упрощает инженерные расчеты. Библиометрический анализ за период 2020-2025 гг., визуализированный с использованием QGIS, выявил наибольшую научную активность в Китае, России и США, при сравнительно меньшем числе публикаций из Казахстана, что указывает на потенциал дальнейших исследований в данном направлении.

В целом результаты подтверждают, что наномодифицированные антифризы на основе этилена- и пропиленгликоля являются перспективными теплоносителями, однако их практическое внедрение должно учитывать баланс между ростом теплопроводности и увеличением вязкости.

Заключение

Проведенный обзор современных экспериментальных и теоретических исследований показал, что модификация традиционных теплоносителей наночастицами металлов, оксидов металлов и углеродных наноструктур позволяет существенно улучшить их теплофизические свойства и повысить интенсивность теплообмена. Анализ публикаций свидетельствует о том, что наибольший эффект достигается при использовании наночастиц Al_2O_3, CuO, TiO_2, SiO_2, ZnO, CNT, графена (углеродные нанотрубки) рост теплопроводности может достигать (30÷60)%, а в отдельных экспериментальных условиях – до 150%.

Обобщение представленных в литературе данных показывает, что величина эффекта существенно зависит от концентрации, размера и формы наночастиц, температуры и режима течения, а также от типа базовой жидкости. Наножидкости на основе этилена- и пропиленгликоля представляют особый интерес для эксплуатации в условиях холодного климата Казахстана, обеспечивая работоспособность при температурах до (-55 ÷-65)°C.

В научных работах отмечается, что плотность наножидкостей увеличивается, как правило, не более чем на (5÷10)%, тогда как вязкость возрастает в диапазоне (10÷40)%, что требует учёта гидродинамических потерь при проектировании систем. Анализ публикационной активности показал, что ведущими странами в области исследований нанофлюидов являются Китай, Россия и США, в то время как Казахстан обладает значительным потенциалом для развития данного научного направления.

Полученные обобщенные зависимости подтверждают перспективность применения наномодифицированных теплоносителей в теплоэнергетических системах и могут быть использованы при выборе оптимального состава теплоносителя с учетом теплофизических, гидродинамических и эксплуатационных характеристик.

Список литературы

1. Изучение физических свойств антифризов / А.Н. Кувшинов и др. // E-Scio. – 2021. – № 3(54). – С. 195-202.
2. Этиленгликоль или пропиленгликоль: сравнение теплоносителей // HOT STREAM URL: https://hstream.ru/ (дата обращения: 25.10.2025).
3. Сравнительный анализ пропиленгликолевых и этиленгликолевых теплоносителей // Savia https://euroglykol.ru/ (дата обращения: 25.10.2025).
4. Pereira J.E. The pressing need for green nanofluids: A review / J.E. Pereira, A.S. Moita, A.L.N. Moreira // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2022. – Vol. 10, Issue 3, https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107940.

5. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles / S.U.S. Choi et al. // ASME-Publications-Fed. – 1995. – № 231. – P. 99-106.
6. Experimental study of heat exchange and hydrodynamics at the laminar flow of nanocoolant based on propylene glycol and Al2O3 nanoparticles / O.Ya. Khlieva et al // International Conference «Energy of Moldova – 2016. Regional aspects of development» 29 September – 01 October, 2016 – Chisinau, Republic of Moldova. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.91780.
7. Дудинских С.В. Применение наножидкостей в системе отопления / С.В. Дудинских, Е.О. Шеремет // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. ВГ Шухова. – 2019. – С. 751-757.
8. Progress and challenges in nanofluids research / S.S.J. Krishnan et al // Nanofluid Applications for Advanced Thermal Solutions. – 2023. – P. 327-348. https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15239-9.00012-6.
9. Comprehensive study on nanofluid and ionanofluid for heat transfer enhancement: A review on current and future perspective / B. Bakthavatchalam et al // Journal of Molecular Liquids. – 2020. – Vol. 305. – Article 112787. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.112787.
10. Ajith K. Nanofluids for heat transfer augmentation / K. Ajith, A. Brusly Solomon, M. Sharifpur // Materials for Advanced Heat Transfer Systems. – Woodhead Publishing Series in Energy. – 2023. – P. 1-38. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90498-8.00004-X.
11. Moshfeghi R. An analytical and statistical review of selected researches in the field of estimation of rheological behavior of nanofluids / R. Moshfeghi, D. Toghraie // Powder Technology. – 2022. – Vol. 398. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.117076.
12. Das S.K. Heat transfer in nanofluidsa review / S.K. Das, S.U.S. Choi, H.E. Patel // Heat Transfer Engineering. – 2006. – Vol. 27, № 10. – P. 3-19. https://doi.org/10.1080/01457630600904593.
13. Кудинов А.А. Анализ возможности применения наножидкости в качестве теплоносителя для повышения эффективности систем теплоснабжения / А.А. Кудинов, С.К. Зиганшина // Энергосбережение в котельных установках ТЭС и систем теплоснабжения. – Москва: ИНФРА-М, 2016.
14. Харисов И.Д. Применение нанотехнологий для интенсификации теплообмена / И.Д. Харисов, К.В. Осинцев // Энерго-и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. –2013. – Т. 1, № 1. – С. 290-294.
15. Sekrani, G. Ethylene- and Propylene-Glycol Based Nanofluids: A Literature Review on Their Thermophysical Properties and Thermal Performances / G. Sekrani, S. Poncet // Applied Sciences. – 2018. – Vol. 8, № 11. – Art. 2311. https://doi.org/10.3390/app8112311.
16. Progress and challenges in nanofluids research / S.S.J. Krishnan et al // Nanofluid Applications for Advanced Thermal Solutions. – Elsevier, 2023. – P. 327-348. https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15239-9.00012-6.
17. Nanomaterial-engineered fluids in cooling Systems: From preparation to performance–A comprehensive review / F.S. Mirsafi et al // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2025. https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116309.
18. Wang X.Q. A review on nanofluids – Part I: Theoretical and numerical investigations / X.Q. Wang, A.S. Mujumdar // Brazilian Journal of Chemical Engineering. – 2008. – Vol. 25, № 4. – P. 613-630. https://doi.org/10.1590/S0104-66322008000400001.
19. Improvement of thermal performance through nanofluids in industrial applications: a review on technical aspects / D.D. Mohite et al // Materials Today: Proceedings. – 2024. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90498-8.00004-X.
20. Suganthi K.S. Metal oxide nanofluids: Review of formulation, thermo-physical properties, mechanisms, and heat transfer performance / K.S. Suganthi, K.S. Rajan // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.043.
21. Rani C.V. Enhancement of thermal properties of fluids with dispersion of various types of hybrid/nanoparticles / C.V. Rani, P. Kumar // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1817. – № 1. – Art. 012023. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1817/1/012023.
22. Nanofluids as a coolant for polymer electrolyte membrane fuel cells: Recent trends, challenges, and future perspectives / D. K. Madheswaran et al // Journal of Cleaner Production. – 2023. – Vol. 424. – Article 138763. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138763.

23. Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions / S.U.S. Choi et al // Applied Physics Letters. – 2001. – Vol. 79. – P. 2252-2254.
24. Shimchuk N.A. Influence of various factors on the thermal conductivity of nanofluids / N.A. Shimchuk, V.Z. Geller // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2014. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.31386.
25. Enhancement of thermal conductivity with carbon nanotube for nanofluids / M.S. Liu et al // International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2005. https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2005.05.005.
26. Канцерев П.Н. Наножидкости в холодильной технике / П.Н. Канцерев, В.А. Винокуров // Успехи современной науки. – 2019. – № 2. – С. 13-17.
27. Гирфанова В.В. Анализ возможности применения наножидкости в качестве теплоносителя для повышения эффективности систем теплоснабжения / В.В. Гирфанова, В.И. Велькин // Энерго-и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. – Екатеринбург, 2017. – С. 136-141.
28. Исследования по созданию наножидкостей для энергетики / Б.И. Бондаренко и др. // Экология и промышленность. – 2013. – № 3. – С. 51-55.
29. Nano-coolants for thermal enhancement in heat exchangers: A review of prospects, challenges and applications / A.N. Bello et al // Next Nanotechnology. – 2025. – https://doi.org/10.1016/j.nxnano.2025.100214.
30. Макеев А.Н. Проблемы и перспективы использования наножидкостей в теплоэнергетике / А.Н. Макеев, Я.А. Кирюхин // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2022. – № 49(3). – P. 24-31. https://doi.org/10.21822/2073-6185-2022-49-3-24-31.
31. Морозова М.А. Теплопроводность и вязкость наножидкостей: дис. канд. техн. наук. – Новосибирск, 2019. – 180 с. – Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН.
32. Экспериментальные и расчетные исследования процессов теплообмена при использовании наножидкостей / Е.Н. Слободина и др. // Известия Транссиба. – 2024. – № 2(58). – С. 100-108.
33. Review and comparison of nanofluid thermal conductivity and heat transfer enhancements / W. Yu et al // Heat Transfer Engineering. – 2008. – Vol. 29, № 5. – P. 432-460. https://doi.org/10.1080/01457630701850851.
34. Сулейманов Б.А. Влияние агрегации наночастиц на теплопроводность нанофлюидов / Б.А. Сулейманов, Х.Ф. Аббасов // Журнал физической химии. – 2016. – Т. 90, № 2. – С. 240-248.
35. Gülüm M. Nanofluids for automotive radiators: Thermophysical properties, opportunities, challenges, and research trends / M. Gülüm, A. Çakmak, S. Osman // Journal of Petroleum Processing and Petrochemicals. – 2025. https://doi.org/10.1016/j.jppr.2025.08.002.
36. Experimental investigation of thermophysical properties of ethylene glycol based secondary fluids // International Journal of Refrigeration. – 2023. – Vol. 155. – P. 137-153. https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2023.08.008.
37. Ignatowicz M. Experimental investigation of thermophysical properties of propylene glycol based secondary fluids for ground source heat pumps and indirect refrigeration systems / M. Ignatowicz, B. Palm // International Journal of Refrigeration. – 2024. – Vol. 163. – P. 1-16. https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2024.04.009.
38. Next Nanotechnology. Nano-coolants for thermal enhancement in heat exchangers: A review // Next Nanotechnology. – 2025. https://doi.org/10.1016/j.nxnano.2025.100214.
39. Mutuku W.N. Ethylene glycol (EG)-based nanofluids as a coolant for automotive radiator / W.N. Mutuku // Asia-Pacific Journal of Computational Engineering. – 2016. – Vol. 3, Article 1. https://doi.org/10.1186/s40540-016-0021-5.
40. Thermal conductivity and viscosity measurements of ethylene glycol-based Al_2O_3 nanofluids / M.J. Pastoriza-Gallego et al // Discover Nano. – 2011. – Vol. 6, Article 221. https://doi.org/10.1186/1556-276X-6-221.
41. Satti J.R. Measurements of densities of propylene glycol-based nanofluids and comparison with theory / J.R. Satti, D.K. Das, D.R. Ray // Journal of Thermal Science and Engineering Applications. – 2016. https://doi.org/10.1115/1.4032671.

42. Zhang L. Heat transfer characteristics of Cu-based nanofluids in wavy-wall heat exchangers / L. Zhang, J. Sun, P. Qu // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2024. https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.112738.
43. Mahbubul I.M. Latest developments on the viscosity of nanofluids / I.M. Mahbubul, R. Saidur, M.A. Amalina // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2012. – Vol. 55, № 4. – P. 874-885. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.10.021.
44. Rudyak V.Y. Thermophysical Properties of Nanofluids / V.Y. Rudyak, A.V Minakov // The European physical journal E. – 2018. https://doi.org/10.1140/epje/i2018-11616-9.
45. Ignatowicz M. Experimental investigation of thermophysical properties of propylene glycol based secondary fluids for ground source heat pumps and indirect refrigeration systems / M. Ignatowicz, B. Palm // International Journal of Refrigeration. – 2024. https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2024.11.008.
46. Ignatowicz M. Experimental investigation of thermophysical properties of ethylene glycol based secondary fluidsÉtude expérimentale des propriétés thermophysiques des fluides secondaires à base d'éthylène glycol / M. Ignatowicz, B. Palm // International Journal of Refrigeration. – 2024. https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2023.08.008.
47. Экспериментальное исследование теплофизических свойств нанотеплоносителей на основе растворов пропиленгликоль/вода / В.П. Железный и др. // Вестник НТУ «ХПИ», Харьков.
48. Құсаин А.К. Исследование теплофизических свойств наножидкости Al_2O_3 на основе смеси этиленгликоля и воды (40:60) для геотермального применения / А.К. Құсаин, А.Б. Касымов // Вестник Университета Шакарима. Серия технические науки. – 2025. – № 2(18). – С. 421-426. https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-2(18)-52.
49. Thermophysical properties of TiO_2-based mono and hybrid nanofluids / A. Kasymov et al // International Journal of Thermophysics. – 2025. https://doi.org/10.1007/s10765-025-03672-9.
50. СОФТСАЛАТ: QGIS версия 3.44.7. – URL: https://www.softsalad.ru/software/znaniya/geografiya/qgis (дата обращения 20.12.25)

References

1. Izuchenie fizicheskikh svoistv antifrizov / A.N. Kuvshinov i dr. // E-Scio. – 2021. – № 3(54). – S. 195-202. (In Russian).
2. Ehtilenglikol' ili propilenglikol': sravnenie teplonositelei // HOT STREAM URL: https://hstream.ru/ (data obrashcheniya: 25.10.2025). (In Russian).
3. Sravnitel'nyi analiz propilenglikolevykh i ehtilenglikolevykh teplonositelei // Savia https://euroglykol.ru/ (data obrashcheniya: 25.10.2025). (In Russian).
4. Pereira J.E. The pressing need for green nanofluids: A review / J.E. Pereira, A.S. Moita, A.L.N. Moreira // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2022. – Vol. 10, Issue 3, https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107940. (In English).
5. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles / S.U.S. Choi et al. // ASME-Publications-Fed. – 1995. – № 231. – P. 99-106. (In English).
6. Experimental study of heat exchange and hydrodynamics at the laminar flow of nanocoolant based on propylene glycol and Al2O3 nanoparticles / O.Ya. Khlieva et al // International Conference «Energy of Moldova – 2016. Regional aspects of development» 29 September – 01 October, 2016 – Chisinau, Republic of Moldova. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.91780. (In English).
7. Dudinskikh S.V. Primenenie nanozhidkostei v sisteme otopleniya / S.V. Dudinskikh, E.O. Sheremet // Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya molodykh uchenykh BGTU im. VG Shukhova. – 2019. – S. 751-757. (In Russian).
8. Progress and challenges in nanofluids research / S.S.J. Krishnan et al // Nanofluid Applications for Advanced Thermal Solutions. – 2023. – P. 327-348. https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15239-9.00012-6. (In English).
9. Comprehensive study on nanofluid and ionanofluid for heat transfer enhancement: A review on current and future perspective / B. Bakthavatchalam et al // Journal of Molecular Liquids. – 2020. – Vol. 305. – Article 112787. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.112787. (In English).
10. Ajith K. Nanofluids for heat transfer augmentation / K. Ajith, A. Brusly Solomon, M. Sharifpur // Materials for Advanced Heat Transfer Systems. – Woodhead Publishing Series in Energy. – 2023. – P. 1-38. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90498-8.00004-X. (In English).

11. Moshfeghi R. An analytical and statistical review of selected researches in the field of estimation of rheological behavior of nanofluids / R. Moshfeghi, D. Toghraie // Powder Technology. – 2022. – Vol. 398. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.117076. (In English).
12. Das S.K. Heat transfer in nanofluids – a review / S.K. Das, S.U.S. Choi, H.E. Patel // Heat Transfer Engineering. – 2006. – Vol. 27, № 10. – P. 3-19. https://doi.org/10.1080/01457630600904593. (In English).
13. Kudinov A.A. Analiz vozmozhnosti primeneniya nanozhidkosti v kachestve teplonositelya dlya povysheniya ehffektivnosti sistem teplosnabzheniya / A.A. Kudinov, S.K. Ziganshina // Ehnergosberezhenie v kotel'nykh ustanovkakh TEHS i sistem teplosnabzheniya. – Moskva: INFRA-M, 2016. (In Russian).
14. Kharisov I.D. Primenenie nanotekhnologii dlya intensifikatsii teploobmena / I.D. Kharisov, K.V. Osintsev // Ehnergo-i resursosberezhenie v teploehnergetike i sotsial'noi sfere: materialy Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii studentov, aspirantov, uchenykh. –2013. – T. 1, № 1. – S. 290-294. (In Russian).
15. Sekrani, G. Ethylene- and Propylene-Glycol Based Nanofluids: A Literature Review on Their Thermophysical Properties and Thermal Performances / G. Sekrani, S. Poncet // Applied Sciences. – 2018. – Vol. 8, № 11. – Art. 2311. https://doi.org/10.3390/app8112311. (In English).
16. Progress and challenges in nanofluids research / S.S.J. Krishnan et al // Nanofluid Applications for Advanced Thermal Solutions. – Elsevier, 2023. – P. 327-348. https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15239-9.00012-6. (In English).
17. Nanomaterial-engineered fluids in cooling Systems: From preparation to performance–A comprehensive review / F.S. Mirsafi et al // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2025. https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116309. (In English).
18. Wang X.Q. A review on nanofluids – Part I: Theoretical and numerical investigations / X.Q. Wang, A.S. Mujumdar // Brazilian Journal of Chemical Engineering. – 2008. – Vol. 25, № 4. – P. 613-630. https://doi.org/10.1590/S0104-66322008000400001. (In English).
19. Improvement of thermal performance through nanofluids in industrial applications: a review on technical aspects / D.D. Mohite et al // Materials Today: Proceedings. – 2024. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90498-8.00004-X. (In English).
20. Suganthi K.S. Metal oxide nanofluids: Review of formulation, thermo-physical properties, mechanisms, and heat transfer performance / K.S. Suganthi, K.S. Rajan // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.043. (In English).
21. Rani C.V. Enhancement of thermal properties of fluids with dispersion of various types of hybrid/nanoparticles / C.V. Rani, P. Kumar // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1817. – № 1. – Art. 012023. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1817/1/012023. (In English).
22. Nanofluids as a coolant for polymer electrolyte membrane fuel cells: Recent trends, challenges, and future perspectives / D. K. Madheswaran et al // Journal of Cleaner Production. – 2023. – Vol. 424. – Article 138763. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138763. (In English).
23. Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions / S.U.S. Choi et al // Applied Physics Letters. – 2001. – Vol. 79. – P. 2252-2254. (In English).
24. Shimchuk N.A. Influence of various factors on the thermal conductivity of nanofluids / N.A. Shimchuk, V.Z. Geller // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2014. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.31386. (In English).
25. Enhancement of thermal conductivity with carbon nanotube for nanofluids / M.S. Liu et al // International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2005. https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2005.05.005. (In English).
26. Kantserev P.N. Nanozhidkosti v kholodil'noi tekhnike / P.N. Kantserev, V.A. Vinokurov // Uspekhi sovremennoi nauki. – 2019. – № 2. – S. 13-17. (In Russian).
27. Girfanova V.V. Analiz vozmozhnosti primeneniya nanozhidkosti v kachestve teplonositelya dlya povysheniya ehffektivnosti sistem teplosnabzheniya / V.V. Girfanova, V.I. Vel'kin // Ehnergo-i resursosberezhenie. Ehnergoobespechenie. Netraditsionnye i vozobnovlyaemye istochniki ehnergii. – Ekaterinburg, 2017. – S. 136-141. (In Russian).
28. Issledovaniya po sozdaniyu nanozhidkostei dlya ehnergetiki / B.I. Bondarenko i dr. // Ehkologiya i promyshlennost'. – 2013. – № 3. – S. 51-55. (In Russian).
29. Nano coolants for thermal enhancement in heat exchangers: A review of prospects, challenges and applications / A.N. Bello et al // Next Nanotechnology. – 2025. – https://doi.org/10.1016/j.nxnano.2025.100214. (In English).

30. Makeev A.N. Problemy i perspektivy ispol'zovaniya nanozhidkostei v teploehnergetike / A.N. Makeev, YA.A. Kiryukhin // Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. – 2022. – № 49(3). – R. 24-31. https://doi.org/10.21822/2073-6185-2022-49-3-24-31. (In Russian).
31. Morozova M.A. Teploprovodnost' i vyazkost' nanozhidkostei: dis. kand. tekhn. nauk. – Novosibirsk, 2019. – 180 s. – Institut teplofiziki im. S. S. Kutateladze SO RAN. (In Russian).
32. Ehksperimental'nye i raschetnye issledovaniya protsessov teploobmena pri ispol'zovanii nanozhidkostei / E.N. Slobodina i dr. // Izvestiya Transsiba. – 2024. – № 2(58). – S. 100-108. (In Russian).
33. Review and comparison of nanofluid thermal conductivity and heat transfer enhancements / W. Yu et al // Heat Transfer Engineering. – 2008. – Vol. 29, № 5. – P. 432-460. https://doi.org/10.1080/01457630701850851. (In English).
34. Suleimanov B.A. Vliyanie agregatsii nanochastits na teploprovodnost' nanoflyuidov / B.A. Suleimanov, KH.F. Abbasov // Zhurnal fizicheskoi khimii. – 2016. – T. 90, № 2. – S. 240-248. (In Russian).
35. Gülüm M. Nanofluids for automotive radiators: Thermophysical properties, opportunities, challenges, and research trends / M. Gülüm, A. Çakmak, S. Osman // Journal of Petroleum Processing and Petrochemicals. – 2025. https://doi.org/10.1016/j.jppr.2025.08.002. (In English).
36. Experimental investigation of thermophysical properties of ethylene glycol based secondary fluids // International Journal of Refrigeration. – 2023. – Vol. 155. – P. 137-153. https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2023.08.008. (In English).
37. Ignatowicz M. Experimental investigation of thermophysical properties of propylene glycol based secondary fluids for ground source heat pumps and indirect refrigeration systems / M. Ignatowicz, B. Palm // International Journal of Refrigeration. – 2024. – Vol. 163. – P. 1-16. https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2024.04.009. (In English).
38. Next Nanotechnology. Nano-coolants for thermal enhancement in heat exchangers: A review // Next Nanotechnology. – 2025. https://doi.org/10.1016/j.nxnano.2025.100214. (In English).
39. Mutuku W.N. Ethylene glycol (EG)-based nanofluids as a coolant for automotive radiator / W.N. Mutuku // Asia-Pacific Journal of Computational Engineering. – 2016. – Vol. 3, Article 1. https://doi.org/10.1186/s40540-016-0021-5. (In English).
40. Thermal conductivity and viscosity measurements of ethylene glycol-based Al_2O_3 nanofluids / M.J. Pastoriza-Gallego et al // Discover Nano. – 2011. – Vol. 6, Article 221. https://doi.org/10.1186/1556-276X-6-221. (In English).
41. Satti J.R. Measurements of densities of propylene glycol-based nanofluids and comparison with theory / J.R. Satti, D.K. Das, D.R. Ray // Journal of Thermal Science and Engineering Applications. – 2016. https://doi.org/10.1115/1.4032671. (In English).
42. Zhang L. Heat transfer characteristics of Cu-based nanofluids in wavy-wall heat exchangers / L. Zhang, J. Sun, P. Qu // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2024. https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.112738. (In English).
43. Mahbubul I.M. Latest developments on the viscosity of nanofluids / I.M. Mahbubul, R. Saidur, M.A. Amalina // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2012. – Vol. 55, № 4. – P. 874-885. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.10.021. (In English).
44. Rudyak V.Y. Thermophysical Properties of Nanofluids / V.Y. Rudyak, A.V Minakov // The European physical journal E. – 2018. https://doi.org/10.1140/epje/i2018-11616-9. (In English).
45. Ignatowicz M. Experimental investigation of thermophysical properties of propylene glycol based secondary fluids for ground source heat pumps and indirect refrigeration systems / M. Ignatowicz, B. Palm // International Journal of Refrigeration. – 2024. https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2024.11.008. (In English).
46. Ignatowicz M. Experimental investigation of thermophysical properties of ethylene glycol based secondary fluidsÉtude expérimentale des propriétés thermophysiques des fluides secondaires à base d'éthylène glycol / M. Ignatowicz, B. Palm // International Journal of Refrigeration. – 2024. https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2023.08.008. (In English).
47. Ehksperimental'noe issledovanie teplofizicheskikh svoistv nanoteplonositelei na osnove rastvorov propilenglikol'/voda / V.P. Zheleznyi i dr. // Vestnik NTU «KHPI», Khar'kov. (In Russian).
48. Құsain A.K. Issledovanie teplofizicheskikh svoistv nanozhidkosti Al_2O_3 na osnove smesi ehtilenglikolya i vody (40:60) dlya geotermal'nogo primeneniya / A.K. Құsain, A.B. Kasymov //

Vestnik Universiteta Shakarima. Seriya tekhnicheskie nauki. – 2025. – № 2(18). – S. 421-426. https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-2(18)-52. (In Russian).
49. Thermophysical properties of TiO_2-based mono and hybrid nanofluids / A. Kasymov et al // International Journal of Thermophysics. – 2025. https://doi.org/10.1007/s10765-025-03672-9. (In English).
50. SOFTSALAT: QGIS versiya 3.44.7. – URL: https://www.softsalad.ru/software/znaniya/geografiya/qgis (data obrashcheniya 20.12.25)/. (In Russian).

А.Н. Шалаганова, О.А. Степанова, М.В. Ермоленко*, А.Р. Хажидинова, Е.П. Евлампиева
Шәкәрім университет,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинки к-сі, 20 А
*e-mail: m.ermolenko@shakarim.kz

МОДИФИКАЦИЯЛАНҒАН АНТИФРИЗДЕРДІҢ ЖЫЛУФИЗИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІНЕ НАНОБӨЛШЕКТЕРДІҢ ӘСЕРІ – ШОЛУ

Мақалада жылуэнергетикалық және инженерлік жүйелерде қолданылатын этиленгликоль, пропиленгликоль және глицерин негізіндегі антифриздер мен нанофлюидтердің жылуфизикалық қасиеттеріне арналған заманауи ғылыми жарияланымдарға ғылыми-зерттеу шолу ұсынылған. Төмен температуралы жылутасымалдағыштардың негізгі түрлері, олардың жұмыс істеу температуралық диапазондары, сондай-ақ күрт континенттік климаттық жағдайлары тән аймақтарда пайдалану кезінде қойылатын негізгі талаптар қарастырылған.

Металл оксидтерінің және көміртекті наноқұрылымдардың (Al_2O_3, CuO, TiO_2, SiO_2, ZnO, CNT, графен) нанобөлшектерін қосудың гликольді жылутасымалдағыштардың жылуөткізгіштігіне, тұтқырлығына, тығыздығына және меншікті жылу сыйымдылығына әсерін талдауға ерекше назар аударылған. Нанобөлшектерді енгізу жылуөткізгіштік коэффициентін және жылуалмасу қарқындылығын едәуір арттыруға мүмкіндік беретіні көрсетілген, алайда бұл тұтқырлықтың өсуімен қатар жүреді, өз кезегінде гидравликалық шығындардың және жылутасымалдағышты айналдыруға кететін энергия шығынының артуына әкелуі мүмкін.

Жұмыс аясында 2020–2025 жылдар аралығындағы ғылыми жарияланымдарға библиометриялық талдау жүргізіліп, аталған зерттеу бағытын белсенді дамытып отырған жетекші елдер мен ғылыми орталықтар анықталды. Алынған нәтижелер наномодификацияланған антифриздерді жылутехникалық жүйелердің энергия тиімділігін арттыру мақсатында қолданудың перспективалы екенін растайды және оларды тәжірибеде пайдалану кезінде наноқоспалардың құрамын және концентрациясын оңтайлы таңдаудың маңыздылығын көрсетеді.

Түйін сөздер: *антифриз, нанофлюидтер, жылу физикалық қасиеттері, жылуберудің жоғарылауы, нанобөлшектер, энергия тиімділігін арттыру.*

A. Shalaganova, O. Stepanova, M. Yermolenko, A. Khazhidinova, Y. Yevlampiyeva
Shakarim University,
071412, Republic of Kazakhstan, Semey, 20A Glinka Street,
*e-mail: m.ermolenko@shakarim.kz

INFLUENCE OF NANOPARTICLES ON THE THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF MODIFIED ANTIFREEZES – A REVIEW

This article presents a scientific review of recent publications focused on the thermophysical properties of antifreezes and nanofluids based on ethylene glycol, propylene glycol, and glycerin, used in thermal power and engineering systems. The main types of low-temperature heat transfer fluids, their operating temperature ranges, and key requirements for their use in cold climates characteristic of regions with sharply continental temperature conditions are examined.

Special attention is given to analyzing the effects of adding metal oxide nanoparticles and carbon nanostructures (Al_2O_3, CuO, TiO_2, SiO_2, ZnO, CNT, graphene) on the thermal conductivity, viscosity, density, and specific heat capacity of glycol-based heat transfer fluids. It is shown that the introduction of nanoparticles significantly increases the thermal conductivity coefficient and heat transfer intensity, but is accompanied by an increase in viscosity, which may lead to higher hydraulic losses and increased energy consumption for circulating the heat transfer fluid.

Within the scope of this work, a bibliometric analysis of scientific publications from 2020 to 2025 was conducted, identifying leading countries and research centers actively developing this field. The results confirm the potential of using nanomodified antifreezes to improve the energy efficiency of thermal engineering systems and emphasize the necessity of optimizing the composition and concentration of nanoparticle additives for practical applications.

Key words: *antifreeze, nanofluids, thermophysical properties, enhancement of heat transfer, nanoparticles, improving energy efficiency.*

Сведения об авторах

Алмагуль Ныгметовна Шалаганова – докторант кафедры «Техническая физика и теплоэнергетика»; Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: shalaganova_alma@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-5592-3392.

Ольга Александровна Степанова – кандидат технических наук, ассоциированный профессор кафедры «Техническая физика и теплоэнергетика», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: aug11@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-2911-4427.

Михаил Вячеславович Ермоленко* – кандидат технических наук, ассоциированный профессор кафедры «Техническая физика и теплоэнергетика», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: m.ermolenko@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1677-8023.

Акбота Рыспековна Хажидинова – PhD; и.о. ассоциированного профессора, кафедра «Техническая физика и теплоэнергетика», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: nadyrova.akbota@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8802-1559.

Елена Петровна Евлампиева – кандидат биологических наук, старший преподаватель кафедры «Химия и экология», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: elena_semei@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1953-3686.

Авторлар туралы мәліметтер

Алмагуль Ныгметовна Шалаганова – «Техникалық физика және жылуэнергетика» кафедрасының докторанты, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: shalaganova_alma@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-5592-3392.

Ольга Александровна Степанова – техника ғылымдарының кандидаты, «Техникалық физика және жылуэнергетика» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: aug11@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-2911-4427.

Михаил Вячеславович Ермоленко* – техника ғылымдарының кандидаты, «Техникалық физика және жылуэнергетика» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: m.ermolenko@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1677-8023.

Акбота Рыспековна Хажидинова – PhD; «Техникалық физика және жылуэнергетика» кафедрасының қауымдастырылған профессор міндетін атқарушы, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: nadyrova.akbota@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8802-1559.

Елена Петровна Евлампиева – биология ғылымдарының кандидаты, «Химия және экология» кафедрасының аға оқытушысы, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: elena_semei@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1953-3686.

Information about the authors

Almagul Shalaganova – doctoral student at the department of Technical physics and thermal power engineering; Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: shalaganova_alma@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-5592-3392.

Olga Stepanova – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Technical Physics and Thermal Power Engineering; Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: aug11@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-2911-4427.

Mikhail Yermolenko* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Technical Physics and Thermal Power Engineering; Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: m.ermolenko@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1677-8023.

Akbota Khazhidinova – PhD; acting Associate Professor at the Department of Technical Physics and Thermal Power Engineering, Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: nadyrova.akbota@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8802-1559.

Yelena Yevlampiyeva – Candidate of Biological Sciences, Head of Scientific Editorial Department; Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: elena_semei@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1953-3686.

Поступила в редакцию 23.01.2026
Поступила после доработки 12.02.2026
Принята к публикации 13.02.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-59

МРНТИ: 72.29.29

Ш.Р. Курбанбеков[1], Д.Р. Патчаханов[1*], С.Х. Камбарбеков[2], Б.С. Калдар[1]
[1]Международный казахско-турецкий университет имени Х.А. Ясави,
161200, Казахстан, Туркестан, ул. Б. Саттарханова, 29
[2]Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова,
070016, Казахстан, Усть-Каменогорск, ул. 30-й Гвардейской Дивизии, 36
[*]e-mail: itsxxdi@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОКРЫТИЙ ZRCN ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПАРАМЕТРОВ HVOF-ПРОЦЕССА

Аннотация. *В данном исследовании изучено влияние давления кислорода при высокоскоростном кислородно-топливном напылении (HVOF) на формирование и структурно-фазовые характеристики покрытий ZrCN, нанесённых на сталь 65Г. Покрытия получали на установке «Termika-3» при фиксированных параметрах подачи топлива, воздуха и расстояния напыления, давление кислорода в диапазоне 4,0-4,5 бар. По результатам рентгенофазового анализа установлено, что основная матрица покрытий представлена твёрдым раствором Zr(C,N) с гранецентрированной кубической решёткой (Fm-3m). Повышение давления O_2 вызывает частичное термическое разложение ZrCN с образованием фаз ZrC, ZrN и оксидных соединений ZrO_2. Отмечено насыщение покрытия кислородом, измельчение зёрен и увеличение параметра решётки. Микротвёрдость покрытий (а-с) достигает 1512-1857 HV, что соответствует примерно пятикратному росту относительно исходного образца. На основании полученных данных показано, что регулирование давления кислорода в струе HVOF существенно влияет на фазовый состав, морфологию и качество адгезионных контактов, обеспечивая оптимальное сочетание твёрдости, пластичности и термостабильности.*

Ключевые слова: *HVOF, покрытие ZrCN, сталь 65Г, XRD, SEM.*

Введение

Современные тенденции развития машиностроения и энергетического приборостроения требуют повышения износостойкости, коррозионной и термической стойкости рабочих поверхностей металлических деталей, эксплуатируемых в условиях интенсивных механических и химических воздействий. Одним из наиболее эффективных подходов к решению этой задачи является нанесение защитных покрытий на основе соединений переходных металлов, обладающих высокой твёрдостью, химической инертностью и стабильностью при повышенных температурах [1]. Среди таких соединений особое внимание привлекают карбонитриды, объединяющие свойства карбидов и нитридов и характеризующиеся уникальным сочетанием прочностных и эксплуатационных параметров [2].

Карбонитрид циркония (ZrCN) относится к классу тугоплавких соединений с гранецентрированной кубической структурой твёрдого раствора, в которой атомы углерода и азота изоморфно замещают друг друга в подрешётке анионов [3]. Такое строение обеспечивает высокую твёрдость (до 25-30 ГПа), модуль упругости порядка 400-450 ГПа и стойкость к термоокислительным процессам до температур 900-1000°C [4]. В отличие от индивидуальных нитридов и карбидов циркония, фаза Zr(C,N) обладает более высокой пластичностью и трещиностойкостью, что особенно важно для формирования покрытий на металлических подложках, склонных к различию коэффициентов термического расширения [5]. Благодаря совокупности этих свойств покрытия на основе ZrCN применяются для защиты режущего инструмента, деталей трения, клапанов, турбинных компонентов и других элементов, работающих в условиях абразивного и адгезионного износа [6].

В последние десятилетия широкое распространение получили физические и химические методы осаждения в вакууме – PVD и CVD, однако они характеризуются ограниченной производительностью и сравнительно низкой адгезией при нанесении на крупногабаритные детали [7]. Альтернативой им выступает технология напыления HVOF,

©Ш.Р. Курбанбеков, Д.Р. Патчаханов, С.Х. Камбарбеков, Б.С. Калдар, 2026

обеспечивающая сверхзвуковую скорость полёта частиц при умеренной температуре пламени [8]. Данный метод позволяет получать плотные, низкопористые покрытия с развитой межсплэтной связностью и минимальной термической деградацией исходного порошка [9]. Особое значение при этом имеют параметры процесса – давления и расходы кислорода, топлива и воздуха, расстояние до подложки, а также кинематические характеристики движения горелки [10]. Именно совокупность этих факторов определяет температуру и скорость частиц в полёте, степень их расплющивания при ударе и, как следствие, морфологию, фазовый состав и адгезионную прочность покрытия [11].

Несмотря на многочисленные исследования, направленные на оптимизацию HVOF-процесса для различных карбидных и никелевых систем [12], вопросы влияния параметров горения и газодинамики на формирование фазового состава и микроструктуры ZrCN-покрытий остаются недостаточно изученными. В связи с этим актуальным является определение взаимосвязи между технологическими условиями HVOF-напыления – в первую очередь давлением кислорода – и структурно-фазовыми, трибологическими и физико-механическими характеристиками получаемых покрытий [13]. Полученные результаты представляют практическую ценность для разработки износостойких систем защиты стальных деталей, используемых в машиностроении, энергетике и инструментальном производстве.

Целью данной работы является изучение наноструктуры и физико-механических свойств нанокристаллических покрытий ZrCN, полученных методом HVOF.

Материалы и методы

Покрытия ZrCN были нанесены методом HVOF на установке оснащённой пультом управления, обеспечивающим точную настройку параметров подачи газов. На рисунке 1 приведены схема и внешний вид установки. При увеличении давления происходит интенсивное смешивание газовых потоков внутри камеры сгорания, после чего порошковый материал в строго дозированном объёме подаётся в горелку. Перемещение частиц к зоне распыления обеспечивается потоком сжатого воздуха, создаваемым компрессором, что способствует их равномерному поступлению и стабильности процесса напыления.

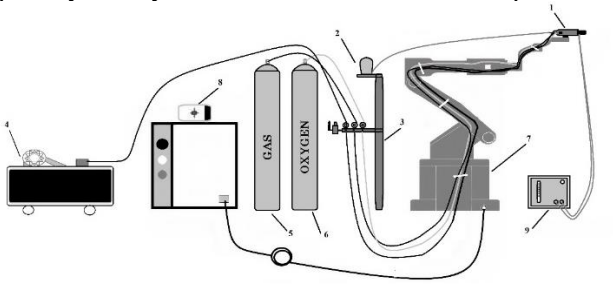


Рисунок 1 – Принципиальная схема установки для высокоскоростного напыления HVOF:
1 – горелка; 2 – дозатор порошка; 3 – панель управления газом; 4 – компрессор; 5 – газ в баллоне(C_3H_3);
6 – газ в баллоне (O_2); 7 – 6 осевой промышленный робот; 8 – контроллер; 9 – чиллер

После выхода из сопла горелки частицы порошка попадают в зону высокой температуры, где подвергаются интенсивному нагреву до состояния, обеспечивающего их размягчение и пластичную деформацию. В разогретом виде частицы с большой скоростью достигают предварительно подготовленной поверхности подложки, формируя плотный и равномерный слой покрытия. Применяемый порошок ZrCN с размером частиц 20-100 мкм имеет преимущественно неправильную полиэдрическую, фрагментированную морфологию, что, как известно, снижает его текучесть по сравнению со сферическими порошками. В качестве подложки использовалась сталь марки 65Г ГОСТ 14959-79, относящаяся к высокоуглеродистым легированным сталям, отличающимся высокой прочностью и износостойкостью, что делает их пригодными для нанесения защитных покрытий.

Химический состав стали 65Г представлен в таблице 1. Перед нанесением покрытия поверхность подложки подвергалась предварительной подготовке: сначала выполнялась механическая шлифовка для удаления оксидных плёнок и загрязнений, после чего проводилась пескоструйная обработка, направленная на повышение шероховатости и улучшение адгезии напыляемого слоя. Основные параметры процесса напыления приведены в таблице 2.

Таблица 1 – Химический состав стали 65Г [ГОСТ 14959-79]

Марка стали	Массовая доля элементов, %			
	Углерод	Кремний	Марганец	Хром
65Г	0,62-0,70	0,17-0,37	0,90-1,20	0,25

Таблица 2 – Параметры процесса нанесения покрытия ZrCN

№	Расстояние	Пропан	Давление воздуха	Кислород	Порошок
Образец а	35 см	3 бар	3,2 бар	4 бар	ZrCN
Образец б	35см	3 бар	3,2 бар	4,3 бар	ZrCN
Образец с	35см	3 бар	3,2 бар	4,5 бар	ZrCN

После завершения процесса напыления проведён комплекс исследований, направленных на всестороннюю оценку структуры, фазового состава и свойств сформированных покрытий. Структурно-фазовый и морфологический анализ позволил установить закономерности формирования фаз, микроструктуры и качества сцепления напылённого слоя с подложкой.

Микроструктурные исследования напылённых покрытий проводились методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на установке Tescan Vega 4, обеспечивающей как обзор микроструктуры поверхности, так и анализ поперечных шлифов.

Рентгенофазовый анализ выполнялся с использованием дифрактометра X'Pert PRO с применением медного излучения Cu-Kα (длина волны λ = 1.5406 Å). Напряжение на трубке составляло 40 кВ, сила тока 30 мА. Съёмка проводилась в диапазоне углов 2θ = 20-90° с дискретностью 0.02° и временем накопления сигнала 2 с на шаг. Обработка дифрактограмм осуществлялась с использованием программного обеспечения High Score Plus с база данными PDF5+ (2026).

Результаты и обсуждения

На рисунке 2 представлены поперечные шлифы покрытий, сформированных при различных режимах HVOF-напыления. Верхний ряд изображений (SE) демонстрирует общую морфологию покрытия и границу раздела «покрытие-подложка», тогда как нижний ряд (BSE) показывает распределение контрастов, обусловленных различием химического состава и плотности фаз.

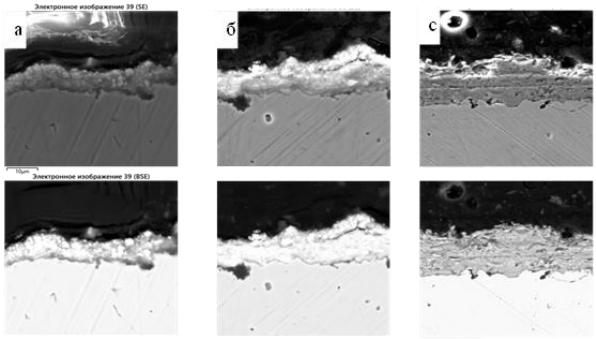


Рисунок 2 – СЭМ-изображения поперечных сечений ZrCN покрытий, полученных при различных скоростях кислородного потока
a) 4 бар; b) 4,3 бар; c) 4,5 бар

Покрытие образца (а) характеризуется заметной пористостью и неравномерной структурой вблизи границы с подложкой, что, вероятно, связано с переокислением частиц во время полёта и их частичным разложением в пламени. В образце (б) наблюдаются отдельные поры и зоны неоднородности, что может указывать на недостаточную кинетическую энергию частиц при их осаждении и неполное спекание ламелл. В то же время покрытие образца (с) отличается плотной, однородной структурой с минимальной пористостью и чётко выраженной границей раздела, что свидетельствует о качественном межфазном сцеплении и хорошей адгезии слоя к подложке.

Таким образом, наиболее оптимальная микроструктура наблюдается у образца, полученного при режиме (с), при котором достигается высокая плотность, равномерность и прочность покрытия. Подготовка поперечных образцов включала стадии горячего прессования, механического шлифования и последующего полирования с использованием

абразивных суспензий различной дисперсности. Данная методика обеспечила получение гладкой поверхности шлифа и позволила детально исследовать морфологию, межслойные границы и характер сцепления покрытия с подложкой с применением методов СЭМ-анализа.

Исследованное покрытие, сформированное методом высокоскоростного газопламенного напыления (HVOF), характеризуется существенно более высокой микротвёрдостью по сравнению с исходным материалом. Исходные значения микротвёрдости составляли около 392 HV. На рисунке 3 представлены результаты измерений микротвёрдости после нанесения покрытия. Согласно полученным данным, микротвёрдость покрытий (a-c) достигает 1512-1857 HV, что соответствует примерно пятикратному росту относительно исходного образца. Полученные результаты согласуются с литературными данными, согласно которым оптимизация параметров HVOF-напыления способствует формированию более плотной и однородной структуры покрытия с пониженной пористостью, что обеспечивает увеличение микротвёрдости и повышение эксплуатационных характеристик.

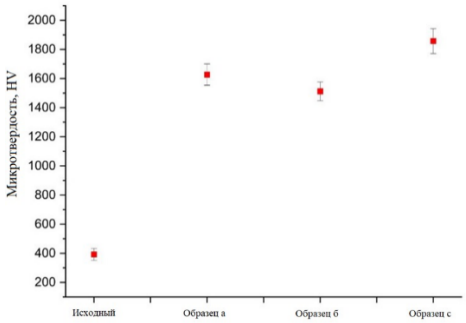


Рисунок 3 – График микротвёрдости ZrCN покрытий

На рисунке 4 представлены результаты рентгеновского дифрактометрического анализа исходного порошка, использованного для нанесения покрытий методом HVOF. По данным анализа установлено, что основной фазой исследуемого материала является карбонитрид циркония (ZrCN). Помимо этой фазы, в составе порошка выявлены также соединения карбида циркония (ZrC) и нитрида циркония (ZrN), что указывает на его многофазную структуру и частичное разложение исходного соединения.

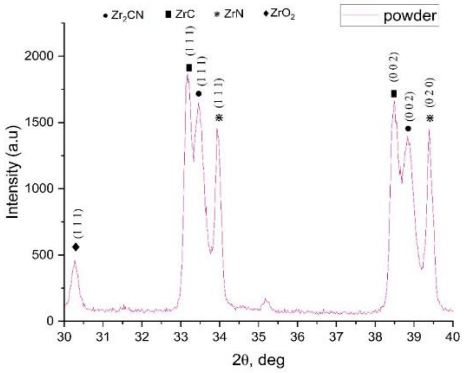


Рисунок 4 – Рентгенодифрактограмма исходного порошка ZrCN

Наличие фаз ZrC и ZrN подтверждает, что при производстве или последующей термической обработке порошка происходили процессы, приводящие к выделению отдельных компонентов твёрдого раствора. Дополнительно обнаружены слабые рефлексы, соответствующие оксиду циркония (ZrO_2), что связано с незначительным окислением поверхности частиц при контакте с воздухом.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что порошковый материал представляет собой композицию взаимосвязанных карбонитридных и карбидных фаз, обеспечивающих сочетание высокой твёрдости, химической стабильности и термостойкости. Такая структурно-фазовая организация делает данный порошок перспективным для формирования плотных, износо- и термостойких покрытий методом HVOF.

Рентгенофазовые дифрактограммы трех образцов покрытий представлены на рисунке 5. Проведённый анализ рентгенограмм позволил установить, что в структуре исследованных покрытий формируются основные фазы Zr2CN(ICDD: 98-061-8441), ZrC(ICDD: 98-061-9163) и ZrN(ICDD: 98-018-0847), которые являются характерными для систем на основе циркония, углерода и азота. Помимо них, в дифракционных спектрах обнаружены слабые пики, принадлежащие оксидным соединениям ZrO2(ICDD: 98-007-0014) и Fe(ICDD: 96-900-6596), что указывает на частичное окисление поверхности частиц при воздействии кислородосодержащей среды во время процесса напыления.

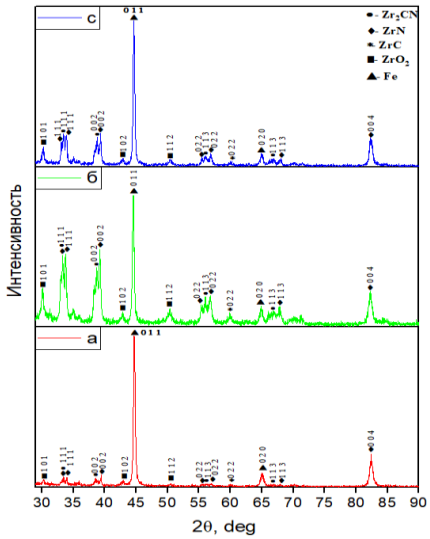


Рисунок 5 – Рентгенодифрактограммы ZrCN покрытий,
полученных при различных давлениях кислородного потока
a) 4 бар; b) 4,3 бар; c) 4,5 бар

Результаты рентгенофазового анализа свидетельствуют о том, что соединения Zr2CN, ZrC и ZrN кристаллизуются в кубической сингонии с пространственной группой Fm-3m, что подтверждает образование твёрдого раствора на основе циркония. Подобная кристаллическая структура является устойчивой при высоких температурах и обеспечивает сочетание высокой твёрдости с хорошими механическими свойствами покрытий. Для большинства исследованных образцов зафиксировано незначительное смещение дифракционных максимумов относительно эталонных значений, что может быть связано с изменением параметра решётки вследствие варьирования соотношения углерода и азота, а также внедрения кислорода в кристаллическую структуру. Эти отклонения указывают на наличие внутренних напряжений и мелкозернистую природу материала, характерную для покрытий, формируемых при быстром охлаждении частиц после удара о поверхность подложки.

Формирование фаз ZrC и ZrN обусловлено термическим разложением исходного порошка ZrCN в зоне высоких температур. При этом избыточное содержание кислорода в структуре ZrN может приводить к искажению кристаллической решётки, возникновению точечных дефектов и частичному аморфизму материала. Наличие кислорода вызывает уменьшение размера зёрен и увеличение параметра решётки, что подтверждается уширением дифракционных линий на рентгенограммах [13].

Следует отметить, что многие нитриды, включая ZrN, кристаллизуются в структурах типа NaCl (гранецентрированная кубическая решётка). В идеальной упорядоченной кристаллической решётке для таких соединений комбинационное рассеяние первого порядка запрещено. Однако для напылённых покрытий, как правило, характерно наличие вакансий и других дефектов кристаллической структуры [14]. Эти несовершенства вызывают локальные искажения решётки, что приводит к появлению беспорядка и активации процессов рассеяния второго порядка.

Процесс напыления методом HVOF способствует формированию смеси кубической и тетрагональной модификаций оксида циркония. Однако при крайне быстром охлаждении расплавленных частиц в момент их осаждения на подложку доля кубической фазы

значительно увеличивается, так как не успевает произойти её превращение в тетрагональную. Это объясняется высокой скоростью теплового отвода и неравномерностью охлаждения в зоне осаждения частиц.

Появление фазы ZrO2 имеющей кубическую решётку с пространственной группой Fm-3m, связано с особенностями газопламенного процесса. При высокоскоростном напылении использовалась газовая смесь пропана и кислорода, выполняющая роль окислительной среды. Такое сочетание условий привело к активному взаимодействию исходного соединения ZrCN с кислородом и частичной потере углерода, в результате чего происходило образование оксидных структур. А также, фазовые превращения в системе Zr-C-N-O при HVOF-напылении обусловлены как термодинамическими факторами, так и кинетикой окислительных процессов, определяемых температурой пламени и скоростью охлаждения частиц.

Помимо основных фаз, наличие пиков оксидов циркония и железа свидетельствует о локальных реакциях между материалом подложки и продуктами горения газовой смеси. Однако доля оксидных включений невелика, что говорит о правильном выборе параметров напыления и эффективном ограничении доступа кислорода в рабочую зону пламени. Таким образом, можно заключить, что процесс HVOF-осаждения обеспечивает формирование преимущественно кубической фазы твёрдого раствора Zr(C,N) с минимальным количеством побочных соединений, а полученные рентгенографические результаты подтверждают стабильность структурно-фазового состояния покрытия при различных режимах напыления.

В исследованиях [15, 16] установлено, что покрытия на основе циркония обладают высокими показателями микротвёрдости и значительными значениями критических коэффициентов интенсивности. Помимо этого, важным достоинством данных покрытий является сравнительно высокая теплопроводность, которая способствует равномерному распределению тепла и тем самым снижает вероятность термических повреждений при эксплуатации [17].

Заключение

В ходе проведённых исследований было установлено, что наилучшие эксплуатационные свойства покрытий ZrCN достигаются при использовании режима HVOF-напыления с давлением кислорода 4,5 бар (образец с). Данный режим можно считать оптимальным, поскольку он обеспечивает формирование покрытия с наиболее благоприятной комбинацией структурных и механических характеристик. При этом наблюдается образование равномерного, плотного и однородного слоя без выраженных дефектов, трещин и пористости. Микроструктура покрытия характеризуется плотной ламеллярной укладкой частиц, хорошей связностью между отдельными расплющенными элементами и минимальным количеством межламельных пустот, что способствует повышению адгезии и износостойкости.

Фазовый анализ показал, что при данном режиме напыления преимущественно формируются карбонитридные соединения типа Zr(C,N), которые кристаллизуются в гранецентрированной кубической решётке. Такая структура является устойчивой и обеспечивает сочетание высокой твёрдости, пластичности и стабильности при воздействии термомеханических нагрузок.

Таким образом, полученные результаты подтверждают, что микроструктурное состояние и фазовая стабильность ZrCN-покрытий существенно зависят от содержания кислорода и параметров термического воздействия в процессе HVOF-напыления.

Список литературы

1. Microstructure and Mechanical Properties of ZrN, ZrCN and ZrC Coatings Grown by Chemical Vapor Deposition / F. Frank et al // Coatings. – 2021. – № 11(5). – P. 491. https://doi.org/10.3390/coatings11050491.
2. Shishkin R.A. The study of physico-chemical transformations in the process of low-temperature synthesis of zirconium carbide / R.A. Shishkin, V.S. Kudyakova, N.V. Zhirenkina // NOVYE OGNEUPORY (NEW REFRACTORIES). – 2019. – № 2. – P. 45-48. https://doi.org/10.17073/1683-4518-2019-2-45-48.
3. Electrochemical performance of TiCN coatings with low carbon concentration in simulated body fluid / Q. Wang et al // Surf. Coat. Technol. – 2014. – № 253. – P. 199-204. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.05.037.

4. Improving the Efficiency of Air Plasma Spraying of Titanium Nitride Powder / A. Kengesbekov et al // Coatings. – 2022. – № 12(11). – 1644. https://doi.org/10.3390/coatings12111644.
5. Preparation and Characterization of NiCr/NiCr-Al_2O_3/Al_2O_3 Multilayer Gradient Coatings by Gas Detonation Spraying / B. Rakhadilov et al // Coatings. – 2021. – № 11(12). – P. 1524. https://doi.org/10.3390/coatings11121524.
6. Development and Studying of the Technology for Thermal Spraying of Coatings Made from Ultra-High-Molecular-Weight Polyethylene / M. Skakov et al // Coatings. – 2023. – № 13(4). – P. 698. https://doi.org/10.3390/coatings13040698.
7. Oksa M. Nickel- and iron-based HVOF thermal spray coatings for high temperature corrosion protection in biomass-fired power plant boilers / M. Oksa // Dissertation. Aalto University, 2015. https://publications.vtt.fi/pdf/science/2015/S74.pdf.
8. Tan J.C. Optimisation of the HVOF thermal spray process for coating, forming and repair of components. Doctoral dissertation, Dublin City University, 1997.
9. Процессы формирования газотермических покрытий и их моделирование. Минск: Беларус. наука, 2011. – 357 с.
10. Harrison R. Processing and Characterisation of ZrCxNy Ceramics as a Function of Stoichiometry via Carbothermic Reduction-Nitridation / R. Harrison // Doctoral dissertation, Imperial College London, 2015.
11. Larijani M.M. The effect of carbon fraction in Zr(C,N) films on the nano-structural properties and hardness / M.M. Larijani, M.B. Zanjanbar, A. Majdabadi // Journal of Alloys and Compounds. – 2010. – № 492(1-2). – P. 735-738.
12. Матренин С.В. Структура и физико-механические свойства керамики на основе ZrCN / С.В. Матренин, Е.Д. Кузьменко // Инновационные технологии в машиностроении: сб. трудов XV Международной научно-практической конференции. Томск: ТПУ, 2024. С. 13-15.
13. Carbides of transition metals: Properties, application and production. Review / Yu.L. Krutskii et al // Part 2. Chromium and zirconium carbides. Izvestiya. Ferrous Metallurgy. – 2023. – № 66(4). – P. 445-458. https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-4-445-458.
14. Ul-Hamid A. Synthesis, microstructural characterization and nanoindentation of Zr, Zr-nitride and Zr-carbonitride coatings deposited using magnetron sputtering / A. Ul-Hamid // Journal of Advanced Research. – 2021. – № 29. – P. 107-119.
15. Марков Ю.М. Получение карбонитрида циркония в режиме СВС-Аз / Ю.М. Марков // Современные материалы, техника и технологии. – 2017. – № 6 (14). – P. 88-93.
16. Матренин С.В. Структура и физико-механические свойства керамики на основе ZrCN / С.В. Матренин, Е.Д. Кузьменко // Инновационные технологии в машиностроении: сборник трудов XV Международной научно-практической конференции, г. Юрга, 23-25 мая 2024 г. – P. 13-15.

References

1. Microstructure and Mechanical Properties of ZrN, ZrCN and ZrC Coatings Grown by Chemical Vapor Deposition / F. Frank et al // Coatings. – 2021. – № 11(5). – R. 491. https://doi.org/10.3390/coatings11050491. (In English).
2. Shishkin R.A. The study of physico-chemical transformations in the process of low-temperature synthesis of zirconium carbide / R.A. Shishkin, V.S. Kudyakova, N.V. Zhirenkina // NOVYE OGNEUPORY (NEW REFRACTORIES). – 2019. – № 2. – R. 45-48. https://doi.org/10.17073/1683-4518-2019-2-45-48. (In English).
3. Electrochemical performance of TiCN coatings with low carbon concentration in simulated body fluid / Q. Wang et al // Surf. Coat. Technol. – 2014. – № 253. – R. 199-204. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.05.037. (In English).
4. Improving the Efficiency of Air Plasma Spraying of Titanium Nitride Powder / A. Kengesbekov et al // Coatings. – 2022. – № 12(11). – 1644. https://doi.org/10.3390/coatings12111644. (In English).
5. Preparation and Characterization of NiCr/NiCr-Al_2O_3/Al_2O_3 Multilayer Gradient Coatings by Gas Detonation Spraying / B. Rakhadilov et al // Coatings. – 2021. – № 11(12). – R. 1524. https://doi.org/10.3390/coatings11121524. (In English).
6. Development and Studying of the Technology for Thermal Spraying of Coatings Made from Ultra-High-Molecular-Weight Polyethylene / M. Skakov et al // Coatings. – 2023. – № 13(4). – R. 698. https://doi.org/10.3390/coatings13040698. (In English).

7. Oksa M. Nickel- and iron-based HVOF thermal spray coatings for high temperature corrosion protection in biomass-fired power plant boilers / M. Oksa // Dissertation. Aalto University, 2015. https://publications.vtt.fi/pdf/science/2015/S74.pdf. (In English).
8. Tan J.C. Optimisation of the HVOF thermal spray process for coating, forming and repair of components. Doctoral dissertation, Dublin City University, 1997. (In English).
9. Protsessy formirovaniya gazotermicheskikh pokrytii i ikh modelirovanie. Minsk: Belarus. nauka, 2011. – 357 s. (In Russian).
10. Harrison R. Processing and Characterisation of ZrCxNy Ceramics as a Function of Stoichiometry via Carbothermic Reduction-Nitridation / R. Harrison // Doctoral dissertation, Imperial College London, 2015. (In English).
11. Larijani M.M. The effect of carbon fraction in Zr(C,N) films on the nano-structural properties and hardness / M.M. Larijani, M.B. Zanjanbar, A. Majdabadi // Journal of Alloys and Compounds. – 2010. – № 492(1-2). – R. 735-738. (In English).
12. Matrenin S.V. Struktura i fiziko-mekhanicheskie svoistva keramiki na osnove ZrCN / S.V. Matrenin, E.D. Kuz'menko // Innovatsionnye tekhnologii v mashinostroenii: sb. trudov XV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. Tomsk: TPU, 2024. S. 13-15. (In Russian).
13. Carbides of transition metals: Properties, application and production. Review / Yu.L. Krutskii et al // Part 2. Chromium and zirconium carbides. Izvestiya. Ferrous Metallurgy. – 2023. – № 66(4). – R. 445-458. https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-4-445-458. (In English).
14. Ul-Hamid A. Synthesis, microstructural characterization and nanoindentation of Zr, Zr-nitride and Zr-carbonitride coatings deposited using magnetron sputtering / A. Ul-Hamid // Journal of Advanced Research. – 2021. – № 29. – R. 107-119. (In English).
15. Markov YU.M. Poluchenie karbonitrida tsirkoniya v rezhime SVS-Az / YU.M. Markov // Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii. – 2017. – № 6 (14). – R. 88-93. (In Russian).
16. Matrenin S.V. Struktura i fiziko-mekhanicheskie svoistva keramiki na osnove ZrCN / S.V. Matrenin, E.D. Kuz'menko // Innovatsionnye tekhnologii v mashinostroenii: sbornik trudov XV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, g. Yurga, 23-25 maya 2024 g. – R. 13-15. (In Russian).

Благодарности

Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP22787358).

Ш.Р. Курбанбеков[1], Д.Р. Патчаханов[*], С.Х. Камбарбеков[2], Б.С. Қалдар[1]
[1]Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті,
161200, Қазақстан, Түркістан, Б. Саттарханов көшесі, 29
[2]Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті,
070016, Қазақстан, Өскемен, 30-Гвардиялық дивизия көшесі, 36
[*]e-mail: itsxxdi@gmail.com

ZRCN ЖАБЫНДАРЫНЫҢ ҚҰРЫЛЫМДЫҚ-ФАЗАЛЫҚ СИПАТТАМАЛАРЫН HVOF-ПРОЦЕСІНІҢ ПАРАМЕТРЛЕРІНІҢ ӘСЕРІМЕН ЗЕРТТЕУ

Бұл зерттеу жұмысында жоғары жылдамдықты оттегі-отынды бүрку (HVOF) әдісімен алынған ZrCN жабындарының құрылымдық-фазалық сипаттамаларына оттегі қысымының әсері қарастырылды. Жабындар 65Г болатының бетіне «Termika-3» қондырғысында отын, ауа және бүрку арақашықтығының тұрақты параметрлерін сақтай отырып, оттегі қысымын 4,0-4,5 бар аралығында өзгерту арқылы алынды. Рентгенофазалық талдау нәтижесінде жабындардың негізгі матрицасы гранецентрлі кубтық торлы (Fm-3m) Zr(C,N) қатты ерітіндісінен тұратыны анықталды. Оттегі қысымының артуы ZrCN қосылысының ішінара термиялық ыдырауына және ZrC, ZrN фазаларының, сондай-ақ ZrO_2 оксидтік қосылыстарының түзілуіне алып келеді. Жабын құрылымында оттегінің қанығуы, түйіршіктердің майдалануы және тор параметрінің ұлғаюы байқалды. (A-c) жабындарының микроқаттылығы 1512-1857 HV деңгейіне дейін жетеді, бұл бастапқы үлгімен салыстырғанда шамамен бес есе артуға сәйкес келеді. Алынған нәтижелер HVOF процесіндегі оттегі қысымын реттеу жабындардың фазалық құрамы мен морфологиясына, сондай-ақ адгезиялық байланыстардың сапасына айтарлықтай әсер ететінін көрсетті. Бұл өз кезегінде жабындардың қаттылығы, пластикалығы және термиялық тұрақтылығының оңтайлы үйлесіміне қол жеткізуге мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: *HVOF, ZrCN жабын, 65Г болат, XRD, SEM.*

Sh.R. Kurbanbekov[1], D.R. Patchakhanov[1]*, S.Kh. Kambarbekov[2], B.S. Kaldar[1]
[1]Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University,
161200, Kazakhstan, Turkestan, B. Sattarkhanova str., 29
[2]Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University,
070016, Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk, 30th Guards Division Street, 36
*e-mail: itsxxdi@gmail.com

STUDY OF STRUCTURAL-PHASE CHARACTERISTICS OF ZrCN COATINGS UNDER THE INFLUENCE OF HVOF PROCESS PARAMETERS

This study investigates the effect of oxygen pressure during high-velocity oxy-fuel (HVOF) spraying on the formation and structural-phase characteristics of ZrCN coatings deposited on 65G steel. The coatings were produced using the Termika-3 system under fixed parameters of fuel, air flow, and spray distance, with oxygen pressure varied in the range of 4.0-4.5 bar. X-ray diffraction analysis revealed that the main coating matrix consists of a Zr(C,N) solid solution with a face-centered cubic lattice (Fm-3m). Increasing the O_2 pressure leads to partial thermal decomposition of ZrCN and the formation of ZrC, ZrN, and oxide phases such as t-ZrO_2. Oxygen enrichment of the coatings results in grain refinement and lattice parameter expansion. The microhardness of the coatings (a-c) reaches 1512-1857 HV, which corresponds to an approximately fivefold increase relative to the initial sample. Based on the obtained results, it was shown that regulating the oxygen pressure in the HVOF jet significantly affects the phase composition, morphology, and adhesion quality, providing an optimal combination of hardness, ductility, and thermal stability.

Key words: *HVOF, ZrCN coating, 65G steel, XRD, SEM.*

Сведения об авторах

Шерзод Рустамбекович Курбанбеков – директор НИИ «Естественные науки, нанотехнологии и новые материалы» Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмета Яссави, г. Туркестан, Казахстан; e-mail: sherzod.kurbanbekov@ayu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5510-0568.

Дияр Равшанулы Патчаханов* – Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмеда Ясави, кафедра физики, студент, г. Туркестан, Казахстан; e-mail: itsxxdi@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-4153-0874.

Сардор Хуснутдинович Камбарбеков – докторант 1-го курса Восточно-Казахстанского университета имени С. Аманжолова; e-mail: sardor.kambarbekov@ayu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-6794-1281.

Берик Калдар – младший научный сотрудник Научно-исследовательского института естественных наук, нанотехнологий и новых материалов; e-mail: berik.kaldar@ayu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-9267-7029.

Авторлар туралы мәліметтер

Шерзод Рустамбекович Курбанбеков – Жаратылыстану ғылымдары, нанотехнологиялар және жаңа материалдар ҒЗИ директоры, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Түркістан қ., Қазақстан; e-mail: sherzod.kurbanbekov@ayu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5510-0568

Дияр Равшанұлы Патчаханов – Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Физика кафедрасы, студент, Түркістан қ., Қазақстан; e-mail: itsxxdi@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-4153-0874.

Сардор Хуснутдинович Камбарбеков – С. Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университетінің 1-курс докторанты; e-mail: sardor.kambarbekov@ayu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-6794-1281.

Берік Калдар – «Жаратылыстану ғылымдары, нанотехнология және жаңа материалдар» ғылыми-зерттеу институтының кіші ғылыми қызметкері; e-mail: berik.kaldar@ayu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-9267-7029.

Information about the authors

Sherzod Rustambekovich Kurbanbekov – Director of the SRI «Natural Sciences, Nanotechnology and New Materials», Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University, Turkestan, Kazakhstan; e-mail: sherzod.kurbanbekov@ayu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5510-0568.

Diyar Ravshanuly Patchakhanov* – International Kazakh-Turkish University named after Khoja Akhmet Yasawi, Department of Physics, student, Turkestan, Kazakhstan; e-mail: itsxxdi@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-4153-0874.

Sardor Khusnutdinovich Kambarbekov – First-year doctoral student at S. Amanzholov East Kazakhstan University; e-mail: sardor.kambarbekov@ayu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-6794-1281.

Berik Kaldar – Junior Researcher at the Research Institute of Natural Sciences, Nanotechnology, and New Materials; e-mail: berik.kaldar@ayu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-9267-7029.

Поступила в редакцию 05.01.2026
Поступила после доработки 18.02.2026
Принята к публикации 19.02.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-60

ҒТАХР: 44.31.35

CC BY 4.0
Check for updates

М.Қ. Жамбаева[*], О.А. Степанова[1], А.Б. Касымов[1], М.В. Ермоленко[1], К.С. Астемесова[2]
[1]Шәкәрім университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинки көшесі, 20А
[2]Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті,
050043, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Сәтпаев көшесі 22
[*]e-mail: zhambaeva_94@mail.ru.

МЕТАЛДАРДЫ КЕСУДЕГІ MQL ЖАҒДАЙЫНДА МАЙЛАУ-СУЫТУ СҰЙЫҚТЫҚТАРЫНЫҢ ЖЫЛУФИЗИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН ОҢТАЙЛАНДЫРУ

Аңдатпа: *Мақалада металдарды механикалық өңдеу кезінде минималды мөлшерде майлау (MQL) технологиясын қолдану арқылы қолданылатын майлау-суыту сұйықтықтардың (МСС) және наномодификацияланған майлардың жылуфизикалық қасиеттеріне арналған заманауи зерттеулерге шолу ұсынылған. Мақалада майлы, суды және эмульсиялық негіздегі негізгі МСС түрлері, олардың жылуфизикалық сипаттамалары және металдарды қарқынды кесу кезінде эксплуатация талаптары қарастырылған.*

Арнайы назар әртүрлі нанобөлшектерді (Al_2O_3, TiO_2, SiO_2, ZnO, графен т.б.) қосудың МСС жылуөткізгіштік қасиеттерін арттыруға, үйкелісті, тұтқырлықты, тығыздықты және жылу сыйымдылығын төмендетуге әсеріне аударылған. Жарияланымдарды талдау наномодификацияланған МСС және MQL технологиясын зерттеуге мүмкіндік берді.

Зерттеу нәтижелері наномодификацияланған МСС қолдану жылу алмасу қарқындылығын арттырып, кесу құралының тозуын төмендететінін және МСС шығынын оңтайландыру арқылы өңдеу тиімділігін арттыруға мүмкіндік беретінін көрсетті. Сонымен қатар, жылуөткізгіштік пен тұтқырлық көрсеткіштерін оңтайландыру мақсатында МСС құрамы мен нанобөлшектер концентрациясын реттеу қажеттілігі көрсетілген.

Мақала MQL технологиясы жағдайында наномодификацияланған МСС-ны әрі қарай зерттеуге және практикалық қолдануға негіз болып табылады, бұл металдарды өңдеудің энергия тиімді және экологиялық қауіпсіз процестерін дамытуға ықпал етеді және өнеркәсіптік өндірісте кеңінен енгізілуіне мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: *майлау-суыту сұйықтық (МСС), минималды мөлшерде майлау (MQL), өсімдік майлары, нано-сұйықтықтар, механикалық өңдеу, құралдың тозуы.*

Кіріспе

Металдарды өңдеу технологияларын жетілдіру және энергия үнемдейтін, экологиялық қауіпсіз кесу әдістерін енгізу жағдайында кесу аймағында тиімді жылу шығарудың және үйкелісті төмендетудің рөлі арта түседі. Осыған байланысты металдарды механикалық өңдеуде қолданылатын майлау-суыту сұйықтықтарға (МСС) жоғары талаптар қойылады, ең алдымен олардың жылуфизикалық сипаттамаларына, тұтқырлығына, эксплуатациялық сенімділігіне және энергия тиімділігіне.

Дәстүрлі көлемдік берілетін МСС әрдайым құралдың тозуын азайтып, оптималды салқындату жағдайларын қамтамасыз ете алмайды, әсіресе кесу жылдамдығы жоғары және сұйықтық шығыны минималды болған жағдайда. Сонымен қатар, металдарды қарқынды кесу

М.Қ. Жамбаева, О.А. Степанова, А.Б. Касымов, М.В.Ермоленко, К.С. Астемесова, 2026

локалды қыздыру мен жоғары үйкеліс тудырады, бұл стандартты майлау-салқындату жүйелерінің тиімділігін шектейді.

Осыған байланысты минималды мөлшерде майлау (MQL) технологиясы жағдайында наномодификацияланған МСС қолдану өзекті болып табылады. Бұл технология сұйықтық шығынын айтарлықтай төмендетуге мүмкіндік береді, сонымен бірге жылу шығаруды жақсартады, үйкелісті азайтады және құралдың қызмет мерзімін ұзартады. Жоғары жылуөткізгішті материалдардың нанобөлшектерін МСҚ құрамына енгізу жылуөткізгіштікті арттыруға, тұтқырлықты реттеуге және сұйықтықтың жылуфизикалық қасиеттерін жақсартуға ықпал етеді, бұл кесу процестерінің қарқындылығын арттырудың жаңа мүмкіндіктерін ашады.

Осы шолу мақаласының мақсаты – майлау-суыту сұйықтықтардың және олардың наномодификацияланған нұсқаларының жылуфизикалық қасиеттеріне арналған заманауи ғылыми зерттеулерді талдау және қорытындылау, сондай-ақ MQL технологиясын қолданудың тиімділігін арттыру, үйкелісті азайту және металдарды кесу процесін оңтайландыру перспективаларын бағалау болып табылады.

Зерттеу әдістері

Бұл жұмыс металдарды өңдеу кезінде минималды мөлшерде майлау (MQL) технологиясын қолдана отырып, майлау-суыту сұйықтықтардың (МСС) жылуфизикалық қасиеттерін оңтайландыруға арналған заманауи зерттеулерді талдауға бағытталған. Негізгі назар МСС құрамының, нанобөлшектердің енгізілуінің және беру режимдерінің жылу шығаруға, үйкелісті азайтуға және металдарды кесу тиімділігін арттыруға әсерін зерттеуге аударылады.

Әдебиеттерді іздеу және іріктеу халықаралық ғылыми деректер базалары Scopus және Web of Science арқылы жүргізілді, бұл кесу механикасы, трибология, жылу алмастыру және майлау-суыту жүйелеріндегі нанотехнологиялар бойынша рецензияланған жарияланымдарға қол жеткізуді қамтамасыз етті. Талдау кезеңі 2010 жылдан 2025 жылға дейінгі уақытты қамтиды, бұл MQL технологиялары мен наномодификацияланған МСС қолданудың қазіргі үрдістерін анықтауға мүмкіндік береді.

Шолу мақалаға енгізілген жарияланымдар келесі критерийлерге сәйкес болуы тиіс:

– рецензияланған ғылыми журналдарда жарияланған мақалалар;

– металдарды кесу кезінде МСС жылуфизикалық қасиеттерін тәжірибелік, сандық немесе теориялық зерттеулерге арналған жұмыстар;

– минималды мөлшерде майлау технологиясын қолдану және наномодификацияланған МСС қолдануды зерттейтін зерттеулер;

– жылу шығару, үйкеліс, құралдың тозуы және кесу процесінің тиімділігі бойынша сандық деректерді қамтитын жарияланымдар.

Іріктелген жарияланымдар МСС құрамының, нанобөлшектер концентрациясының, негіз сұйықтықтың және беру режимінің майлау-салқындатқыш сұйықтықтардың жылуфизикалық қасиеттеріне, салқындату тиімділігіне және құрал тозуын азайтуға әсер ету заңдылықтарын анықтау үшін жүйелендірілді. Арнайы назар келесі мәселелерге аударылды:

– дәстүрлі МСС мен наномодификацияланған сұйықтықтарды салыстыру;

– нанобөлшектердің мөлшері мен түрінің МСС жылуөткізгіштік және тұтқырлық қасиеттеріне әсері;

– минималды мөлшерде майлау кезінде берілу режимін оңтайландыру арқылы энергия тиімділігі мен экологиялық қауіпсіздікті арттыру.

Талдау көрсеткендей, MQL жағдайында МСС құрамына нанобөлшектерді қосу жылу шығаруды едәуір арттыруға, үйкелісті және құрал тозуын азайтуға мүмкіндік береді, бұл металдарды кесудің энергия тиімді және экологиялық қауіпсіз технологияларын әрі қарай дамытуға перспективалар ашады.

Зерттеу нәтижелері

Майлау-суыту сұйықтықтары (МСС) механикалық өңдеу процестерінде (бұрғылау, фрезерлеу, токарлық өңдеу, кесу және т.б.) қолданылады және кесу процесінің жағдайын жақсарту мен кескіш құралдың қызмет ету мерзімін арттыру үшін пайдаланылады. МСС-ның негізгі функциясы – өңдеу кезінде бөлінетін жылуды азайту, сондай-ақ екі объект арасындағы үйкелісті едәуір төмендету. Металды кесу барысында МСС жоңқа түзілу аймағына беріледі.

МСС-ның негізгі қасиеттері:

– жоғары тұтану температурасы;

– жабдықтың коррозиясын тудырмайды;

– жұмыс барысында адамға зиянсыз;

– үйкеліс күшін азайтып, энергия тұтынуды төмендететін тиімді майлау қасиеттері;

– жоғары меншікті жылусыйымдылық, жоғары жылуөткізгіштік және қабықша түзу коэффициентінің жоғары болуы;

– ауада тотығуға және ыдырауға тұрақтылығы.

Нарықта негізінен МСС-ның төрт түрлі түрі қолжетімді:

1. суда еритін майлау-салқындату майлары;
2. таза майлау-салқындату майлары;
3. синтетикалық салқындату сұйықтықтары;
4. қатты майлау материалдары.

МСС-ның барынша тиімділігін қамтамасыз ету үшін жоғары сапалы сұйықтықтарды таңдау ұсынылады. МСС-ны дұрыс таңдау, ең алдымен, өңделетін материалға және қолданылатын құралға, сондай-ақ орындалатын операция түріне және қажетті салқындату әсерінің деңгейіне байланысты. Әдетте, латунь үшін құрғақ өңдеу тиімді, мыс негізіндегі материалдар үшін скипидар ұсынылады, алюминий үшін керосин ең қолайлы МСС болып табылады, ал болат үшін МСС-ның кез келген түрін қолдануға болады. Жылдамкескіш болат, қатты болат немесе қола үшін таза МСС немесе минералды май пайдалану ұсынылады.

Соңғы онжылдықтарда механикалық өңдеу процестерінде салқындату мен майлау үшін МСС қолданудың орындылығы жиі талқылануда [1]. МСС қолдану әдетте құрал шығынын азайтуға, қатаң дәлдік талаптарын сақтауға және дайындаманың беткі қасиеттерін зақымдамай қамтамасыз етуге мүмкіндік береді. МСС қолданудың артықшылықтарына құралдың қызмет ету мерзімін ұзарту, өңдеу уақытын қысқарту және беттің сапасын жақсарту жатады. Алайда, МСС-ның кемшіліктері де бар, оларға сақтау, дайындау, сүзу және қайта өңдеуге кететін жоғары шығындар, сондай-ақ қоршаған ортаның ластануы жатады.

Қоршаған орта мен адам денсаулығына байланысты мәселелерге байланысты механикалық өңдеу кезінде МСС тұтынуын азайтатын баламалы әдістер ұсынылды. Мұндай әдістерге бүрку арқылы беру, құрғақ өңдеу және ішкі салқындату жатады. Дегенмен, тісті дөңгелектерді жасау, протяжкалау және хондау сияқты процестерде МСС қолдану міндетті болып табылады. 1-кестеде МСС-ның әртүрлі қасиеттері келтірілген [1].

Кесте 1 – Әртүрлі негіздегі майлау-суыту сұйықтықтарының қасиеттері [1]

Қасиеттері	Миниралды майлар	Эмульсиялар	Жартылай синтетикалық майлар	Синтетикалық майлар
Сыртқы түрі	Мұнай негізінде	Тұнық емес	Жартылай тұнық	Жартылай тұнық
Майлау	Өте жақсы	Жақсы	Жақсы	Әлсіз
Суыту	Әлсіз	Жақсы	Жақсы	Өте жақсы
Жоңқаны (ұнтақты) шығару	Орташа	Орташа	Орташа	Орташа
Коррозияға қарсы бақылау	Өте жоғары	Әлсіз	Жақсы	Жақсы
Микробиологиялық бақылау	Өте жоғары	Әлсіз	Жақсы	Өте жақсы
Отқа төзімділік	Өртке қауіпті	Қауіпсіз	Қауіпсіз	Қауіпсіз

[1] жұмыста МСС металды кесу кезінде екі негізгі функцияны – суыту мен майлауды орындау үшін кеңінен қолданылатыны атап өтілген. МСС берудің ең кең таралған әдісі – ағынмен немесе толық батыру арқылы суыту, мұнда сұйықтықтың үлкен көлемі кесу аймағына беріледі. МСС-ның шамадан тыс қолданылуы өндіріс шығындарын арттырып қана қоймай, қоршаған орта мен адам денсаулығына елеулі қауіп төндіреді. Осы жұмыста қолданылатын МСС мөлшерін азайту және кесу параметрлері мен сұйықтық беру параметрлерін оңтайландыруға талпыныс жасалды. Зерттеу маймен шынықтырылған шөгусіз аспаптық болатты токарлық өңдеу кезінде Тагучи әдісін қолдана отырып, минималды МСС пайдалану арқылы жүргізілді. Алынған оңтайландырылған нәтижелер бірдей кесу жағдайларында құрғақ жону және дәстүрлі дымқыл жонумен салыстырылды (2-кесте).

Кесте 2 – Әртүрлі әдістер кезіндегі майлау-суыту сұйықтықтары көрсеткіштерінің салыстырмасы [1]

Көрсеткіштері	1 деңгей	2 деңгей	3 деңгей
Кесу жылдамдығы, м/мин	128,64	148,44	168,23
Айналу жиілігі	0,04	0.06	0,08
Кесу тереңдігі, мм	0,5	0,75	1,0
Инжектордағы қысым, Бар	50	75	100
Пульсация жиілігі, соққы/мин	500	700	900
МСС беру жылдамдығы, мл/мин	3	6	9
МСС мөлшері	10	20	30

Майлау-суыту сұйықтықтар (МСС) металдарды кесу технологиялық процестерінің ажырамас бөлігі болып табылады. Олар кесу күштерін төмендетуді, кескіш құралдың тозуын азайтуды, өңдеу аймағынан жылуды тиімді әкетуді және өңделетін беттің сапасын арттыруды қамтамасыз етеді. МСС тиімділігі негізінен олардың жылуфизикалық қасиеттерімен, атап айтқанда жылуөткізгіштік, жылусыйымдылық, тұтқырлық, суланғыштық және термиялық тұрақтылық көрсеткіштерімен анықталады.

Металдарды кесу процестерінде минималды мөлшерде майлау (Minimum Quantity Lubrication, MQL) технологиясы 1990-жылдардың соңынан бастап экологиялық талаптардың қатаңдауы және машина жасау өндірісінде энергия тиімділігін арттыру қажеттілігіне байланысты кеңінен қолданыла бастады. Бұл әдісте кесу аймағына дәстүрлі суыту тәсілдерімен салыстырғанда көлемі едәуір аз (шамамен 10-100 мл/сағ) майлау-суыту сұйықтық (МСС) аэрозоль түрінде беріледі. Нәтижесінде МСС шығыны айтарлықтай азайып, өндірістік экологиялық жүктеме төмендейді және еңбек қауіпсіздігі артады. Сонымен қатар, кескіш құрал мен дайындама арасындағы жанасу аймағындағы жылуалмасу мен үйкеліс жағдайлары өзгереді.

Алайда MQL жағдайында сұйықтық көлемінің аз болуы базалық майлардың салыстырмалы түрде төмен жылуөткізгіштігі мен жылусыйымдылығы салдарынан кесу аймағында жергілікті қызып кетуге, құралдың жедел тозуына және өңделген беттің сапасының төмендеуіне әкелуі мүмкін. Осыған байланысты МСС-ның жылуфизикалық қасиеттерін жақсарту MQL технологиясының тиімділігін арттырудың маңызды бағыты болып табылады.

Перспективалы шешімдердің бірі – наномодификацияланған МСС қолдану. 1995 жылдан бастап заманауи технологияларда қолданылып келе жатқан наносұйықтықтар базалық майлардың құрамына жылуөткізгіштігі жоғары нанобөлшектерді енгізу арқылы олардың жылуөткізгіштік қасиеттерін арттыруға мүмкіндік береді. Наноқоспалар ретінде көбінесе металл оксидтері (Al_2O_3, CuO), молибден дисульфиді (MoS_2), графен және көміртекті нанотүтікшелер пайдаланылады. Нанобөлшектердің оңтайлы концентрациясын таңдау жылуөткізгіштік пен тұтқырлық көрсеткіштері арасындағы оңтайлы арақатынасты қамтамасыз етіп, аэрозольдің тұрақты шашырауын сақтауға және кесу аймағында тиімді жылуалмасуды жүзеге асыруға мүмкіндік береді.

MQL жағдайында МСС-ның жылуфизикалық қасиеттерін оңтайландыру базалық сұйықтықтың оңтайлы құрамын, нанобөлшектердің түрі мен концентрациясын дұрыс таңдауды, сондай-ақ олардың тұрақты дисперсиясын қамтамасыз етуді қамтиды. Бұл ретте тұтқырлық пен наносұйықтықтың тұрақтылығын бақылау ерекше маңызға ие, себебі тұтқырлықтың шамадан тыс артуы аэрозольдің шашырауын нашарлатып, МСС-ды кесу аймағына жеткізудің тиімділігін төмендетуі мүмкін.

Осылайша, минималды мөлшерде майлау технологиясында наномодификацияланған майлау-суыту сұйықтықтарды қолдану жылуалмасуды қарқындатудың және құралдың тозуға төзімділігін арттырудың тиімді тәсілі болып табылады, сонымен қатар экологиялық және экономикалық шығындарды азайтуға мүмкіндік береді. Бұл саладағы одан әрі зерттеулер әртүрлі кесу режимдерінде нанобөлшектердің түрі мен концентрациясының МСС-ның жылуфизикалық және трибологиялық сипаттамаларына әсер ету заңдылықтарын анықтауға бағытталады.

[1] мақалада дәстүрлі механикалық өңдеу процестерінде МСС қолданудың соңғы жетістіктері мен қолдану салалары қарастырылады. Дәстүрлі және озық салқындату әдістерін шолуымен қатар, мақалада минималды майлау мөлшерін (MQL) қолдану да талқыланады,

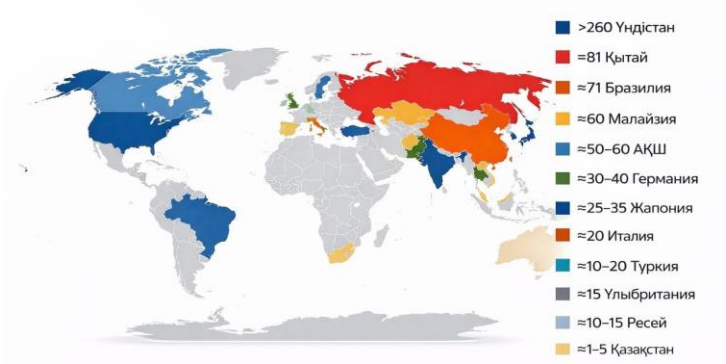
әсіресе болат, алюминий, легирленген және титан қорытпалары сияқты металдар үшін қарастырылған.

Дәстүрлі МСС токсикалық болуына байланысты экологиялық мәселелер туындайды, сондықтан экологиялық қауіпсіз МСС-қа сұраныс артып келеді. Осы себептен, биоыдыралу мен тұрақтылықтың маңызды аспектілеріне сай, табиғи өсімдік майы әлеуетті экологиялық таза МСС ретінде таңдалды. Сонымен қатар мақалада өсімдік майы негізіндегі МСС-ны MQL технологиясында қолдану да қарастырылады. 1 суретте майлау-суыту сұйықтықтарының әртүрлі түрлері көрсетілген.



Сурет 1 – Майлау-суыту сұйықтықтарының (МСС) әртүрлі түрлері

2-суретте [2] көрсетілген зерттеу деректері негізінде дәстүрлі мол суыту әдісі және минималды мөлшерде майлау технологиясы жағдайында қолданылатын майлау-суыту сұйықтықтарының (МСС) жылуфизикалық сипаттамаларының айырмашылықтары егжей-тегжейлі бейнеленген. Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, MQL технологиясын қолданған кезде базалық майлардан дайындалған және су мен май қоспасынан тұратын МСС-пен салыстырғанда, сұйықтықтардың жылуды әкету қабілеті айтарлықтай төмен болады. Бұл жағдай кесу аймағында температураның айтарлықтай көтерілуіне әкеліп, құрал мен өңделіп жатқан материалдың жұмыс режиміне әсер етуі мүмкін.



Сурет 2 – Әлемдік MQL және МСС зерттеулері бойынша елдер бойынша салыстырмалы географиялық талдау картасы

Сонымен қатар, MQL технологиясын қолданудың бірқатар артықшылықтары бар. Біріншіден, сұйықтық шығынын едәуір азайтуға мүмкіндік береді. Дәстүрлі мол суыту әдісінде металл кесу процесінде үлкен көлемде МСС пайдаланылады, бұл өндірістік шығындарды арттырады және қоршаған ортаға қосымша жүктеме түсіреді. Ал MQL әдісі өте аз мөлшерде сұйықтықты (миллилитр/минут деңгейінде) қолдана отырып, құрал мен өңделетін материалды жеткілікті түрде майлау және суыту мүмкіндігін береді. Бұл технология экологиялық тұрғыдан

тиімді болып, өндірістік ортадағы химиялық және су ресурстарын тұтынуды азайтуға септігін тигізеді.

Сонымен қатар, MQL технологиясы құралдың қызмет ету мерзімін ұзартып, өндірістік процестің тиімділігін арттыруға ықпал етеді. Бұл әсіресе жоғары жылдамдықтағы кесу операцияларында маңызды, себебі температураның көтерілуі кесу жиілігі мен тереңдігіне тікелей байланысты. MQL жағдайында жылуды жеткілікті мөлшерде тарату шектеулі болғанымен, аз мөлшердегі сұйықтықты дәл бағыттау және кесу аймағына тұрақты жеткізу арқасында процесстің сапасы төмендемейді.

Осылайша, [2-4] салыстырмалы деректерде MQL және дәстүрлі мол суыту әдістерінің жылуфизикалық сипаттамаларындағы айырмашылықтарды айқын көрсетеді. MQL технологиясының негізгі артықшылығы – қоршаған ортаға түсетін экологиялық жүктемені азайтып, сұйықтық шығынын төмендету, ал дәстүрлі мол суыту әдісінің негізгі артықшылығы – кесу аймағындағы жылуды тиімді тарату арқылы материал мен құралдың тозуын төмендету болып табылады. Осы факторлар өндірістік процесті оңтайландыру және өндіріс тиімділігін арттыру тұрғысынан маңызды.

Бірқатар зерттеушілер [1-3] MQL жағдайында MCC тиімділігі негізінен олардың жылуфизикалық және трибологиялық қасиеттерімен анықталатынын атап көрсетеді. Атап айтқанда, авторлар MQL үшін оңтайландырылған MCC-ның келесі артықшылықтарын бөліп көрсетеді:

- кесу аймағында тұрақты майлау қабықшасының түзілуі нәтижесінде үйкеліс коэффициентінің төмендеуі;
- кескіш қырдың температурасының төмендеуі және құралдың термиялық тозуының баяулауы;
- өңделген беттің сапасының жақсаруы және кедір-бұдырлықтың төмендеуі;
- кесу процесіне жұмсалатын энергетикалық шығындардың қысқаруы [1-3].

MQL технологиясы кезінде MCC тиімділігін арттырудың перспективалы бағыттарының бірі – наномодификацияланған сұйықтықтарды қолдану болып табылады. Базалық майлардың құрамына жылуөткізгіштігі жоғары қатты нанобөлшектерді енгізу минималды сұйықтық шығынына тән жылу әкетудің жеткіліксіздігін өтеуге мүмкіндік береді. Наноқоспалар ретінде көбінесе металл оксидтері (Al_2O_3, CuO), молибден дисульфиді (MoS_2), графен және көміртекті нанотүтікшелер қолданылады [4].

Наномодификацияланған MCC-ның тұтқырлығы базалық майлармен салыстырғанда артатынына қарамастан, бірқатар авторлар кесу процесіндегі жиынтық энергетикалық шығындардың жылуалмасудың қарқындануы және трибологиялық сипаттамалардың жақсаруы есебінен төмендейтінін атап өтеді. Бұл ретте нанобөлшектердің жылуөткізгіштікті арттыруы мен аэрозольдің тұрақты шашырауын сақтау арасындағы оңтайлы тепе-теңдікті қамтамасыз ететін концентрациясын таңдау шешуші фактор болып табылады.

Осылайша, минималды мөлшерде майлау технологиясын қолдана отырып металдарды кесу кезінде майлау-суыту сұйықтықтардың жылуфизикалық қасиеттерін оңтайландыру құралдың төзімділігін арттыруға, өңдеу сапасын жақсартуға және экологиялық жүктемені төмендетуге бағытталған перспективалы зерттеу бағыты болып табылады. Бұл саладағы одан әрі зерттеулер әртүрлі кесу режимдерінде нанобөлшектердің түрі, өлшемдері мен концентрациясының MCC-ның жылуалмасу және трибологиялық сипаттамаларына әсер ету заңдылықтарын анықтауға бағдарланған.

Қорыта айтқанда, металдарды кесу процесінде MQL технологиясы үшін наномодификацияланған MCC қолдану құралдың төзімділігін арттыруға, өңдеу сапасын жақсартуға және экологиялық жүктемені төмендетуге бағытталған перспективалы тәсіл болып табылады. Болашақ зерттеулер нанобөлшектердің түрі, өлшемдері мен концентрациясының жылуалмасу және трибологиялық қасиеттерге әсерін нақтылау мақсатында жүргізілуі қажет. 3-кестеде өсімдік майларының және наномодификацияланған өсімдік майларының қасиеттері көрсетілген.

Соңғы жылдары металдарды өңдеу процесінде минималды майлау технологиясы (MQL) белсенді түрде қолданыла бастады. Бұл технологияда майлау-суыту сұйықтықтың негізгі функциялары – құрал мен заготовка арасындағы үйкелісті азайту, кесу аймағында жылу алмасуды қамтамасыз ету және өңделген бетті қорғау. Дәстүрлі майлау-суыту сұйықтықтың қарағанда, MQL жүйесінде сұйықтық көлемі өте аз қолданылады, бұл жылуөткізгіштікке ерекше талап қояды.

Кесте 3 – Өсімдік майларының және наномодификацияланған өсімдік майларының қасиеттері.

Қасиеттер / Тип МСС	Таза өсімдік майлары	Өсімдік майлары + нанобөлшектер / ЕР қоспалар
Молекулалық құрам	Қанықпаған май қышқылдары жоғары концентрацияда, жоғары полярлық [8, 10, 18, 19]	Сол + нанобөлшектер (Al_2O_3, MoS_2, графен) немесе ЕР қоспалар [7, 9, 11-13, 15, 17, 20]
Майлау қабілеті	Жақсы, құрал тозуын 10-52% төмендетеді [8, 27-30, 32, 34]	Өте жақсы, құрал тозуын 34-56% төмендетеді [7, 9, 13, 29-31, 34]
Үйкеліс коэффициенті	Төмен [8, 10]	Төмен, тұрақты, қорғаныш қабықшалар түзіледі [7, 9, 13, 29. 30]
Қыздыру / кесу температурасы	Орташа төмендейді [8, 10, 18, 19]	Айтарлықтай төмендейді, жылуөткізгіштік жақсартылған [6, 9, 12, 13, 15, 17, 20]
Бет сапасы	Орташа / жоғары деңгейде жақсарады [8, 10]	Айтарлықтай жақсарады, микрозадирлер азаяды [7, 9, 13, 29, 34]
Тотығуға төзімділік	Төмен, шектеулі [6, 14, 10]	Артады, нанобөлшектер мен антиоксиданттар арқасында [6, 11, 14]
Қоршаған ортаға қауіпсіздік	Жоғары, биологиялық ыдырайды [8, 10, 18, 19]	Жоғары, аз уытты, экологиялық таза [7, 9, 13, 29, 34]
Шектеулері	Тотығу тұрақтылығы төмен, қарсы тозу қасиеті шектеулі [6, 14, 10]	Нанобөлшектер концентрациясын дұрыс таңдауды қажет етеді, тұтқырлық сәл жоғарылайды [7, 12, 13, 29, 30]
Эксплуатациялық тиімділік	Құрғақ өңдеумен салыстырғанда тозуды айтарлықтай төмендетеді; минералды майдан кейде тиімдірек [25, 8, 28-30, 32, 16, 34]	Құрғақ немесе дәстүрлі режимдермен салыстырғанда ең жоғары тиімділік; құрал қызмет мерзімі ұзартылады [7, 9, 13, 29, 34]
Артықшылықтары	Құрал тозуын азайтады, өңделген бет сапасын жақсартады, экологиялық таза [8, 10, 18, 19]	Құрал тозуын барынша азайтады, кесу температурасын төмендетеді, бет сапасы айтарлықтай жақсарады, тұрақты қорғаныш қабықшалар түзіледі, экологиялық таза [7, 9, 13, 29-31, 33, 34]

Зерттеулер көрсеткендей, MQL жүйесінде базалық майлар немесе су-этиленгликоль/пропиленгликоль негізіндегі майлау-суыту сұйықтықтар жылуды жеткілікті деңгейде әкету қабілетіне ие болмайды. Сондықтан, наноқұрылымдық қоспаларды (мысалы, Al_2O_3, CuO, графен, көп қабатты көміртекті нанотүтікшелер – MWCNT) енгізу арқылы сұйықтықтардың жылуфизикалық қасиеттерін жақсарту тиімді әдіс болып табылады. Нанобөлшектердің қосылуы:

– жылуөткізгіштікті арттырады: кейбір зерттеулерде ол 160%-ға дейін өскені байқалған;

– үйкелісті төмендетеді: тұрақты май қабықшасының түзілуі құрал тозуын азайтады;

– температураны төмендетеді: кесу аймағындағы жылу концентрациясын азайтып, құралдың термиялық тозуын тежейді.

Наносұйықтықтардың тиімділігі көбінесе нанобөлшектердің концентрациясы, өлшемі, пішіні, сондай-ақ сұйықтықтың температурасы мен ағыс режиміне байланысты. Зерттеулер көрсеткендей, кішірек нанобөлшектер тұтқырлықты арттырады, ал үлкенірек бөлшектер жылуөткізгіштікті күшейтеді. Ламинарлық немесе турбуленттік ағыс режимдері коэффициент жылуберуге елеулі әсер етеді.

MQL технологиясында майлау-суыту сұйықтықтары жылуфизикалық қасиеттерін оңтайландыру үшін келесі әдістер қолданылады:

1. Базалық сұйықтықты таңдау: өсімдік майлары немесе гликоль негізіндегі сұйықтықтар экологиялық таза, биологиялық ыдырайтын және құралдың майлау қабілетін қамтамасыз етеді.

2. Нанобөлшектерді енгізу: Al_2O_3, CuO, MoS_2, графен, MWCNT сияқты материалдар жылуөткізгіштікті арттырып, үйкелісті азайтады.

3. Қоспалар мен аддитивтерді қолдану: қарсы тозу (ЕР) және антиоксидант қоспалар майдың термиялық тұрақтылығын және трибологиялық қасиеттерін жақсартады.

4. Концентрацияны бақылау: нанобөлшектердің оптималды мөлшері (әдетте 0,2-1 wt.%) ағыстың тұтқырлығын және тиімділігін сақтап, аэрозольды жеткілікті шашырауды қамтамасыз етеді.

Зерттеулер [1-21] көрсеткендей, наномодификацияланған майлау-суыту сұйықтықтары MQL жүйесінде дәстүрлі майлауға қарағанда:

- құрал тозуын 34-56% төмендетеді,
- өңделген бет сапасын жақсартады,
- кесу температурасын төмендетеді,
- энергия шығынын азайтады.

Осылайша, MQL технологиясында металдарды өңдеуге арналған МСС жылуфизикалық қасиеттерін оңтайландыру – құрал ресурсын арттыру, өңделген беттің сапасын жақсарту және экологиялық әсерді азайтуға бағытталған перспективалы бағыт болып табылады. Алдағы зерттеулерде нанобөлшектердің түрі, мөлшері, концентрациясы және базалық сұйықтықтың табиғатының кесу процесіне әсерін жүйелі зерттеу қажет. Төмендегі 4 кестеде майлау-суыту сұйықтары негізіндегі өсімдік майы және наномодификацияланған майлардың зерттеу әдістері мен нәтижелерін салыстыру көрсеткіштері көрсетілген.

Кесте 4 – Майлау-суыту сұйықтары негізіндегі өсімдік майы және наномодификацияланған майлардың зерттеу әдістері мен нәтижелерін салыстыру

№	Зерттелген МСС	Зерттеу әдістері	Негізгі көрсеткіштер	Нәтижелері	Әдебиет
1	Таза өсімдік майлары	Оптикалық микроскопия, SEM, EDS; лазерлік профилометр, 3D-оптикалық микроскопия; pin-on-disk, шар-диск триботестер; CNC станоктарда MQL және дәстүрлі салқындату; пьезоэлектрлік динамометр	Құрал тозуы, бет сапасы, температура, тұтқырлық, тығыздық, қышқылдық саны	Құрал тозуы құрғақ өңдеуге қарағанда 10-52% төмен, бет сапасы жақсарған, температура төмендеген	[8, 25, 28-30, 32, 34, 16]
2	Өсімдік майлары + ЕР қоспалар	Оптикалық микроскопия, SEM, EDS; pin-on-disk, төртшарикті үйкеліс машинасы; CNC станоктарда MQL; профильметрия; вискозиметрия, спектроскопия	Құрал тозуы, үйкеліс коэффициенті, тозу тереңдігі, бет сапасы, физика-химиялық қасиеттер	Құрал тозуы құрғақ өңдеуге қарағанда 34% төмен, минералды майлармен салыстырмалы немесе одан жақсы нәтижелер, қорғаныш трибоқабықша түзілуі	[31, 16]
3	Өсімдік майлары + нанобөлшектер (Al_2O_3, CuO, графен, MWCNT)	Механикалық араластыру + ультрадыбыстық диспергация; тұтқырлық, тығыздық, жылуөткізгіштік, реология, тұрақтылық; CNC станоктарда MQL және дәстүрлі салқындату; кесу күші, температура, құрал тозуы, бет кедір-бұдырлығы өлшенген	Құрал тозуы, бет сапасы, температура, тұтқырлық, жылуөткізгіштік, суспензия тұрақтылығы	Құрал тозуы 56%-ға дейін төмендеді, бет сапасы жақсарды, температура азайды, 0,8 wt.% графен ең тиімді; тұрақты қорғаныш қабықша түзілді	[19, 20, 22, 35-42],
4	Таза өсімдік майлары MQL	MQL жүйесі; кесу күші (Kistler динамометрі), температура (ИК-камера), құрал тозуы, бет сапасы	Тұтқырлық, жылуөткізгіштік, суланғыштық	Тұтқырлық жоғары температурада азаяды, суланғыштық жеткілікті, құрал тозуы азайған	[18, 22, 35-45]

Қазіргі зерттеулер көрсеткендей, наномодификацияланған майлау-суыту сұйықтарын (МСС) қолдану металдарды өңдеу процестерінің тиімділігін минималды сұйықтық мөлшерін қолдану (MQL) кезінде айтарлықтай арттыруға мүмкіндік береді. Нанобөлшектерді (Al_2O_3, CuO, TiO_2, SiO_2, ZnO) базалық сұйықтыққа енгізу жылуөткізгіштікті арттырады, бұл кесу аймағындағы жылуды тиімді шығарып, құрал мен өңделетін детальдің жергілікті қызып кетуін төмендетуге септігін тигізеді. Сонымен қатар, оксидті нанобөлшектер жылуөткізгіштікті ұстап тұратын және тұрақты түрде арттыратын қасиетке ие, сондықтан олар MQL жүйелері үшін оңтайлы таңдау болып табылады [2, 16, 19].

Наносұйықтықтардың динамикалық тұтқырлығы – сұйықтық ағынының гидродинамикасы мен МСС-ның айналымына жұмсалатын энергияны анықтайтын негізгі параметр. О.Я. Хлиева және әріптестерінің зерттеулері көрсеткендей, тұтқырлық нанобөлшектер концентрациясы артқан сайын өседі және бөлшектердің пішіні, өлшемі, сондай-ақ нанофлюид құрамындағы беттік активті заттарға (БАЗ) байланысты болады [5]. Пропиленгликоль негізіндегі жүйелер әдетте этиленгликольмен салыстырғанда жоғары тұтқырлыққа ие, сондықтан MQL-де тиімді жеткізу үшін нанобөлшектердің концентрациясын оңтайландыру қажет.

Сұйықтықтың тығыздығы мен белгілі жылу сыйымдылығы МСС-ның жылу жинау қабілетіне және жылу жүктемесін есептеуге әсер етеді. Зерттеулер көрсеткендей, наносұйықтықтардың тығыздығы нанобөлшектер концентрациясы артқан сайын өседі, ал температураның жоғарылауымен азаяды; ал белгілі жылу сыйымдылығы салыстырмалы түрде тұрақты болып қалады [16-20]. Бұл әртүрлі өңдеу режимдерінде кесу аймағындағы жылулық балансын дұрыс бағалауға мүмкіндік береді.

Осылайша, MQL үшін МСС-ның жылуфизикалық қасиеттерін оңтайландыру кешенді тәсілді талап етеді, оның ішінде:

1. Жылуөткізгіштік пен майлау қабатының тұрақтылығын арттыру үшін нанобөлшектердің түрі мен концентрациясын таңдау.

2. Тұтқырлықты және ағыстың гидродинамикасын бақылау арқылы минималды сұйықтық мөлшерінде сұйықтықты біркелкі тарату.

3. Жылуфизикалық параметрлерді (тығыздық, жылу сыйымдылығы) ескере отырып, кесу аймағындағы жылу режимін дәл есептеу.

MQL технологияларында наномодификацияланған МСС-ды қолдану кесу температурасын төмендетуге, құрал тозуын азайтуға, деталь бетінің сапасын жақсартуға және энергия шығынын азайтуға мүмкіндік береді, бұл әсіресе жоғары жылдамдықтағы металдарды өңдеуде маңызды болып табылады.

Наножүйелерді металдарды өңдеу кезінде майлау-суыту сұйықтықтарының (МСС) жылуфизикалық қасиеттерін оңтайландыруда қолдану ерекше қызығушылық тудырады. Минималды мөлшерде майлауды қолдану технологиясы (Minimum Quantity Lubrication, MQL) наножүйелермен біріктірілгенде, кесу аймағында жылуды тиімді алып кетуге және үйкелісті азайтуға мүмкіндік береді. МСС құрамына нанобөлшектерді қосу сұйықтықтың жылуөткізгіштігін және жылу сыйымдылығын арттырады, майлау қабатын тұрақтандырады және кескіш құралдардың тозуын азайтады.

Сондықтан, нанотехнологияларды MQL технологиясына интеграциялау металдарды өңдеу өнімділігін және сапасын арттыруға, сонымен қатар дәстүрлі майлау-салқындату сұйықтықтарын аз пайдалану арқылы энергия шығынын және экологиялық жүктемені төмендетуге жаңа мүмкіндіктер ашады.

Қазіргі зерттеулер көрсеткендей, наномодификацияланған майлау-суыту сұйықтарын (МСС) қолдану металдарды өңдеуде минималды сұйықтық мөлшерін пайдалану (MQL) технологиясының тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді. Нанобөлшектерді (мысалы, Al_2O_3, CuO, TiO_2, SiO_2, ZnO) базалық сұйықтыққа енгізу жылуөткізгіштікті арттырып, кесу аймағындағы жылуды тиімді шығару арқылы құрал мен детальдің жергілікті қызып кетуін азайтады.

5-кестеде әлемдік деңгейде жүргізілген MQL және МСС бойынша ғылыми зерттеулердің негізгі бағыттары елдер мен аймақтар кескінінде салыстырмалы түрде көрсетілген. Кесте деректері әр мемлекеттің зерттеу басымдықтарын, технологиялық даму деңгейін және өндірістік қолдану ерекшеліктерін айқындайды.

Кесте 5 – Әлемдік MQL және MCC зерттеулері бойынша елдердің негізгі ғылыми бағыттарына арналған салыстырмалы талдау.

№	Ел / Аймақ	Негізгі ғылыми бағыттар
1	Үндістан	MQL, MCC жылу-физикалық қасиеттері, нанөсімдіктер, параметрлерді оңтайландыру
2	Қытай	MQL, Cryo-MQL, биоқайта өңделетін сұйықтықтар, тұрақты өндіріс
3	Бразилия	MQL оңтайландыру, трибология, құралға әсері
4	Малайзия	MQL, жылу-физикалық сипаттамалар, тұрақты өндіріс
5	АҚШ	MQL, кесу процестерін оңтайландыру, трибология
6	Германия	Жоғары дәйектілік, өнеркәсіптік MQL қолдану
7	Жапония	MQL, жылу алмасу, трибология
8	Италия	Тұрақты өндіріс, биоқайта өңделетін MCC
9	Түркия	MQL, Cryo-MQL элементтері, кесу процесінің жылу-механикалық талдауы, тұрақты және экологиялық өңдеу технологиялары
10	Ұлыбритания	MQL, MCC жылуфизикасы
11	Ресей	MQL, MCC, кесу жылуфизикасы, өнеркәсіптік зерттеулер
12	Қазақстан	Жергілікті MQL және MCC жылуфизикасы зерттеулері, университет жобалары

Үндістанда жүргізілетін зерттеулер негізінен MQL технологиясын қолдану, майлау-салқындату сұйықтықтарының жылуфизикалық қасиеттерін анықтау, наноқоспаларды пайдалану және кесу процесінің параметрлерін оңтайландыруға бағытталған. Қытайда MQL және Cryo-MQL технологиялары кеңінен зерттеліп, биоқайта өңделетін сұйықтықтарды қолдану мен тұрақты өндіріс қағидаларына басымдық беріледі.

Бразилия ғалымдары MQL оңтайландыру, трибологиялық сипаттамаларды зерттеу және кесу құралдарына әсерін бағалау мәселелеріне назар аударады. Малайзияда MQL технологиясының жылуфизикалық сипаттамалары мен тұрақты өндіріс аспектілері белсенді түрде зерттелуде. АҚШ-тағы зерттеулер MQL негізіндегі кесу процестерін оңтайландыру және трибология саласына шоғырланған.

Германияда жоғары дәйектілік пен өндірістік ортада MQL технологиясын енгізу мәселелері жетекші орын алады, бұл елдің өнеркәсіптік бағыттылығын көрсетеді. Жапониядағы зерттеулер MQL, жылу алмасу процестері және трибологияны кешенді түрде қарастырумен ерекшеленеді. Италияда тұрақты өндіріс тұжырымдамасы аясында биоқайта өңделетін майлау-суыту сұйықтықтарын қолдану бағытында жұмыстар жүргізілуде.

Түркиядағы MQL және MCC зерттеулері негізінен кесу процесінің жылу-механикалық сипаттамаларын, экологиялық таза өндіріс технологияларын және Cryo-MQL элементтерін зерттеуге бағытталған. Бұл елдің ғылыми бағыты Италия мен Ресей зерттеулерімен мазмұндас болып, тұрақты өндіріс пен инженерлік қолданбаларға басымдық береді.

Ұлыбританияда MQL және MCC-ның жылуфизикалық қасиеттерін зерттеу басым болса, Ресейде MQL, MCC, кесу аймағындағы жылуфизикалық процестер және өнеркәсіптік қолданбалы зерттеулер кеңінен дамыған. Қазақстанда бұл бағыттағы зерттеулер негізінен жергілікті жағдайларға бейімделген MQL және MCC жылуфизикасын зерделеуге, сондай-ақ университеттер базасындағы ғылыми жобаларды іске асыруға бағытталған.

Осылайша, кестеде көрсетілген деректер әр елдің ғылыми-зерттеу бағыты мен өндірістік қажеттіліктеріне сәйкес MQL және MCC технологияларын дамытуда өзіндік ерекшеліктерге ие екенін көрсетеді.

Сонымен қатар, әлемдік MQL және MCC зерттеулері бойынша елдер кескінінде салыстырмалы географиялық талдау жүргізілді (2-сурет). Аталған талдау ғылыми жарияланымдардың мемлекеттер арасында таралуын және зерттеу белсенділігінің аумақтық ерекшеліктерін анықтауға мүмкіндік береді. Нәтижелерге сәйкес, Үндістан, Қытай және Бразилия MQL және MCC саласындағы зерттеулер бойынша негізгі көшбасшы елдер болып табылады.

Ал Қазақстанда бұл бағыттағы жарияланымдар саны шамамен 1-5 жұмыс көлемінде, бұл елде тақырыпқа деген ғылыми қызығушылықтың қалыптасу кезеңінде екенін және өңірлік деңгейде зерттеулер жүргізіліп жатқанын көрсетеді. Аталған деректер Қазақстанда MQL және MCC технологияларын дамыту үшін ғылыми әлеуеттің бар екенін және болашақта зерттеу белсенділігін арттыру қажеттігін айқындайды.

Айта кету керек, кесте ғылыми деректер базаларын (Scopus, Web of Science, Google Scholar және т.б.) талдаудың нәтижесінде алынған библиометриялық деректерге негізделген. Осы мақаланың әдебиеттер тізіміне талдау, әдістемелік негіздеу және нәтижелерді талқылау үшін тікелей пайдаланылатын ең маңызды жарияланымдар енгізілген. Кесте ғылыми белсенділіктің жалпы талдау құралы ретінде қызмет етеді және наножүйелер саласында дамудың перспективалары бар жетекші елдер мен аймақтарды анықтауға мүмкіндік береді, сонымен қатар негізгі зерттеу бағыттары мен инновацияларды көрсетуге көмектеседі.

Ғылыми нәтижелерді талқылау

Қазіргі заманғы металдарды өңдеу технологиялары кескіш қабаттағы жылуды тиімді шығару мен үйкелісті азайтуды талап етеді. Дәстүрлі майлау-суыту сұйықтықтары (МСС) салқындату мен майлауды қамтамасыз етеді, алайда олардың тиімділігі жиі жоғары тұтқырлық, токсиктік немесе жеткіліксіз жылу өткізгіштікпен шектеледі. Минималды мөлшерде майлау технологиясын (MQL) қолдану МСС шығынын едәуір азайтуға мүмкіндік береді, сонымен бірге жылу шығару мен үйкелісті тиімділігін сақтайды немесе арттырады, бұл әсіресе жоғары жылдамдықтағы және дәлдікпен өңдеуде маңызды.

Әртүрлі МСС-тардың жылуфизикалық қасиеттерін талдау көрсеткендей, сұйықтықтарды нанобөлшектермен (мысалы, Al_2O_3, TiO_2, SiO_2, ZnO, графен т.б.) модификациялау жылу өткізгіштігін және жылу алмасу қарқынын арттыруға мүмкіндік береді.

2010-2025 жылдар аралығында MQL және наносұйықтықтар бойынша жарияланымдардың библиометриялық талдауы ең белсенді зерттеулер Үндістан, Қытай және Бразилияда жүргізілгенін көрсетеді, ал Қазақстандағы зерттеулер саны салыстырмалы түрде аз, бұл жергілікті ғылыми жобаларды дамыту әлеуетін көрсетеді.

Жалпы, наномодификацияланған МСС-тарды MQL технологиясымен біріктіру арқылы:

1. Жылуды тиімді шығару және құрал мен детальдың температуралық жүктемесін азайтуға болады.

2. МСС шығынын азайту арқылы экологиялық және экономикалық шығындарды төмендетуге болады.

3. Нанобөлшектердің түрі мен концентрациясын таңдау арқылы жұмыс сұйықтықтарының тұтқырлығын және жылу өткізгіштігін оңтайландыруға болады.

Осылайша, наномодификацияланған МСС негізіндегі оңтайландырылған наносұйықтықтарды MQL процестерінде қолдану перспективалы болып табылады, бұл жылу өткізгіштікті арттыру мен тұтқырлықты өсіру арасындағы баланс, өнеркәсіптік қауіпсіздік және тұрақты өндіріс талаптарын ескереді.

Қорытынды

Қазіргі зерттеулерді талдау көрсеткендей, наномодификацияланған майлау-суыту сұйықтықтарын (МСС) минималды мөлшерде майлау (MQL) технологиясымен біріктіру металдарды өңдеудің тиімділігін арттырудың перспективалы бағыты болып табылады. Металдар, метал оксидтері және көміртекті наноқұрылымдар қосылған наносұйықтықтар МСС -тың жылу өткізгіштігін және жылу алмасу қарқынын едәуір арттыруға мүмкіндік береді, бұл құрал мен заготовканың жергілікті қызып кетуін төмендетіп, үйкелісті азайтып, кескіш құралдың қызмет мерзімін ұзартуға ықпал етеді.

Наноқоспалардың тиімділігі базалық сұйықтық түріне, нанобөлшектердің концентрациясына, өлшемі мен пішініне, сондай-ақ кесу аймағындағы температура мен ағын режиміне тәуелді. MQL технологиясы МСС-ты өте аз мөлшерде қолдануға мүмкіндік береді, бұл экологиялық және экономикалық шығындарды азайтып, жылу шығару мен майлау тиімділігін сақтайды немесе арттырады.

Географиялық талдау көрсеткендей, наномодификацияланған МСС және MQL саласындағы ең белсенді зерттеулер зерттеулер Үндістан, Қытай және Бразилияда жүргізілген, ал Қазақстанда жеткілікті түрде пайдаланылмаған, бұл жергілікті ғылыми зерттеулер мен өндірістік енгізулер үшін қосымша мүмкіндіктер ашады.

Осылайша, наномодификацияланған МСС-тарды MQL технологиясымен біріктіру жұмыс сұйықтықтарының жылу өткізгіштігі мен гидродинамикалық қасиеттерін оңтайландыруға, МСС шығынын азайтуға, өңдеу өнімділігін арттыруға және құрал ресурсын ұзартуға мүмкіндік береді, бұл әсіресе суық климат жағдайында өндірісте қолдануға перспективалы шешім болып табылады.

Әдебиеттер тізімі

1. Бабаев Э.Р. Смазочно-охлаждающие жидкости: свойства и методы применения / Э.Р. Бабаев // Башкирский химический журнал. – 2022. – № 29(3). – P. 11-19.
2. Experimental evaluation of cooling lubrication performance of nanofluid minimum quantity lubrication in turning / Y.Z hang et al // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2012. – Vol. 62. – P. 1-8. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.04.007.
3. A comprehensive study on minimum quantity lubrication / S. Kumar et al // Materials Today: Proceedings. – 2022. – T. 56. – P. 3078-3085. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.158.
4. Dhar N.R. Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear, surface roughness and dimensional deviation in turning AISI-4340 steel / N.R. Dhar, M. Kamruzzaman, M. Ahmed // Journal of Materials Processing Technology. – 2006. – Vol. 172, № 2. – P. 299-304. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.09.022.
5. Экспериментальное исследование конвективного коэффициента теплоотдачи хладоносителя с добавками наночастиц AL2O3 / International Conference “Energy of Moldova – 2016 / О.Я. Хлиева и др.// «Regional aspects of development» 29 September – 01 October, 2016 – Chisinau, Republic of Moldova Экспериментальное исследование конвективного коэффициента теплоотдачи хладоносителя с добавками наночастиц Al2O3.
6. Vegetable Oil Based Nanolubricants in Machining: From Physicochemical Properties to Application / X. Zhang et al // Chinese Journal of Mechanical Engineering. – 2023. – № 36. – P. 1-39. https://doi.org/10.1186/s10033-023-00895-5.
7. Makhesana M. Analysis of vegetable oil-based nano-lubricant technique for improving machinability of Inconel 690 / M. Makhesana, K. Patel, N. Khanna // Journal of Manufacturing Processes. – 2022. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.03.060.
8. Advances in the Application of Vegetable-Oil-Based Cutting Fluids to Sustainable Machining Operations – A Review / R. Kazeem et al // Lubricants. – 2022. https://doi.org/10.3390/lubricants10040069.
9. Pal A. Performance evaluation of the minimum quantity lubrication with Al2O3- mixed vegetable-oil based cutting fluid in drilling of AISI 321 stainless steel / A. Pal, S. Chatha, H. Sidhu // Journal of Manufacturing Processes. – 2021. – № 66. – P. 238-249. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.04.024.
10. Lawal S. Application of vegetable oil-based metalworking fluids in machining ferrous metals – A review / S. Lawal, I. Choudhury, Y. Nukman // International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 2012. – № 52. – P. 1-12. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2011.09.003.
11. Preparing vegetable oils-based metalworking fluids by a hydrolysis esterification two-step process / B. Kamyab et al // Biomass and Bioenergy. – 2024. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107175.
12. Performance evaluation of vegetable oil based nano cutting fluids in machining using grey relational analysis-A step towards sustainable manufacturing / P. Rapeti et al // Journal of Cleaner Production. – 2018. – № 172. – P. 2862-2875. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.127.
13. Development and potential use of MWCNT suspended in vegetable oil as a cutting fluid in machining of Monel 400 / N. Ross et al // Journal of Molecular Liquids. – 2023. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.121853 2/3.
14. Zareh-Desari B. Assessing the lubrication performance of vegetable oil-based nano-lubricants for environmentally conscious metal forming processes / B. Zareh-Desari, B. Davoodi // Journal of Cleaner Production. – 2016. – № 135. – P. 1198-1209. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.040.
15. Conventional and Recent Advances of Vegetable Oils as Metalworking Fluids (MWFs): A Review / I. Afonso et al // Lubricants. – 2023. https://doi.org/10.3390/lubricants11040160.
16. Formulation, characterization, mechanism, and application of vegetable oil based nano-cutting fluids / W. Wang et al // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2025. https://doi.org/10.1007/s00170-024-14973-y.
17. Characterization of vegetable oil as cutting fluid / R. D’Amato et al // Procedia Manufacturing. – 2019. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.07.040.
18. Use of Jatropha and Moringa oils for lubricants: Metalworking fluids more environmental-friendly / M. De Souza et al // Industrial Crops and Products. – 2019. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.12.033.

19. Manikanta J. Investigation of vegetable oil-based cutting fluids enhanced with nanoparticle additions in turning operations / J. Manikanta, N. Ambhore, G. Thellaputta // Metal Working and Material Science. – 2025. https://doi.org/10.17212/1994-6309-2025-27.1-20-33.
20. Performance evaluation of castor oil-ethanol blended coolant under minimum quantity lubrication turning of difficult-to-machine materials / N. Liu et al // Journal of Manufacturing Processes. – 2020. – № 58. – P. 1-10. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.07.058.
21. Experimental Research on the Effect of Thermophysical Characteristics of Cutting Fluid on Cutting Performance During Turning Ti-6Al-4V Alloy / X. Zhou et al // Lubricants. – 2025. https://doi.org/10.3390/lubricants13020090.
22. Sustainable Development of Cutting Fluids:The Comprehensive Review of Vegetable Oil / X. Luo et al // Journal of Cleaner Production. – 2024. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143544.
23. Khan M. Effects of minimum quantity lubrication on turning AISI 9310 alloy steel using vegetable oilbased cutting fluid / M. Khan, M. Mithu, N. Dhar // Journal of Materials Processing Technology. – 2009. – № 209. – P. 5573-5583. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.05.014.
24. Roles of Eco-Friendly Non-Edible Vegetable Oils in Drilling Inconel 718 through Minimum Quantity Lubrication / N. Safie et al // Lubricants. – 2022. https://doi.org/10.3390/lubricants10090211.
25. Airao J. Tool Wear Behavior in μ-turning of Nimonic 90 Under Vegetable Oil-Based Cutting Fluid / J. Airao, H. Kishore, C. Nirala // Journal of Micro and Nano-Manufacturing. – 2021. https://doi.org/10.1115/1.4053315.
26. Saleem M. Eco-friendly precision turning of superalloy Inconel 718 using MQL based vegetable oils: Tool wear and surface integrity evaluation / M. Saleem, A. Mehmood // Journal of Manufacturing Processes. – 2022. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.10.059.
27. Jeevan T. Tribological Properties and Machining Performance of Vegetable Oil Based Metal Working Fluids – A Review / T. Jeevan, S. Jayaram // Modern Mechanical Engineering. – 2018. – № 08. – P. 42-65. https://doi.org/10.4236/mme.2018.81004.
28. Kumar B. Experimental Investigations of Vegetable Oil Based Cutting Fluids with Extreme Pressure Additive in Machining of AISI 1040 Steel / B. Kumar, G. Padmanabhan, P. Krishna // Manufacturing Science and Technology. – 2015. – № 3. – P. 1-9. https://doi.org/10.13189/mst.2015.030101.
29. Bacak S. EFFECTS OF VARIOUS VEGETABLE OIL AND WATER MIXTURES USED AS CUTTING FLUIDS ON TOOL WEAR AND SURFACE ROUGHNESS / S. Bacak, Ö. Karabiyik // International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry. – 2022. https://doi.org/10.46519/ij3dptdi.1132387.
30. Machining performance of vegetable oil with phosphonium- and ammonium-based ionic liquids via MQL technique / A. Sani et al // Journal of Cleaner Production. – 2019/ https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.317.
31. Minimum quantity lubrication machining nickel base alloy: a comprehensive review / S. Zhou et al // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2023. https://doi.org/10.1007/s00170-023-11721-6.
32. 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. – Т. 106, № 3. – P. 1121-1131. https://doi.org/10.1007/s00170-019-04611-3
33. Mechiri S. Investigation of thermal conductivity and rheological properties of vegetable oil based hybrid nanofluids containing Cu-Zn hybrid nanoparticles / S. Mechiri et al // Experimental Heat Transfer. – 2017. – № 30. – P. 205-217. https://doi.org/10.1080/08916152.2016.1233147.
34. Kumar M. Thermal conductivity and rheological studies for Cu–Zn hybrid nanofluids with various basefluids / M. Kumar, V. Vasu, A. Gopal // Journal of The Taiwan Institute of Chemical Engineers. – 2016. – № 66. – P. 321-327. https://doi.org/10.1016/j.jtice.2016.05.033.
35. Tiwari S. Synthesis, characterization, and application of Al2O3/coconut oil-based nanofluids in sustainable machining of AISI 1040 steel / S. Tiwari, M. Amarnath, M. Gupta // Journal of Molecular Liquids. – 2023. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.122465.
36. Nwoguh T. 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. Nwoguh, A. Okafor, H. Onyishi // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2021. – № 113. – P. 3377-3388. https://doi.org/10.1007/s00170-021-06812-1.
37. Impact of nanoparticles on vegetable oil as a cutting fluid with fractional ramped analysis / F. Hasin et al // Scientific Reports. – 2023. – № 13. https://doi.org/10.1038/s41598-023-34344-z.
38. Pasam V. Characterization of Vegetable Oil–Based Nanocutting Fluids / V. Pasam, R. Revuru, P. Rapeti // Journal of Testing and Evaluation. – 2019. – № 47. – P. 20170426. https://doi.org/10.1520/jte20170426.
39. Performances of a tailored vegetable oil-based graphene nanofluid in the MQL internal cooling milling / R. Peng et al // Journal of Manufacturing Processes. – 2025. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.12.063.
40. Vegetable Oil-Based Nanolubricants in Machining: From Physicochemical Properties to Application / X. Zhang et al // Chinese Journal of Mechanical Engineering. – 2023. – № 36. – P. 1-39. https://doi.org/10.1186/s10033-023-00895-5.
41. Das A. Performance comparison of vegetable oil based nanofluids towards machinability improvement in hard turning of HSLA steel using minimum quantity lubrication / A. Das, S. Patel, S. Das // Mechanics & Industry. – 2019. https://doi.org/10.1051/meca/2019036.
42. Performance evaluation of vegetable-based cutting fluids in turning of AISI 1050 steel / D. Carvalho et al // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2019. – № 103. – P. 1603-1619. https://doi.org/10.1007/s00170-019-03636-y.
43. Kara F. Investigation of the effect of Al2O3 nanoparticle-added MQL lubricant on sustainable and clean manufacturing / F. Kara // Lubricants. – 2024. – T. 12, № 11. – P. 393. https://doi.org/10.3390/lubricants12110393.
44. Effect of Cooling/Lubrication Conditions on Machining Performance: An Experimental Investigation of 1040 Steel Under Dry, MQL, and Nano-MQL Environments / E. Salur et al // Materials. – 2025. – T. 18, № 17. – P. 4063. https://doi.org/10.3390/ma18174063.
45. Usca Ü.A. Investigation of the Effects of CNC Nanoparticle-Added Nanofluids on the Machinability of Cupral 4M Alloy / Ü.A. Usca // Turkish Journal of Nature and Science. – 2025. – № 14(3). – P. 165-171. https://doi.org/10.46810/tdfd.1738630.

References

1. Babaev E.R. Smazochno-ohlazhdayushchie zhidkosti: svojstva i metody primeneniya / E.R. Babaev // Bashkirskij himicheskij zhurnal. – 2022. – № 29(3). – R. 11-19. (In Russian).
2. Experimental evaluation of cooling lubrication performance of nanofluid minimum quantity lubrication in turning / Y.Z hang et al // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2012. – Vol. 62. – P. 1-8. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.04.007. (In English).
3. A comprehensive study on minimum quantity lubrication / S. Kumar et al // Materials Today: Proceedings. – 2022. – T. 56. – R. 3078-3085. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.158. (In English).
4. Dhar N.R. Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear, surface roughness and dimensional deviation in turning AISI-4340 steel / N.R. Dhar, M. Kamruzzaman, M. Ahmed // Journal of Materials Processing Technology. – 2006. – Vol. 172, № 2. – P. 299-304. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.09.022. (In English).
5. Eksperimental'noe issledovanie konvektivnogo koefficienta teplootdachi hladonositelya s dobavkami nanochastic AL2O3 / International Conference “Energy of Moldova – 2016 / O.Ya. Hlieva i dr.// «Regional aspects of development» 29 September – 01 October, 2016 – Chisinau, Republic of Moldova Eksperimental'noe issledovanie konvektivnogo koefficienta teplootdachi hladonositelya s dobavkami nanochastic Al2O3. (In Russian).
6. Vegetable Oil Based Nanolubricants in Machining: From Physicochemical Properties to Application / X. Zhang et al // Chinese Journal of Mechanical Engineering. – 2023. – № 36. – R. 1-39. https://doi.org/10.1186/s10033-023-00895-5. (In English).
7. Makhesana M. Analysis of vegetable oil-based nano-lubricant technique for improving machinability of Inconel 690 / M. Makhesana, K. Patel, N. Khanna // Journal of Manufacturing Processes. – 2022. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.03.060. (In English).
8. Advances in the Application of Vegetable-Oil-Based Cutting Fluids to Sustainable Machining Operations – A Review / R. Kazeem et al // Lubricants. – 2022. https://doi.org/10.3390/lubricants10040069. (In English).

9. Pal A. Performance evaluation of the minimum quantity lubrication with Al2O3- mixed vegetable-oil based cutting fluid in drilling of AISI 321 stainless steel / A. Pal, S. Chatha, H. Sidhu // Journal of Manufacturing Processes. – 2021. – № 66. – R. 238-249. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.04.024. (In English).
10. Lawal S. Application of vegetable oil-based metalworking fluids in machining ferrous metals – A review / S. Lawal, I. Choudhury, Y. Nukman // International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 2012. – № 52. – R. 1-12. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2011.09.003. (In English).
11. Preparing vegetable oils-based metalworking fluids by a hydrolysis esterification two-step process / B. Kamyab et al // Biomass and Bioenergy. – 2024. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107175. (In English).
12. Performance evaluation of vegetable oil based nano cutting fluids in machining using grey relational analysis-A step towards sustainable manufacturing / P. Rapeti et al // Journal of Cleaner Production. – 2018. – № 172. – R. 2862-2875. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.127. (In English).
13. Development and potential use of MWCNT suspended in vegetable oil as a cutting fluid in machining of Monel 400 / N. Ross et al // Journal of Molecular Liquids. – 2023. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.121853 2/3. (In English).
14. Zareh-Desari B. Assessing the lubrication performance of vegetable oil-based nano-lubricants for environmentally conscious metal forming processes / B. Zareh-Desari, B. Davoodi // Journal of Cleaner Production. – 2016. – № 135. – R. 1198-1209. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.040. (In English).
15. Conventional and Recent Advances of Vegetable Oils as Metalworking Fluids (MWFs): A Review / I. Afonso et al // Lubricants. – 2023. https://doi.org/10.3390/lubricants11040160. (In English).
16. Formulation, characterization, mechanism, and application of vegetable oil based nano-cutting fluids / W. Wang et al // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2025. https://doi.org/10.1007/s00170-024-14973-y. (In English).
17. Characterization of vegetable oil as cutting fluid / R. D'Amato et al // Procedia Manufacturing. – 2019. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.07.040. (In English).
18. Use of Jatropha and Moringa oils for lubricants: Metalworking fluids more environmental-friendly / M. De Souza et al // Industrial Crops and Products. – 2019. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.12.033. (In English).
19. Manikanta J. Investigation of vegetable oil-based cutting fluids enhanced with nanoparticle additions in turning operations / J. Manikanta, N. Ambhore, G. Thellaputta // Metal Working and Material Science. – 2025. https://doi.org/10.17212/1994-6309-2025-27.1-20-33. (In English).
20. Performance evaluation of castor oil-ethanol blended coolant under minimum quantity lubrication turning of difficult-to-machine materials / N. Liu et al // Journal of Manufacturing Processes. – 2020. – № 58. – R. 1-10. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.07.058. (In English).
21. Experimental Research on the Effect of Thermophysical Characteristics of Cutting Fluid on Cutting Performance During Turning Ti-6Al-4V Alloy / X. Zhou et al // Lubricants. – 2025. https://doi.org/10.3390/lubricants13020090. (In English).
22. Sustainable Development of Cutting Fluids:The Comprehensive Review of Vegetable Oil / X. Luo et al // Journal of Cleaner Production. – 2024. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143544. (In English).
23. Khan M. Effects of minimum quantity lubrication on turning AISI 9310 alloy steel using vegetable oilbased cutting fluid / M. Khan, M. Mithu, N. Dhar // Journal of Materials Processing Technology. – 2009. – № 209. – R. 5573-5583. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.05.014. (In English).
24. Roles of Eco-Friendly Non-Edible Vegetable Oils in Drilling Inconel 718 through Minimum Quantity Lubrication / N. Safie et al // Lubricants. – 2022. https://doi.org/10.3390/lubricants10090211. (In English).
25. Airao J. Tool Wear Behavior in μ-turning of Nimonic 90 Under Vegetable Oil-Based Cutting Fluid / J. Airao, H. Kishore, C. Nirala // Journal of Micro and Nano-Manufacturing. – 2021. https://doi.org/10.1115/1.4053315. (In English).
26. Saleem M. Eco-friendly precision turning of superalloy Inconel 718 using MQL based vegetable oils: Tool wear and surface integrity evaluation / M. Saleem, A. Mehmood // Journal of Manufacturing Processes. – 2022. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.10.059. (In English).

27. Jeevan T. Tribological Properties and Machining Performance of Vegetable Oil Based Metal Working Fluids – A Review / T. Jeevan, S. Jayaram // Modern Mechanical Engineering. – 2018. – № 08. – R. 42-65. https://doi.org/10.4236/mme.2018.81004. (In English).
28. Kumar B. Experimental Investigations of Vegetable Oil Based Cutting Fluids with Extreme Pressure Additive in Machining of AISI 1040 Steel / B. Kumar, G. Padmanabhan, P. Krishna // Manufacturing Science and Technology. – 2015. – № 3. – R. 1-9. https://doi.org/10.13189/mst.2015.030101. (In English).
29. Bacak S. EFFECTS OF VARIOUS VEGETABLE OIL AND WATER MIXTURES USED AS CUTTING FLUIDS ON TOOL WEAR AND SURFACE ROUGHNESS / S. Bacak, Ö. Karabiyik // International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry. – 2022. https://doi.org/10.46519/ij3dptdi.1132387. (In English).
30. Machining performance of vegetable oil with phosphonium- and ammonium-based ionic liquids via MQL technique / A. Sani et al // Journal of Cleaner Production. – 2019/ https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.317. (In English).
31. Minimum quantity lubrication machining nickel base alloy: a comprehensive review / S. Zhou et al // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2023. https://doi.org/10.1007/s00170-023-11721-6. (In English).
32. 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. – T. 106, № 3. – R. 1121-1131. https://doi.org/10.1007/s00170-019-04611-3. (In English).
33. Mechiri S. Investigation of thermal conductivity and rheological properties of vegetable oil based hybrid nanofluids containing Cu-Zn hybrid nanoparticles / S. Mechiri et al // Experimental Heat Transfer. – 2017. – № 30. – R. 205-217. https://doi.org/10.1080/08916152.2016.1233147. (In English).
34. Kumar M. Thermal conductivity and rheological studies for Cu–Zn hybrid nanofluids with various basefluids / M. Kumar, V. Vasu, A. Gopal // Journal of The Taiwan Institute of Chemical Engineers. – 2016. – № 66. – R. 321-327. https://doi.org/10.1016/j.jtice.2016.05.033. (In English).
35. Tiwari S. Synthesis, characterization, and application of Al2O3/coconut oil-based nanofluids in sustainable machining of AISI 1040 steel / S. Tiwari, M. Amarnath, M. Gupta // Journal of Molecular Liquids. – 2023. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.122465. (In English).
36. Nwoguh T. 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. Nwoguh, A. Okafor, H. Onyishi // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2021. – № 113. – R. 3377-3388. https://doi.org/10.1007/s00170-021-06812-1. (In English).
37. Impact of nanoparticles on vegetable oil as a cutting fluid with fractional ramped analysis / F. Hasin et al // Scientific Reports. – 2023. – № 13. https://doi.org/10.1038/s41598-023-34344-z. (In English).
38. Pasam V. Characterization of Vegetable Oil–Based Nanocutting Fluids / V. Pasam, R. Revuru, P. Rapeti // Journal of Testing and Evaluation. – 2019. – № 47. – R. 20170426. https://doi.org/10.1520/jte20170426. (In English).
39. Performances of a tailored vegetable oil-based graphene nanofluid in the MQL internal cooling milling / R. Peng et al // Journal of Manufacturing Processes. – 2025. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.12.063. (In English).
40. Vegetable Oil-Based Nanolubricants in Machining: From Physicochemical Properties to Application / X. Zhang et al // Chinese Journal of Mechanical Engineering. – 2023. – № 36. – R. 1-39. https://doi.org/10.1186/s10033-023-00895-5. (In English).
41. Das A. Performance comparison of vegetable oil based nanofluids towards machinability improvement in hard turning of HSLA steel using minimum quantity lubrication / A. Das, S. Patel, S. Das // Mechanics & Industry. – 2019. https://doi.org/10.1051/meca/2019036. (In English).
42. Performance evaluation of vegetable-based cutting fluids in turning of AISI 1050 steel / D. Carvalho et al // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2019. – № 103. – R. 1603-1619. https://doi.org/10.1007/s00170-019-03636-y. (In English).
43. Kara F. Investigation of the effect of Al2O3 nanoparticle-added MQL lubricant on sustainable and clean manufacturing / F. Kara // Lubricants. – 2024. – T. 12, № 11. – R. 393. https://doi.org/10.3390/lubricants12110393. (In English).

44. Effect of Cooling/Lubrication Conditions on Machining Performance: An Experimental Investigation of 1040 Steel Under Dry, MQL, and Nano-MQL Environments / E. Salur et al // Materials. – 2025. – Т. 18, № 17. – R. 4063. https://doi.org/10.3390/ma18174063. (In English).
45. Usca Ü.A. Investigation of the Effects of CNC Nanoparticle-Added Nanofluids on the Machinability of Cupral 4M Alloy / Ü.A. Usca // Turkish Journal of Nature and Science. – 2025. – № 14(3). – R. 165-171. https://doi.org/10.46810/tdfd.1738630. (In English).

Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғарғы білім министрлігінің Ғылым комитеті (Грант № AP26100207 «Өсімдік майлары негізінде экологиялық таза наномодификацияланған майлап суыту сұйықтықтарын өндіру технологиясын әзірлеу») қаржыландырды.

М.Қ. Жамбаева[*], О.А. Степанова[1], А.Б. Касымов[1], М.В. Ермоленко[1], К.С. Астемесова[2]
[1]Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А
[2]Казахский национальный технический исследовательский университет им. К.И. Сатпаева,
050043, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22
[*]e-mail: zhambaeva_94@mail.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕРМОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИХ ЖИДКОСТЕЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛОВ В УСЛОВИЯХ MQL

В статье представлен обзор современных исследований термофизических свойств смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) и наномодифицированных масел, применяемых при механической обработке металлов с использованием технологии минимального количества смазки (MQL). Рассмотрены основные виды СОЖ на масляной, водной и эмульсионной основе, их термофизические характеристики и эксплуатационные требования при интенсивной резке металлов.

Особое внимание уделено влиянию добавления различных наночастиц (Al_2O_3, TiO_2, SiO_2, ZnO, графен и др.) на повышение теплопроводности СОЖ, снижение трения, вязкости, плотности и теплоемкости. Анализ публикаций позволил исследовать наномодифицированные СОЖ и технологии MQL.

Результаты исследований показали, что применение наномодифицированных СОЖ повышает интенсивность теплообмена, снижает износ инструмента и способствует повышению эффективности обработки за счет оптимизации расхода СОЖ. Кроме того, выявлена необходимость регулирования состава СОЖ и концентрации наночастиц с целью оптимизации показателей теплопроводности и вязкости.

Статья служит основой для дальнейших исследований и практического применения наномодифицированных СОЖ в условиях технологии MQL, что способствует развитию энергоэффективных и экологически безопасных процессов обработки металлов.

***Ключевые слова:** смазочно-охлаждающая жидкость (СОЖ), минимальное количество смазки (MQL), растительные масла, наножидкости, механическая обработка, износ инструмента.*

M.K. Zhambayeva[*], O.A. Stepanova[1], A.B. Kassymov[1], M.V. Ermolenko[1], K.S. Astemessova[2]
[1]Shakarim University,
071412, Republic of Kazakhstan, Semey, Glinki Street 20 A.
[2]K.I. Satbayev Kazakh National Research Technical University,
050043, Republic of Kazakhstan, Almaty, Satpayev Street 22
[*]e-mail: zhambaeva_94@mail.ru

OPTIMIZATION OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF CUTTING FLUIDS IN METAL MACHINING UNDER MQL CONDITIONS

The article presents a review of recent studies devoted to the thermophysical properties of metalworking fluids (MWFs) and nanomodified lubricants used under Minimum Quantity Lubrication (MQL) conditions in metal machining processes. The main types of MWFs – oil-based, water-based, and emulsified fluids – are considered, along with their thermophysical characteristics and operational requirements under intensive cutting conditions.

Special attention is paid to the effect of adding various nanoparticles (Al_2O_3, TiO_2, SiO_2, ZnO, graphene, etc.) on enhancing the thermal conductivity of MWFs, as well as reducing friction, viscosity, density, and specific heat capacity. The analysis of publications made it possible to evaluate the potential of nanomodified MWFs in MQL technology.

The research findings indicate that the use of nanomodified MWFs increases heat transfer intensity, reduces tool wear, and improves machining efficiency by optimizing fluid consumption. In addition, the need to regulate the MWF composition and nanoparticle concentration to optimize thermal conductivity and viscosity parameters is emphasized.

The article provides a scientific basis for further research and practical application of nanomodified MWFs under MQL conditions, contributing to the development of energy-efficient and environmentally safe metal machining processes.

Key words: *cutting fluids (CFs), minimum quantity lubrication (MQL), vegetable oils, nanofluids, mechanical processing, tool wear.*

Авторлар туралы мәліметтер

Маржан Қанатқызы Жамбаева* – «Техникалық физика және жылуэнергетика» кафедрасының докторанты, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: zhambaeva_94@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-3957-2879.

Ольга Александровна Степанова – техника ғылымдарының кандидаты, профессор, «Техникалық физика және жылу энергетикасы» кафедрасының меңгерушісі, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: o.stepanova@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5221-1772.

Аскар Багдатович Касымов – PhD**,** Басқарма мүшесі – стратегия және әлеуметтік даму жөніндегі проректор, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: kassymov.asb@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1983-6508.

Михаил Вячеславович Ермоленко – техника ғылымдарының кандидаты, «Техникалық физика және жылуэнергетика» кафедрасының аға оқытушысы, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: tehfiz@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1677- 8023.

Каламкас Сериковна Астемесова – PhD, «Жалпы физика» кафедрасының меңгерушісі, Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: k.astemessova@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4143-6084.

Сведения об авторах

Маржан Қанатқызы Жамбаева* – PhD докторант образовательной программы «Техническая физика» кафедры «Техническая физика и теплоэнергетика», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: zhambaeva_94@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-3957-2879.

Ольга Александровна Степанова – кандидат технических наук, профессор, зав. кафедрой «Техническая физика и теплоэнергетика», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: o.stepanova@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5221-1772.

Аскар Багдатович Касымов – PhD, Член правления – проректор по стратегии и социальному развитию, Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: kassymov.asb@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1983-6508**.**

Михаил Вячеславович Ермоленко – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Техническая физика и теплоэнергетика», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: tehfiz@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1677-8023.

Каламкас Сериковна Астемесова – PhD, заведующий кафедрой «Общая физика», Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, Республика Казахстан; e-mail: k.astemessova@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4143-6084.

Information about the authors

Marzhan Kanatkyzy Zhambayeva* – PhD doctoral student of the educational program «Technical Physics», Department of Technical Physics and Heat Power Engineering, Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: zhambaeva_94@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-3957-2879.

Olga Aleksandrovna Stepanova – Candidate of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Technical Physics and Heat Power Engineering, Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: o.stepanova@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5221-1772.

Askar Bagdatovich Kassymov – PhD, Member of the Board – Vice-Rector for Strategy and Social Development, Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: kassymov.asb@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1983-6508.

Mikhail Vyacheslavovich Ermolenko – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer, Department of Technical Physics and Thermal Power Engineering, Shakarim University of Semey City, Republic of Kazakhstan; e-mail: tehfiz@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1677-8023.

Kalamkas Serikovna Astemessova – PhD, Head of the Department of General Physics, Kazakh National Technical University named after K.I. Satbayev, Republic of Kazakhstan; e-mail: k.astemessova@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4143-6084.

Редакцияға енуі 16.01.2026
Өңдеуден кейін түсуі 06.03.2026
Жариялауға қабылданды 10.03.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-61

МРНТИ: 44.31.31

А.Р. Хажидинова[1], К.С. Зарыкбаева[1]*, Е.Н. Мясоедова[1], А.Е. Сатыбалдинова[1], С.Л. Елистратов[2]

[1]Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А
[2]Новосибирский государственный технический университет,
630073, Российская Федерация, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, корпус 1
*e-mail: kamshat85.kz@mail.ru

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ УГОЛЬНОГО КОТЛА НА ОСНОВЕ РЕЦИРКУЛЯЦИИ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ

Аннотация: *Рециркуляция дымовых газов (РДГ) является эффективным способом одновременного снижения выбросов оксидов азота и повышения энергетической эффективности угольных котлов за счёт управления температурой факела и составом рабочей смеси. В работе выполнено расчётно-аналитическое исследование применения РДГ на котле Е-90-3,9/440 ТЭЦ-1 при сжигании угля марки Д (разрез Каражыра). Цель – определить рациональную степень РДГ, обеспечивающую снижение NOx при максимизации КПД брутто в пределах эксплуатационных ограничений. Методика основана на математической модели теплового баланса котла и обработке режимных данных до/после включения РДГ, оценены изменения состава дымовых газов и теплотехнических потерь при варьировании доли рециркуляции.*

Установлено, что в рассматриваемом диапазоне степеней РДГ увеличение рециркуляции сопровождается ростом расчётного КПД брутто и снижением концентрации NOx: при увеличении РДГ на 1% КПД возрастает на 0,25%, а NOx уменьшается на 9 мг/м^3. Рациональные показатели достигнуты при РДГ ≈ 20%, что соответствует расчётному КПД брутто 95,5% и снижению NOx на 30% относительно базового режима. Результаты подтверждают целесообразность РДГ как технологического решения для повышения экологической и эксплуатационной эффективности угольных ТЭС Казахстана.

Ключевые слова: *рециркуляция дымовых газов, угольный котел, выбросы оксидов азота, тепловая эффективность, оптимизация энергопотребления, сжигание угля.*

Введение

Рециркуляция дымовых газов рассматривается как один из наиболее практичных способов экологизации и регулирования топочного процесса в энергетических котлах, работающих на твёрдом топливе. В научных исследованиях подчёркивается, что возврат части дымовых газов в зону горения позволяет управлять температурным уровнем факела и, как следствие, снижать образование оксидов азота при сохранении требуемых режимов работы котла [1]. Для обоснования эффективности таких мероприятий широко применяются расчётно-аналитические подходы: моделирование рециркуляции дымовых газов с использованием программных комплексов позволяет оценивать ожидаемое подавление NOx и сопутствующие изменения теплотехнических показателей ещё на этапе выбора схемы внедрения [2].

При этом рециркуляция дымовых газов влияет не только на средние параметры горения, но и на динамику процесса. Показано, что изменение состава и теплоёмкости рабочей смеси при рециркуляции может затрагивать устойчивость пламени и характеристики самовозбуждающихся колебаний, что важно учитывать при выборе допустимого диапазона рециркуляции [3]. На уровне крупных энергоблоков влияние рециркуляции дымовых газов существенно зависит от выбранной схемы (точек отбора/ввода, распределения по трактам воздуха и газа): для ультрасверхкритических котлов отмечается необходимость подбора конфигурации рециркуляции дымовых газов с учётом тепловой схемы и условий теплообмена в топке [4]. В прикладных работах также акцентируется роль рециркуляции дымовых газов как инструмента эффективного регулирования топочного процесса в реальных эксплуатационных условиях, где ключевым является условие, снижением NOx и сохранением $\eta_{бр}$ [5].

А.Р. Хажидинова, К.С. Зарыкбаева, Е.Н. Мясоедова, А.Е. Сатыбалдинова, С.Л. Елистратов, 2026

Современные направления развития энергетики расширяют область применения рециркуляция дымовых газов. В задачах кислородного сжигания (oxy-fuel) рециркуляция выступает одним из базовых механизмов формирования требуемых характеристик факела; описаны особенности внешнего вида пламени и режимов горения при использовании рециркуляция дымовых газов [6], а также экспериментально исследованы характеристики маломощных oxy-fuel котлов с РДГ в контексте технологий улавливания CO_2 [7]. В казахстанском контексте рециркуляция дымовых газов рассматривается как один из способов внедрения экологических технологий на действующих энергетических котлах, что повышает актуальность прикладных оценок и параметрической оптимизации [8]. Инженерная значимость направления подтверждается и наличием технических решений, закреплённых патентными разработками устройств рециркуляции дымовых газов [9], а также исследованиями, посвящёнными горелочным системам с внутренней и внешней двойной рециркуляцией, ориентированным на управление характеристиками горения [10].

Новые исследования уточняют механизмы влияния рециркуляции дымовых газов на образование NOx и эффективность в более сложных условиях. Экспериментальные работы по s-CO_2 угольным котлам демонстрируют чувствительность формирования NOx к параметрам рециркуляции и особенностям процесса горения [11]. На промышленных котлах большой мощности показана результативность сочетания рециркуляции дымовых газов с надтопочным воздухом как комплексного подхода к снижению NOx при сохранении приемлемых режимах работы [12]. Одновременно численные исследования подчёркивают, что ввод рециркуляции дымовых газов в первичный воздух может сопровождаться побочными эффектами - изменением CO-эмиссии и потенциальными рисками низко-NOx коррозии экранов, что требует поиска рационального диапазона рециркуляции [13]. С точки зрения экономичности и тепловых параметров котла влияние рециркуляции дымовых газов анализируется и для циркулирующих кипящих слоёв, где подчёркивается необходимость оценки не только экологического эффекта, но и эксплуатационной экономики [14]. Дополнительную вариативность вносит совместное сжигание угля с биомассой: показано, что рециркуляция дымовых газов в таких режимах существенно меняет характеристики горения, а итоговый эффект зависит от конфигурации топки и состава топлива [15].

Следовательно, литература подтверждает высокий потенциал рециркуляции дымовых газов, но одновременно указывает на выраженную зависимость результата от схемы реализации, типа котла и критериев оценки (NOx, CO, устойчивость, теплотехнические потери и риски коррозии). Это определяет необходимость прикладных исследований, направленных на обоснование параметров рециркуляции дымовых газов для конкретных котлоагрегатов и условий эксплуатации с формированием инженерно-обоснованного параметра рециркуляции по совокупности экологических и энергетических показателей.

Цель работы – параметрически обосновать рациональную степень рециркуляции дымовых газовдля угольного котла Е-90-3,9/440 (ТЭЦ-1, г. Семей) при сжигании угля марки Д (разрез Каражыра) по совокупности экологического критерия (NOx) и энергетического критерия (КПД брутто $\eta_{бр}$) с учетом эксплуатационных ограничений. Для достижения цели выполнены:

– построение и верификация расчетной схемы теплового баланса на основе режимных данных до/после включения РДГ;

– количественная оценка влияния степени РДГ на составляющие тепловых потерь и $\eta_{бр}$;

– построение зависимости NOx-R и выбор рационального уровня рециркуляции, обеспечивающего минимизацию выбросов при сохранении высокой энергетической эффективности.

Научная новизна заключается в прикладной двухкритериальной оптимизации параметров РДГ для конкретного котлоагрегата и топлива в условиях действующей угольной ТЭЦ, что позволяет перейти от общих литературных выводов к инженерно обоснованному выбору R.

Полученные зависимости и вывод о рациональном диапазоне степени рециркуляции справедливы для условий рассматриваемого объекта: угольный котёл Е-90-3,9/440 (ТЭЦ-1, г. Семей) при сжигании угля марки Д (разрез Каражыра) и для диапазона степеней рециркуляции R=0-25%. При существенном изменении характеристик топлива, конструктивной схемы котла, режима нагрузки и избытка воздуха, а также температурного

уровня уходящих газов требуется дополнительная верификация модели и уточнение рекомендуемого диапазона R.

Материалы и методы

Исследование выполнено с использованием расчётно-аналитического подхода на основе эксплуатационных (режимных) данных котлоагрегата и термодинамических расчётов. Объект исследования – угольный энергетический котёл Е-90-3,9/440, эксплуатируемый на ТЭЦ-1 г. Семей, при сжигании угля марки Д (разрез Каражыра).

Для количественной оценки влияния рециркуляции дымовых газов (РДГ) на энергетические и экологические показатели разработана математическая модель теплового баланса котла. Энергетическая эффективность характеризовалась КПД брутто $\eta_{бр}$, который определяли по методу обратного теплового баланса через суммарные тепловые потери:

$$\eta_{бр} = 100 - \sum q_i, \quad (1)$$

где $\sum q_i$ – относительные потери тепла (с уходящими газами, от химического/механического недожога, в окружающую среду и др.), вычисляемые по режимным параметрам котла.

Исходные режимные параметры котла (эксплуатационные данные) использовались как входные величины расчётно-аналитической модели. КПД брутто $\eta_{бр}$ определялся расчётно по методу обратного теплового баланса через суммарные относительные потери тепла. Степень рециркуляции R задавалась как расчётный параметр (доля возврата дымовых газов), для каждого значения R выполнялся пересчёт теплового баланса. Линейные зависимости $\eta_{бр}(R)$ и NOx(R) получены аппроксимацией результатов расчётных точек методом линейной регрессии.

Степень рециркуляции задавали как долю возврата дымовых газов в тракт горения:

$$R = \frac{G_{рец}}{G_{дг}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

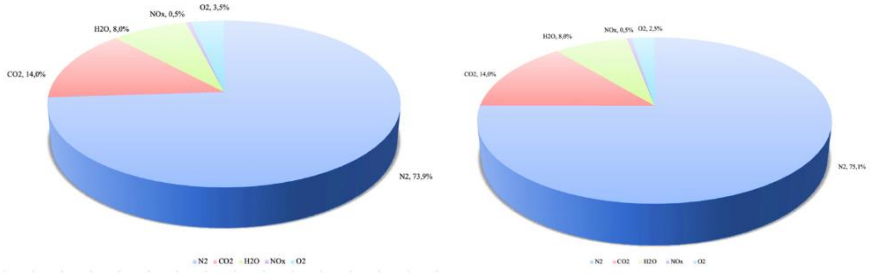
где $G_{рец}$ – массовый расход рециркулируемых дымовых газов, кг/с;
$G_{дг}$ – расход дымовых газов на выходе котла, кг/с.

Для каждого уровня R выполнялся расчёт теплового баланса и сопоставление полученного $\eta_{бр}$ с базовым режимом (без РДГ).

Экологический эффект оценивали по изменению концентрации NOx в дымовых газах. Дополнительно анализировали изменение компонентного состава дымовых газов до и после включения РДГ, что позволяет интерпретировать механизмы влияния РДГ на процесс горения (разбавление кислорода продуктами сгорания, изменение теплоёмкости газовой смеси и снижение температурного уровня факела).

Концентрацию NOx представляли в единицах мг/м^3. Приведение результатов выполняли в соответствии с нормативной методикой СТ РК ГОСТ Р ИСО 10849-2010 измерения выбросов оксидов азота в дымовых газах (условия пересчёта к сухим газам и/или к стандартному содержанию кислорода) [16].

Состав дымовых газов до и после рециркуляции представлен на рисунке 1.



а) б)

Рисунок 1 – Состав дымовых газов до (а) и после (б) включения рециркуляции дымовых газов

После включения РДГ наблюдается уменьшение доли O_2 (с 3,5% до 2,5%) при практически неизменных долях CO_2 (14%) и H_2O (8%), а доля инертной компоненты (преимущественно N_2) возрастает (с 73,9% до 75,1%). Эти изменения соответствуют физике процесса рециркуляции дымовых газов и связаны с разбавлением окислительной среды продуктами сгорания, что является одним из факторов снижения образования NOx.

Результаты и обсуждение

Анализ режимных данных показывает, что увеличение степени рециркуляции дымовых газов R приводит к росту КПД брутто котла $\eta_{бр}$ и одновременному снижению концентрации NOx . Зависимости $\eta_{бр}$ и NOx от уровня РДГ представлены на рисунке 2.

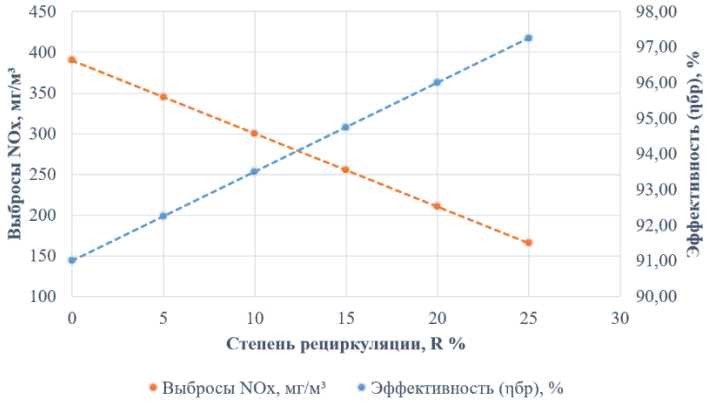


Рисунок 2 – Влияние степени рециркуляции дымовых газов на КПД брутто и выбросы NOx

Линейные зависимости, полученные по результатам математического моделирования, имеют вид:

$$\eta = 0{,}25R + 91 \quad (3)$$

$$NOx = -9R + 390 \quad (4)$$

Уравнения (2)-(3) показывают, что увеличение R на 1% сопровождается ростом $\eta_{бр}$ в среднем на 0,25 процентного пункта, тогда как концентрация NOx уменьшается на 9 мг/м^3. В частности, при $\eta_{бр}$ =96,0% и NOx =210 мг/м^3. По сравнению с базовым режимом (R=0%, NOx =390 мг/м^3) это соответствует снижению на 46%. Аппроксимация выполнена по n=6 стационарным режимным точкам (R = 0-25% с шагом 5%). Для обеих линейных зависимостей получено R^2=1,00.

Результаты показывают закономерный эффект РДГ:

– рост R уменьшает NOx, поскольку в зоне горения снижаются концентрация кислорода и максимальные температуры;

– $\eta_{бр}$ меняется слабо, так как влияние рециркуляции на тепловой баланс носит компенсирующий характер, то есть часть потерь уменьшается, часть – возрастает). В пределах исследуемого диапазона наилучшее сочетание экологического и энергетического критериев достигается при R=20%;

– снижение NOx выражено, а КПД брутто практически не ухудшается по сравнению с базовым режимом.

Линейный характер зависимостей в рассмотренном диапазоне R свидетельствует о стабильном и предсказуемом изменении показателей, что позволяет использовать полученные уравнения для инженерной оценки экологического и энергетического эффекта РДГ при выборе рационального уровня рециркуляции.

Заключение

На основе результатов математического моделирования влияния рециркуляции дымовых газов на энергетические и экологические показатели котла (КПД брутто и выбросы NOx) в диапазоне степеней рециркуляции R=0-25% основные выводы можно сформулировать следующим образом:

1 Показано, что в рассматриваемом диапазоне R зависимость КПД брутто и концентрации NOx от степени рециркуляции имеет линейный характер, что подтверждается полученными аппроксимационными уравнениями. Линейность свидетельствует о стабильном и предсказуемом изменении показателей при регулировании уровня рециркуляции.

2 Согласно уравнению (2), увеличение степени рециркуляции на 1% приводит к росту $\eta_{бр}$ в среднем на 0,25 процентного пункта. При увеличении R от 0 до 25% КПД брутто возрастает ориентировочно с 91% до 97.

3 Согласно уравнению (3), увеличение R на 1% сопровождается уменьшением концентрации NOx на 9 мг/м^3. При переходе от базового режима R=0% (NOx=390 мг/м^3) к R=25% прогнозируемый уровень составляет 165 мг/м^3, что соответствует снижению на 58%.

4 Наиболее показательный режим при R=20% соответствует $\eta_{бр}$=96,0 % и NOx=210 мг/м^3. По сравнению с базовым режимом это обеспечивает снижение выбросов NOx на 46%, при одновременном увеличении КПД брутто на 5 %. Указанный рациональный уровень R=20% относится к условиям эксплуатации котла Е-90-3,9/440 на угле марки Д (Каражыра) в пределах рассмотренного диапазона режимных параметров, принятых в расчётно-аналитической модели.

5 Полученные зависимости могут быть использованы для инженерной оценки ожидаемого экологического и энергетического эффекта при выборе рационального уровня рециркуляции и для предварительного подбора уставок системы управления в пределах R=0-25%.

6 Ограничения и перспективы. Результаты относятся к рассмотренному диапазону R и условиям принятой модели. В дальнейших исследованиях целесообразно расширить диапазон рециркуляции и учесть влияние эксплуатационных факторов (нагрузка котла, коэффициент избытка воздуха, температурное поле и распределение кислорода, ограничения по устойчивости горения.

Список литературы

1. Effect of the coal-spreading air on airflow and low-NOx combustion within a 75 t/h coal-fired grate furnace / Z. Ge et al. // Applied Thermal Engineering. – 2024. – Т. 256. – P. 124076.
2. Бусыгин С.В. Моделирование процесса рециркуляции дымовых газов энергетического котла с применением комплекса программ для оценки эффективности мероприятий направленных на подавление выбросов NOx при сжигании природного газа на ТЭС / С. В. Бусыгин / С.В. Бусыгин // Развитие методов прикладной математики для решения междисциплинарных проблем энергетики: Материалы I Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Ульяновск, 06-07 октября 2021 года. – Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет, 2021. – С. 176-179.
3. Effects of flue gas recirculation on self-excited combustion instability and NOx emission of a premixed flame / D. Pan et al // Thermal Science and Engineering Progress. – 2022. – Т. 30. – P. 101252.
4. Junwei S. Influence of Different Flue Gas Recirculation Schemes on 1000 MW Ultra-supercritical Double Reheat Boiler [J] / S. Junwei, D. Weibao, Y. Weiping // Journal of engineering for thermal energy and power. – 2019. – № 34(5). – P. 49-56.
5. Умыржан Н.Н. Рециркуляция дымовых газов как способ эффективного регулирования топочного процесса / Н.Н. Умыржан, А.И. Мануленко, Т.Н. Умыржан // Энергия-2022. Теплоэнергетика: Семнадцатая всероссийская (девятая международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. В 6 т., Иваново, 11-13 мая 2022 года. Том 1. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2022. – С. 18.
6. Characteristics and flame appearance of oxy-fuel combustion using flue gas recirculation / M. Abdelaal et al // Fuel. – 2021. – Т. 297. – P. 120775.
7. Ahn J. Combustion characteristics of 0.5 MW class oxy-fuel FGR (flue gas recirculation) boiler for CO2 capture / J. Ahn, H.J. Kim // Energies. – 2021. – Т. 14, № 14. – P. 4333.
8. Рециркуляция дымовых газов как способ внедрения экологических технологий в энергетических котлах / Н. Умыржан и др. // Вестник КазАТК. – 2021. – Т. 119, № 4. – С. 113-120.
9. Патент № 2761254 C1 Российская Федерация, МПК F23C 13/00. Устройство рециркуляции дымовых газов: № 2021107646: заявл. 22.03.2021: опубл. 06.12.2021 / С.В. Александров.
10. Zhu Y. Combustion characteristic study with a flue gas internal and external double recirculation burner / Y. Zhu, C. Wang, X. Chen // Chemical Engineering and Processing-Process Intensification. – 2021. – Т. 162. – P. 108345.

11. Experimental study on NOX formation characteristics in flue gas recirculation combustion process of S-CO2 coal-fired boiler / H. Li et al // Combustion Science and Technology. – 2024. – T. 196, № 18. – P. 5048-5063.
12. Khorampoor S. Efficient natural gas combustion and NOx reduction: A novel application of simultaneous over-fire air (OFA) and flue gas recirculation (FGR) in a 250 MW opposed firing steam power plant boiler / S. Khorampoor, S. Sanaye // Energy Reports. – 2024. – T. 12. – P. 2573-2587.
13. Numerical Studies of the Influence of Flue Gas Recirculation into Primary Air on NOx Formation, CO Emission, and Low-NOx Waterwall Corrosion in the OP 650 Boiler / B. Hernik et al // Energies. – 2024. – T. 17, № 9. – P. 2227.
14. Research on the effect of the flue gas recirculation on the combustion and operating economy of circulating fluidized bed boiler / G. Xie et al // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing. – 2023. – T. 1171, № 1. – P. 012005.
15. Numerical Study on Effect of Flue Gas Recirculation and Co-Firing with Biomass on Combustion Characteristics in Octagonal Tangentially Lignite-Fired Boiler / J. Du et al // Energies. – 2024. – T. 17, № 2. – P. 475.
16. СТ РК ГОСТ Р ИСО 10849–2010 (ГОСТ Р ИСО 10849-2006). Выбросы стационарных источников. Определение массовой концентрации оксидов азота. Характеристика автоматических методов измерений в условиях применения. - Астана: Комитет технического регулирования и метрологии Министерства индустрии и новых технологий Республики Казахстан, 2010. – Введен в действие с 01.01.2012. – Режим доступа: https://prg.kz/document/?doc_id=31924024 (дата обращения: 27.02.2026).

References

1. Effect of the coal-spreading air on airflow and low-NOx combustion within a 75 t/h coal-fired grate furnace / Z. Ge et al. // Applied Thermal Engineering. – 2024. – T. 256. – R. 124076. (In English).
2. Busygin S.V. Modelirovanie processa recirkulyacii dymovyh gazov energeticheskogo kotla s primeneniem kompleksa programm dlya ocenki effektivnosti meropriyatij napravlennyh na podavlenie vybrosov NOx pri szhiganii prirodnogo gaza na TES / S. V. Busygin / S.V. Busygin // Razvitie metodov prikladnoj matematiki dlya resheniya mezhdisciplinarnyh problem energetiki: Materialy I Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem, Ul'yanovsk, 06-07 oktyabrya 2021 goda. – Ul'yanovsk: Ul'yanovskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet, 2021. – S. 176-179. (In Russian).
3. Effects of flue gas recirculation on self-excited combustion instability and NOx emission of a premixed flame / D. Pan et al // Thermal Science and Engineering Progress. – 2022. – T. 30. – R. 101252. (In English).
4. Junwei S. Influence of Different Flue Gas Recirculation Schemes on 1000 MW Ultra-supercritical Double Reheat Boiler [J] / S. Junwei, D. Weibao, Y. Weiping // Journal of engineering for thermal energy and power. – 2019. – № 34(5). – R. 49-56. (In English).
5. Umyrzhan N.N. Recirkulyaciya dymovyh gazov kak sposob effektivnogo regulirovaniya topochnogo processa / N.N. Umyrzhan, A.I. Manulenko, T.N. Umyrzhan // Energiya-2022. Teploenergetika: Semnadcataya vserossijskaya (devyataya mezhdunarodnaya) nauchno-tekhnicheskaya konferenciya studentov, aspirantov i molodyh uchenyh. V 6 t., Ivanovo, 11-13 maya 2022 goda. Tom 1. – Ivanovo: Ivanovskij gosudarstvennyj energeticheskij universitet im. V.I. Lenina, 2022. – S. 18. (In Russian).
6. Characteristics and flame appearance of oxy-fuel combustion using flue gas recirculation / M. Abdelaal et al // Fuel. – 2021. – T. 297. – R. 120775. (In English).
7. Ahn J. Combustion characteristics of 0.5 MW class oxy-fuel FGR (flue gas recirculation) boiler for CO2 capture / J. Ahn, H.J. Kim // Energies. – 2021. – T. 14, № 14. – R. 4333. (In English).
8. Recirkulyaciya dymovyh gazov kak sposob vnedreniya ekologicheskih tekhnologij v energeticheskih kotlah / N. Umyrzhan i dr. // Vestnik KazATK. – 2021. – T. 119, № 4. – S. 113-120. (In Russian).
9. Patent № 2761254 C1 Rossijskaya Federaciya, MPK F23C 13/00. Ustrojstvo recirkulyacii dymovyh gazov: № 2021107646: zayavl. 22.03.2021: opubl. 06.12.2021 / S.V. Aleksandrov. (In Russian).
10. Zhu Y. Combustion characteristic study with a flue gas internal and external double recirculation burner / Y. Zhu, C. Wang, X. Chen // Chemical Engineering and Processing-Process Intensification. – 2021. – T. 162. – R. 108345. (In English).

11. Experimental study on NOX formation characteristics in flue gas recirculation combustion process of S-CO2 coal-fired boiler / N. Li et al // Combustion Science and Technology. – 2024. – T. 196, № 18. – R. 5048-5063. (In English).
12. Khorampoor S. Efficient natural gas combustion and NOx reduction: A novel application of simultaneous over-fire air (OFA) and flue gas recirculation (FGR) in a 250 MW opposed firing steam power plant boiler / S. Khorampoor, S. Sanaye // Energy Reports. – 2024. – T. 12. – R. 2573-2587. (In English).
13. Numerical Studies of the Influence of Flue Gas Recirculation into Primary Air on NOx Formation, CO Emission, and Low-NOx Waterwall Corrosion in the OP 650 Boiler / V. Hernik et al // Energies. – 2024. – T. 17, № 9. – R. 2227. (In English).
14. Research on the effect of the flue gas recirculation on the combustion and operating economy of circulating fluidized bed boiler / G. Xie et al // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing. – 2023. – T. 1171, № 1. – R. 012005. (In English).
15. Numerical Study on Effect of Flue Gas Recirculation and Co-Firing with Biomass on Combustion Characteristics in Octagonal Tangentially Lignite-Fired Boiler / J. Du et al // Energies. – 2024. – T. 17, № 2. – R. 475. (In English).
16. ST RK GOST R ISO 10849-2010 (GOST R ISO 10849-2006). Vybrosy stacionarnyh istochnikov. Opredelenie massovoj koncentracii oksidov azota. Harakteristika avtomaticheskih metodov izmerenij v usloviyah primeneniya. – Astana: Komitet tekhnicheskogo regulirovaniya i metrologii Ministerstva industrii i novyh tekhnologij Respubliki Kazahstan, 2010. – Vveden v dejstvie s 01.01.2012. – Rezhim dostupa: https://prg.kz/document/?doc_id=31924024 (data obrashcheniya: 27.02.2026). (In Russian).

А.Р. Хажидинова[1], К.С. Зарыкбаева[1]*, Е.Н. Мясоедова[1], А.Е. Сатыбалдинова[1], С.Л. Елистратов[2]
[1]Шәкәрім университеті, 071412, Қазақстан Республикасы, Семей қаласы, Глинка көшесі, 20А
[2]Новосібір мемлекеттік техникалық университеті,
630073, Ресей Федерациясы, Новосибирск қаласы, К. Маркс даңғылы, 20, 1-ғимарат
*e-mail: kamshat85.kz@mail.ru

ТҮТІН ГАЗДАРЫН ҚАЙТА АЙНАЛДЫРУ НЕГІЗІНДЕ КӨМІР ҚАЗАНЫНЫҢ ЖҰМЫСЫН ЭКОЛОГИЯЛЫҚ ЖӘНЕ ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ОҢТАЙЛАНДЫРУ

Түтін газдарын қайта айналдыру (ТГҚА) жалын температурасы мен жұмыс қоспасының құрамын басқару арқылы азот оксидтерінің шығарындыларын бір мезгілде төмендетуге және көмір қазандықтарының энергетикалық тиімділігін арттыруға мүмкіндік беретін тиімді әдіс болып табылады. Бұл жұмыста Қазақстандағы ТЭЦ-1 станциясының Е-90-3,9/440 қазанында Қаражыра кен орнының Д маркалы көмірін жағу кезінде ТГҚА қолданудың есептік-аналитикалық зерттеуі жүргізілді. Зерттеудің мақсаты – эксплуатациялық шектеулер шегінде КПД бруттоны барынша арттыра отырып, NOx мөлшерін төмендетуді қамтамасыз ететін ТГҚА-ның рационалды дәрежесін анықтау. Әдістеме қазанның жылулық балансының математикалық моделіне және ТГҚА қосылғанға дейін/кейінгі режимдік деректерді өңдеуге негізделген; қайта айналдыру үлесін өзгерту кезінде түтін газдарының құрамы мен жылутехникалық шығындардың өзгерістері бағаланды.

Зерттеу нәтижелері бойынша, қарастырылған ТГҚА дәрежелері диапазонында қайта айналдырудың артуы есептік КПД бруттоның өсуімен және NOx концентрациясының төмендеуімен қатар жүретіні анықталды: ТГҚА 1%-ға артқанда КПД 0,25%-ға өсіп, ал NOx 9 мг/м^3-ке азаяды. Рационалды көрсеткіштер ТГҚА ≈ 20% кезінде алынды, бұл есептік КПД брутто 95,5% мәніне және базалық режиммен салыстырғанда NOx-тің 30% төмендеуіне сәйкес келеді. Алынған нәтижелер ТГҚА-ны Қазақстанның көмірмен жұмыс істейтін ЖЭО/ЖЭС-терінің экологиялық және пайдалану тиімділігін арттыруға арналған технологиялық шешім ретінде қолданудың орындылығын растайды.

Түйін сөздер: *түтін газының рециркуляциясы, көмірмен жұмыс істейтін қазандықтар, азот оксидінің шығарындылары, жылу тиімділігі, энергияны оңтайландыру, көмірдің жануы.*

A.R. Khazhidinova[1], K.S. Zarykbayeva[1]*, E.N. Myasoedova[1], A.E. Satybaldinova[1], S.L. Elistratov[2]
[1]Shakarim University, 071412, Republic of Kazakhstan, Semey, 20A Glinka St.
[2]Novosibirsk State Technical University,
630073, Russian Federation, Novosibirsk, 20 Karl Marx Avenue, Building 1
*e-mail: kamshat85.kz@mail.ru

ECOLOGICAL AND ENERGY OPTIMIZATION OF A COAL-FIRED BOILER OPERATION BASED ON FLUE GAS RECIRCULATION

Flue gas recirculation (FGR) is an effective approach for simultaneously reducing nitrogen oxide emissions and improving the energy performance of coal-fired boilers by controlling flame temperature and the composition of the working mixture. This paper presents a computational and analytical study of FGR application to the E-90-3.9/440 boiler at TPP-1 under firing of D-grade coal from the Karazhyra open-pit mine. The aim is to determine a rational FGR ratio that ensures NOx reduction while maximizing gross boiler efficiency within operational constraints. The methodology is based on a mathematical boiler heat-balance model and processing of operational data before and after FGR activation; changes in flue gas composition and heat losses were assessed as the recirculation fraction was varied.

The results show that, within the considered FGR range, increasing recirculation is associated with a rise in calculated gross efficiency and a decrease in NOx concentration: a 1% increase in FGR raises gross efficiency by 0.25%, while NOx decreases by 9 mg/m³. Rational performance is achieved at FGR ≈ 20%, corresponding to a calculated gross efficiency of 95.5% and a 30% reduction in NOx relative to the baseline mode. The findings confirm the feasibility of FGR as a technological solution for enhancing the environmental and operational performance of coal-fired thermal power plants in Kazakhstan.

Key words: *flue gas recirculation, coal-fired boiler, nitrogen oxide emissions, thermal efficiency, energy optimization, coal combustion.*

Сведения об авторах

Акбота Рыспековна Хажидинова – PhD, и.о. ассоциированного профессора кафедры «Техническая физика и теплоэнергетика», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: khazhidinova1991@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8802-1559.

Камшат Серикхановна Зарыкбаева* – магистр технических наук, старший преподаватель кафедры «Техническая физика и теплоэнергетика», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: kamshat.ru@mail.ru.ORCID: https://orcid.org/0009-0002-8115-357X.

Екатерина Николаевна Мясоедова – магистр технических наук, преподаватель кафедры «Техническая физика и теплоэнергетика», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: Kate_white89@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-2142-3483.

Айгерим Еркеновна Сатыбалдинова – магистр технических наук, преподаватель кафедры «Техническая физика и теплоэнергетика», Шәкәрім Университет, Республика Казахстан; e-mail: aigerimsemei@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-7610-9058.

Сергей Львович Елистратов – доктор технических наук, профессор кафедры «Тепловых электрических станций», Новосибирский государственный технический университет, Российская Федерация; e-mail: elistratov@corp.nstu.ru.

Авторлар туралы мәліметтер

Акбота Рыспековна Хажидинова – PhD, «Техникалық физика және жылуэнергетика» кафедрасының қауымдастырылған профессорының м.а., Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: khazhidinova1991@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8802-1559.

Камшат Серикхановна Зарыкбаева* – техника ғылымдарының магистрі, «Техникалық физика және жылуэнергетика» кафедрасының аға оқытушысы, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: kamshat.ru@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-8115-357X.

Екатерина Николаевна Мясоедова – техника ғылымдарының магистрі, «Техникалық физика және жылуэнергетика» кафедрасының оқытушысы, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: Kate_white89@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-2142-3483.

Айгерим Еркеновна Сатыбалдинова – техника ғылымдарының магистрі, «Техникалық физика және жылуэнергетика» кафедрасының оқытушысы, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: aigerimsemei@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-7610-9058.

Сергей Львович Елистратов – техника ғылымдарының докторы, «Жылу электр станциялары» кафедрасының профессоры, Новосібір мемлекеттік техникалық университеті, Ресей Федерациясы; e-mail: elistratov@corp.nstu.ru.

Information about the authors

Akbota Ryspekovna Khazhidinova – PhD, Acting Associate Professor, Department of «Technical Physics and Heat Power Engineering», Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: khazhidinova1991@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8802-1559.

Kamshat Serikhanovna Zarykbayeva* – Master of Technical Sciences, Senior Lecturer, Department of «Technical Physics and Heat Power Engineering», Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: kamshat.ru@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-8115-357X.

Ekaterina Nikolaevna Myasoedova – Master of Technical Sciences, Lecturer, Department of «Technical Physics and Heat Power Engineering», Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: Kate_white89@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-2142-3483.

Aigerim Erkenovna Satybaldinova – Master of Technical Sciences, Lecturer, Department of «Technical Physics and Heat Power Engineering», Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: aigerimsemei@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-7610-9058.

Sergey Lvovich Elistratov – doctor of technical sciences, professor of the Department of «Heat Power Plants», Novosibirsk State Technical University, Russian Federation; e-mail: elistratov@corp.nstu.ru.

Поступила в редакцию 05.01.2026
Поступила после доработки 27.02.2026
Принята к публикации 10.03.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-62

CC BY 4.0
Check for updates

МРНТИ: 29.17.19

А.Б. Касымов, Т.Н. Умыржан*, А.А. Бектемисов, Ж.Қ. Акишов, Д.Н. Нургалиев
Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А
*e-mail: timirlan-95@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ГИБРИДНЫХ НАНОЧАСТИЦ TiO_2-Al_2O_3 НА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ

Аннотация: *Растительные масла рассматриваются как перспективные базовые жидкости для наномасел, однако их практическое применение определяется условием между ростом теплопроводности и увеличением вязкостных потерь. В работе экспериментально исследовано влияние гибридной дисперсной фазы TiO_2-Al_2O_3 на теплопроводность λ(T) и кинематическую вязкость ν (T) наномасел на основе оливкового и подсолнечного масел. Наномасла получали двухэтапным методом при суммарной концентрации твёрдой фазы 2 vol.% с ультразвуковой гомогенизацией; теплопроводность измеряли анализатором TEMPOS, а кинематическую вязкость определяли капиллярной вискозиметрией (ВПЖ-2) в диапазоне 20-50 °C (293-323 K).*

Установлено, что для базовых масел ν закономерно уменьшается с повышением температуры, тогда как введение TiO_2-Al_2O_3 приводит к росту кинематической вязкости на 17,5% по сравнению с соответствующими базовыми маслами во всём диапазоне температур. Теплопроводность базовых масел изменяется слабо и демонстрирует умеренное снижение при нагреве, а добавление TiO_2-Al_2O_3 повышает λ на 5%. Полученные зависимости λ(T) и ν(T) могут быть использованы для обоснования выбора состава наномасла с учётом баланса усиления теплопереноса и роста гидравлических потерь.

Ключевые слова: *растительные масла; наномасло; гибридные наночастицы; TiO_2; Al_2O_3; теплофизические свойства; температурная зависимость*

Введение

Растительные масла рассматриваются как перспективные базовые жидкости для наножидкостей благодаря биоразлагаемости, доступности и выраженным смазывающим свойствам. Вместе с тем их практическая применимость определяется соотношением между возможным усилением теплопереноса и увеличением вязкостных потерь, однако введение наночастиц, как правило, повышает эффективную теплопроводность, однако нередко сопровождается ростом вязкости, особенно при повышенных концентрациях и недостаточно устойчивой дисперсии.

Существенную роль играет температура, в рабочем диапазоне вязкость растительных масел закономерно уменьшается при нагреве, тогда как температурная зависимость теплопроводности определяется составом базовой жидкости и дисперсной фазы и поэтому должна быть установлена либо прямыми экспериментальными измерениями, либо на основе согласованного массива опорных данных. В литературе представлены как исследования термофизических свойств растительных масел, модифицированных гибридными оксидными добавками, так и работы, посвящённые наномаслам для технологических применений (например, MQL), где ключевыми характеристиками выступают λ(T) и ν(T) [1-4].

А.Б. Касымов, Т.Н. Умыржан, А.А. Бектемисов, Ж.Қ. Акишов, Д.Н. Нургалиев, 2026

Как следует из таблицы 1, основное внимание в литературе уделяется влиянию температуры и общей концентрации наночастиц, тогда как влияние соотношения компонентов гибридных оксидов при фиксированной суммарной концентрации исследовано ограниченно.

Таблица 1 – Примеры исследований наножидкостей на растительных маслах

Источник	Базовая жидкость, добавка, условия и ключевые выводы
Wanatasanappan et al. (2022) [5]	Кокосовое,соевое,пальмовое масла; гибрид Al_2O_3-TiO_2 (50:50), 0,2-0,6 wt.%, 30-60 °C. Влияние температуры и концентрации на λ и вязкость; эффект концентрации снижается при T>50 °C.
Sarafraz et al.(2016) [6]	Кокосовое масло; Ag, 0,5-1,5 wt.%, 25-85 °C. Экспериментальные данные λ и вязкости; наночастицы повышают λ и увеличивают вязкость.
Jyothish et al.(2022) [7]	Подсолнечная олеиновая основа; $ZnTiO_3$/BN/CuO, 1-4 wt.%, 30-70 °C. Температурные и концентрационные эффекты для условий MQL.

В работе в качестве базовых жидкостей использованы оливковое и подсолнечное масла, а дисперсная фаза представлена гибридной системой TiO_2-Al_2O_3, при фиксированной суммарной концентрации 2 vol.%. Исследование направлено на сопоставление влияния соотношения TiO_2/Al_2O_3 на теплопроводность и кинематическую вязкость в диапазоне 20-50°C (293-323 K) и построение зависимостей позволяющих обосновать выбор рационального соотношения компонентов. Научная новизна работы заключается в экспериментальном исследовании теплофизических свойств наномасел на основе оливкового и подсолнечного масел с гибридной дисперсной фазой TiO_2-Al_2O_3 при фиксированной суммарной концентрации наночастиц. В отличие от большинства опубликованных работ, где анализируется влияние общей концентрации наночастиц, в настоящем исследовании рассматривается влияние гибридной оксидной системы на температурные зависимости теплопроводности и кинематической вязкости растительных масел.

Материалы и методы

В качестве базовых жидкостей использованы оливковое масло и подсолнечное масло. В качестве дисперсной фазы применяли наночастицы TiO_2 и Al_2O_3 (производитель Sigma-Aldrich). Согласно паспортным данным, средний размер частиц составляет ≤ 50 нм. В качестве временного растворителя для облегчения смачивания и первичного распределения наночастиц в масляной среде использовали гексан.

Наномасла получали двухэтапным методом при фиксированной суммарной концентрации твёрдой фазы 2 vol.%. Составы формировали изменением соотношения компонентов гибридной системы TiO_2-Al_2O_3 при постоянной общей объемной доле наночастиц. Схема приготовления наномасел TiO_2-Al_2O_3 на основе оливкового и подсолнечного масел (двухэтапный метод), представлен на рисунке 1.

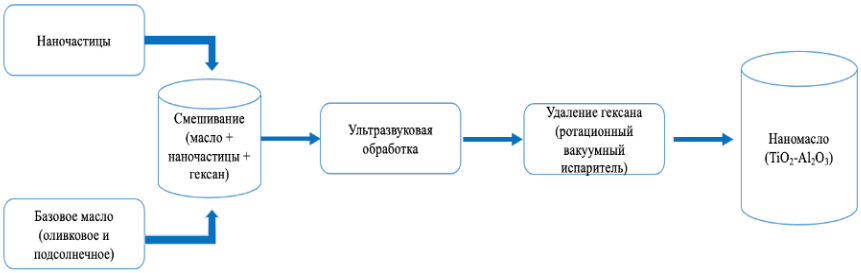


Рисунок 1 – Схема приготовления наномасел TiO_2-Al_2O_3 на основе оливкового и подсолнечного масел

Первичное диспергирование проводили с использованием ультразвукового гомогенизатора Scientz JY92-IIDN (максимальная мощность до 900 Вт, частота 20 кГц) в импульсном режиме. Время ультразвуковой обработки составляло 30 мин. После получения устойчивой суспензии гексан удаляли на ротационном вакуумном испарителе до постоянной массы образца. Полученные наномасла выдерживали в герметичной таре при комнатной температуре перед проведением измерений.

Теплопроводность (λ) измеряли в диапазоне 20-50 °C (293-323 K) с использованием анализатора теплофизических свойств TEMPOS [8]. Кинематическую вязкость (ν) определяли методом капиллярной вискозиметрии с использованием стеклянного вискозиметра ВПЖ-2 при термостатировании образцов в диапазоне 20-50 °C.

Кинематическую вязкость рассчитывали по уравнению [9]:

$$\nu = k \cdot t, \quad (1)$$

где ν – кинематическая вязкость, мм^2/с (cSt);
K – постоянная вискозиметра, мм^2/с^2;
t – время истечения, с.

Результаты и обсуждение

На рисунке 2 представлены температурные зависимости кинематической вязкости ν(T) для базовых масел и наномасел TiO_2-Al_2O_3. Для обоих базовых масел наблюдается типичное снижение вязкости при повышении температуры: в диапазоне 293-323 K ν уменьшается с 62 до 26 мм^2/с для подсолнечного масла и с 75 до 32 мм^2/с для оливкового масла. Введение гибридной дисперсной фазы приводит к увеличению v во всем диапазоне температур, при этом относительное увеличение составляет 17,5% по сравнению с соответствующим базовым маслом.

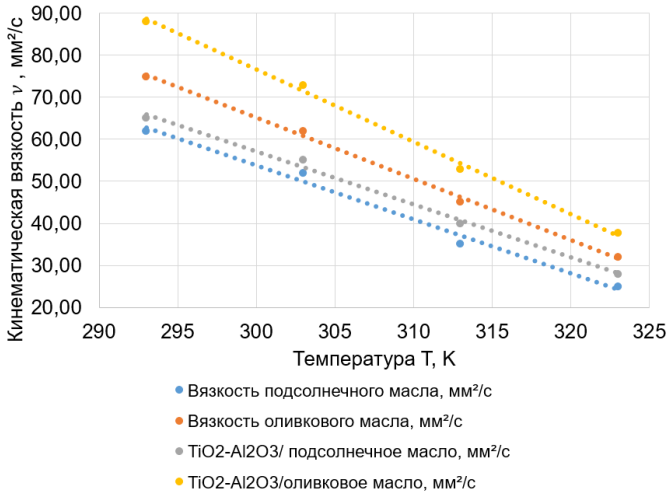


Рисунок 2 – Температурные зависимости кинематической вязкости ν(T) для базовых масел и наномасел TiO_2-Al_2O_3

Рост кинематической вязкости наномасел при введении гибридных наночастиц TiO_2-Al_2O_3 может быть объяснён несколькими физическими механизмами. Во-первых, наличие наночастиц приводит к увеличению межчастичных взаимодействий в жидкости и формированию структурированных слоев жидкости вокруг поверхности частиц. Эти слои обладают более высокой эффективной вязкостью по сравнению с объемной жидкостью. Во-вторых, возможная частичная агломерация наночастиц увеличивает эффективный гидродинамический размер дисперсных структур, что дополнительно повышает сопротивление течению. В совокупности эти факторы приводят к увеличению кинематической вязкости наномасел по сравнению с базовыми жидкостями.

Для количественного описания экспериментальных данных выполнена линейная аппроксимация вида:

$$\nu(T) = aT + b, \quad (2)$$

где ν – кинематическая вязкость, мм^2/с;
T – температура, K;
a – температурный коэффициент,
b – свободный член.

Точность аппроксимации оценивалась коэффициентом детерминации R^2. Для всех исследованных жидкостей значения R^2 превышали 0,98, что свидетельствует о высокой степени соответствия линейной модели экспериментальным данным. Выбор линейной зависимости обусловлен тем, что в исследованном температурном интервале (293-323 K) экспериментальные данные демонстрируют практически линейный характер изменения теплофизических свойств, что подтверждается высокими значениями коэффициента детерминации.

Для всех жидкостей получены отрицательные значения a, что указывает на монотонное снижение ν при повышении температуры в диапазоне 293-323 K.

Аппроксимационные зависимости для базовых масел имеют вид:

$$\nu_{\text{подс}}(T) = -1{,}28T + 437{,}74 \quad (3)$$

$$\nu_{\text{олив}}(T) = -1{,}46T + 503{,}18 \quad (4)$$

Для наномасел с гибридной дисперсной фазой дисперсной фазой TiO_2-Al_2O_3 (2 vol.%) получены уравнения:

$$\nu_{TiO_2-Al_2O_3/\text{подс}}(T) = -1{,}26T + 435{,}08 \quad (5)$$

$$\nu_{TiO_2-Al_2O_3/\text{олив}}(T) = -1{,}7155T + 591{,}24 \quad (6)$$

Сопоставление коэффициентов a показывает, что скорость уменьшения вязкости с температурой лежит в пределах 1,26-1,72 мм^2/с на 1 K, наиболее выраженная температурная зависимость характерна для гибрида TiO_2-Al_2O_3/ оливковое масло (a=−1,7155).

Значения свободного члена b определяют общий показатель ν: максимальные значения во всём рассматриваемом интервале соответствуют наномаслу на основе оливкового масла (b=591,24), тогда как минимальные – базовому подсолнечному маслу (b=437,74). Следовательно, введение TiO_2-Al_2O_3 в наибольшей степени повышает вязкость для оливковой основы и одновременно усиливает температурную чувствительность ν(T), что следует учитывать при оценке гидравлических потерь и выборе состава наномасла.

На рисунке 3 приведены зависимости теплопроводности λ(T). В рассматриваемом диапазоне температур теплопроводность базовых масел изменяется слабо и демонстрирует умеренное снижение (4-5% при переходе от 293 к 323 K). Добавление TiO_2-Al_2O_3 повышает теплопроводность на 5% относительно базовой жидкости. Следовательно, при выборе состава наномасла необходимо учитывать следуюшие условия: небольшой выигрыш в λ сопровождается заметным ростом ν, что потенциально увеличивает затраты на перекачку и снижает эффективность конвективного теплообмена при заданном расходе.

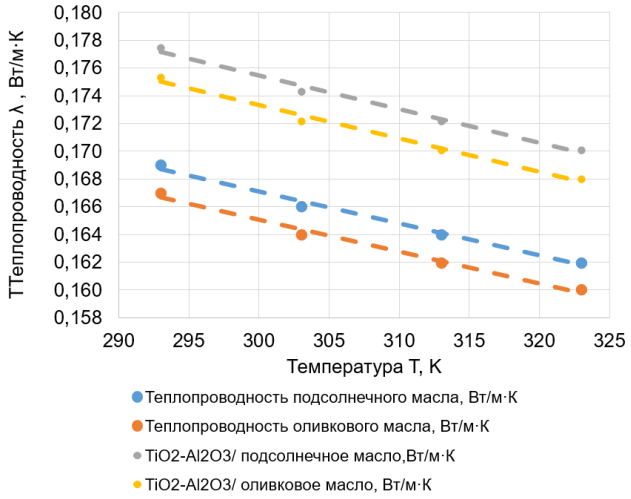


Рисунок 3 – Теплопроводность λ(T) базовых масел и наномасел TiO_2-Al_2O_3 (2 vol.%)

Повышение теплопроводности наномасел при добавлении гибридных наночастиц TiO_2-Al_2O_3 связано с несколькими механизмами теплопереноса. Наночастицы оксидов металлов обладают более высокой теплопроводностью по сравнению с растительными

маслами, что приводит к формированию дополнительных путей теплопереноса в дисперсной системе. Кроме того, движение наночастиц в жидкости может вызывать локальную микроконвекцию, способствующую усилению теплопереноса. В результате совокупного действия этих механизмов наблюдается увеличение эффективной теплопроводности наномасел.

Для количественного описания выявленной температурной зависимости выполнена линейная аппроксимация экспериментальных данных в виде:

$$\nu(T) = aT + b, \tag{7}$$

где T – температура, K;
λ – теплопроводность, Вт/(м·К).

Во всех данных получен одинаковый отрицательный температурный коэффициент $a = -2 \cdot 10^{-4}$ Вт/(м·К²), что соответствует снижению λ на Δλ≈0,006 Вт/(м·К) при нагреве от 293 до 323 K и подтверждает слабую температурную чувствительность теплопроводности в рассматриваемом интервале.

Аппроксимационные зависимости для базовых масел имеют вид:

$$\lambda_{\text{подс}}(T) = -0{,}0002T + 0{,}2361 \tag{8}$$

$$\lambda_{\text{олив}}(T) = -0{,}0002T + 0{,}2341 \tag{9}$$

Для наномасел с гибридной дисперсной фазой TiO_2-Al_2O_3 (2 vol.%) получены уравнения:

$$\lambda_{TiO_2-Al_2O_3/\text{подс}}(T) = -0{,}0002T + 0{,}2479 \tag{10}$$

$$\lambda_{TiO_2-Al_2O_3/\text{олив}}(T) = -0{,}0002T + 0{,}2458 \tag{11}$$

Сопоставление свободных членов b показывает, что введение TiO_2-Al_2O_3 приводит преимущественно к вертикальному смещению зависимостей λ(T) вверх при сохранении характера температурной зависимости: для подсолнечного масла b увеличивается с 0,2361 до 0,2479, для оливкового – с 0,2341 до 0,2458. Следовательно, влияние наночастиц проявляется главным образом в повышении уровня теплопроводности в пределах рассматриваемого диапазона температур, тогда как температурная производная dλ/dT остаётся практически неизменной.

Заключение

1. Экспериментально определены температурные зависимости теплопроводности и кинематической вязкости для подсолнечного и оливкового масел, а также для наномодифицированных составов с гибридной дисперсной фазой TiO_2-Al_2O_3 при суммарной концентрации 2 vol.% в интервале 293-323 K.

2. В рассматриваемом диапазоне температур теплопроводность базовых масел изменяется слабо и демонстрирует умеренное снижение при нагреве. Добавление гибридных наночастиц TiO_2-Al_2O_3 приводит к повышению теплопроводности наномасел примерно на 5% по сравнению с соответствующими базовыми маслами во всём исследованном температурном интервале.

3. Кинематическая вязкость для всех образцов монотонно уменьшается с ростом температуры в диапазоне 293-323 K. Вместе с тем введение TiO_2-Al_2O_3 сопровождается заметным ростом вязкости: для наномасел увеличение кинематической вязкости составляет 17,5% относительно базовых масел при сохранении выраженного температурного снижения.

4. Полученные результаты показывают, что при практическом использовании наномасел важно учитывать баланс между ростом теплопроводности и увеличением вязкостных потерь. Небольшое повышение теплопроводности может сопровождаться ростом потерь давления при перекачке и, как следствие, уменьшением эффективности конвективного теплообмена при заданном расходе. В дальнейшем исследования следует направить на подбор оптимального состава гибридной дисперсной фазы и повышение устойчивости дисперсии, чтобы улучшить соотношение между усилением теплопереноса и увеличением вязкости.

Список литературы

1. Thermal Conductivity Characterization of High Oleic Vegetable Oils Based Hybrid Nanofluids Formulated Using GnP, TiO2, MoS2, Al2O3 Nanoparticles for MQL Machining / A.C. Okafor et al // Int J Thermophys. – 2024. – № 45. – P. 169. https://doi.org/10.1007/s10765-024-03472-7.
2. Thermophysical Properties and Heat Transfer Performance of Novel Dry-Ice-Based Sustainable Hybrid Lubri-Coolant / M. Jamil et al // Sustainability. – 2022. – № 14(4). – P. 2430. https://doi.org/10.3390/su14042430.
3. Characteristics of Hybrid Nanolubricants for MQL Cooling Lubrication Machining Application / S.K. Lim et al // Lubricants. – 2022. – № 10(12). – P. 350. https://doi.org/10.3390/lubricants10120350.
4. Thermal Conductivity Characterization of Nanofluids Formulated Using High Oleic Vegetable Oils and Gnp, Tio2, Mos2, Al2o3 Nanoparticles for Mql Machining / O.A.C. Valiev// Available at SSRN: https://ssrn.com/abstract=5049062 or http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5049062.
5. 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.
6. Thermal performance and viscosity of biologically produced silver/coconut oil nanofluids / M.M. Sarafraz et al // Chemical and Biochemical Engineering Quarterly. – 2016. – № 30(4). – P. 489-500. https://doi.org/10.15255/CABEQ.2015.2203.
7. Experimental study on NOX formation characteristics in flue gas recirculation combustion process of S-CO2 coal-fired boiler / N. Li et al // Combustion Science and Technology. – 2024. – T. 196, № 18. – R. 5048-5063.
8. Jyothish P. Experimental investigation study on enhancing the thermal and rheological properties of sunflower vegetable oil with ZnTiO3, BN, CuO nanofluid for machining of Inconel-718 under minimum quantity lubrication (MQL) / P. Jyothish, V. Vasu, D. Kashinath // Materials Today: Proceedings. – 2022. – № 59. – P. 1599-1607. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.147.
9. TEMPOS Manual. METER Group, 2020. (ASTM D5334, IEEE 442; transient line heat source method.
10. Ranjbarzadeh R. Experimental Study of Thermal Properties and Dynamic Viscosity of Graphene Oxide/Oil Nano-Lubricant / R. Ranjbarzadeh, R. Chaabane // Energies. – 2021. – № 14(10). – P. 2886. https://doi.org/10.3390/en14102886.

Сведения о финансировании

Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант №AP26100207).

А.Б. Касымов, Т.Н. Умыржан*, А.А. Бектемисов, Ж.Қ. Акишов, Д.Н. Нургалиев

Шәкәрім университеті,

071412, Қазақстан Республикасы, Семей қаласы, Глинка көшесі, 20А

*e-mail: timirlan-95@mail.ru

TiO_2-Al_2O_3 ГИБРИДТІ НАНОБӨЛШЕКТЕРІНІҢ ӨСІМДІК МАЙЛАРЫНЫҢ ЖЫЛУФИЗИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІНЕ ӘСЕРІ

Өсімдік майлары наномайлар үшін перспективалы базалық сұйықтықтар ретінде қарастырылады, алайда олардың практикалық қолданылуы жылуөткізгіштіктің артуы мен тұтқырлықтық шығындардың өсуі арасындағы тепе-теңдік шартымен айқындалады. Бұл жұмыста зәйтүн және күнбағыс майлары негізіндегі наномайлардың жылуөткізгіштігі λ(T) мен кинематикалық тұтқырлығына ν(T) TiO_2-Al_2O_3 гибридті дисперстік фазасының әсері эксперименттік түрде зерттелді. Наномайлар қатты фазаның жиынтық концентрациясы 2 vol.% болған жағдайда екісатылы әдіспен, ультрадыбыстық гомогенизацияны қолдана отырып дайындалды; жылуөткізгіштік TEMPOS анализаторымен өлшенді, ал кинематикалық тұтқырлық 20-50 °C (293-323 K) температура диапазонында капиллярлық вискозиметрия (ВПЖ-2) әдісімен анықталды.

Негізгі майлар үшін ν температура артқан сайын заңды түрде төмендейтіні анықталды, ал TiO_2-Al_2O_3 енгізу температуралардың бүкіл диапазонында сәйкес базалық майлармен салыстырғанда кинематикалық тұтқырлықтың 17,5%-ға артуына әкеледі. Негізгі майлардың жылуөткізгіштігі әлсіз өзгереді және қыздырғанда қалыпты төмендеу үрдісін көрсетеді, ал TiO_2-Al_2O_3 қоспасын қосу λ мәнін 5%-ға арттырады. Алынған λ(T) және ν(T) тәуелділіктері жылуалмасуды

күшейту мен гидравликалық шығындардың өсуі арасындағы тепе-теңдікті ескере отырып, наномай құрамын таңдауды негіздеуде пайдаланылуы мүмкін.

Түйінді сөздер*: *өсімдік майлары; наномай; гибридті нанобөлшектер; TiO_2; Al_2O_3; жылуфизикалық қасиеттер; температуралық тәуелділік.

A.B. Kassymov, T.N. Umyrzhan*, A.A. Bektemissov, Z.K. Akishov, D.N. Nurgaliyev
Shakarim University,
071412, Republic of Kazakhstan, Semey, 20A Glinka St.
*e-mail: timirlan-95@mail.ru

EFFECT OF HYBRID TiO_2-Al_2O_3 NANOPARTICLES ON THE THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF VEGETABLE OILS

Vegetable oils are considered promising base fluids for nanolubricants; however, their practical application is governed by the trade-off between enhanced thermal conductivity and increased viscous losses. In this work, the effect of a hybrid dispersed phase TiO_2-Al_2O_3 on the thermal conductivity λ(T) and kinematic viscosity ν(T) of nanolubricants based on olive and sunflower oils was experimentally investigated. The nanolubricants were prepared by a two-step method at a total solid-phase concentration of 2 vol.% with ultrasonic homogenization; thermal conductivity was measured using a TEMPOS analyzer, and kinematic viscosity was determined by capillary viscometry (VPZh-2) over the temperature range of 20-50°C (293-323 K).

It was found that for the base oils, ν decreases monotonically with increasing temperature, whereas the addition of TiO_2-Al_2O_3 increases the kinematic viscosity by 17,5% relative to the corresponding base oils across the entire temperature range. The thermal conductivity of the base oils varies only slightly and exhibits a moderate decrease upon heating, while the incorporation of TiO_2-Al_2O_3 increases λ by 5%. The obtained λ(T) and ν(T) relationships can be used to substantiate the selection of nanolubricant composition by accounting for the balance between heat-transfer enhancement and the rise in hydraulic losses.

***Key words:** vegetable oils; nanolubricant; hybrid nanoparticles; TiO_2; Al_2O_3; thermophysical properties; temperature dependence.*

Сведения об авторах

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.

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.

Жандос Қайрбекұлы Акишов – докторант образовательной программы 8D05302-«Техническая физика» кафедры «Техническая физика и теплоэнергетика», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: zhandosakishov@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-0205-6269.

Данияр Нуржанович Нургалиев – старший преподаватель кафедры «Техническая физика и теплоэнергетика», Шәкәрім Университет, Республика Казахстан; e-mail: daniarsemei@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-1650-1077.

Авторлар туралы мәліметтер

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.

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.

Жандос Қайрбекұлы Акишов – «Техникалық физика және жылу энергетикасы» кафедрасының 8D05302-«Техникалық физика» білім беру бағдарламасының докторанты, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: zhandosakishov@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-0205-6269.

Данияр Нуржанович Нургалиев – «Техникалық физика және жылуэнергетикасы» кафедрасының аға оқытушысы, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: daniarsemei@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-1650-1077.

Information about the authors

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.

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.

Zhandos Kairbekuly Akishov – 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: zhandosakishov@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-0205-6269.

Daniyar Nurjanovich Nurgaliev – senior lecturer, Department of Technical Physics and Heat Power Engineering, Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: daniarsemei@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-1650-1077.

Поступила в редакцию 25.01.2026
Поступила после доработки 10.03.2026
Принята к публикации 10.03.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-63

МРНТИ: 31.17.15

CC BY 4.0
Check for updates

Д.А. Әскержанов[1,2]*, Р.К. Кусаинов[1,2], А.Ж. Жасұлан[1,2], К.Д. Орманбеков[1], А.Б. Шынарбек[1]

[1]Шәкәрім университеті, Инжиниринг орталығы,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинка, 20 А
[2]Шәкәрім университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинка, 20 А
*e-mail: dumanaskerzhanov541@gmail.com.

HVOF ӘДІСІМЕН АЛЫНҒАН CR_3C_2–NICR ЖАБЫНДАРЫНЫҢ ҚҰРЫЛЫМДЫҚ, ТРИБОЛОГИЯЛЫҚ ЖӘНЕ КОРРОЗИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІ

Аңдатпа: *Бұл зерттеу жұмысы жылу электр орталығының қазандық құбырларын жасауға кеңінен қолданылатын 12Х1МФ тот баспайтын болаттан қызмет мерзімін арттыруға бағытталған. Жоғары жылдамдықты оттекті-отын жалынды бүрку (HVOF) әдісімен Cr_3C_2–NiCr жабындары алынып, олардың құрылымдық, фазалық, механикалық, трибологиялық және коррозиялық қасиеттері зерттелді. Болат үлгілерінің жабын төселетін беткі қабатын алдын ала 100°C және 200°C температурада қыздырудың жабынның микроструктуралық күйі мен қасиеттеріне әсері қыздырылмаған үлгілермен салыстырмалы түрде бағаланды. Жабындардың көлденең қимасын СЭМ талдау нәтижелері барлық режимдерде алынған жабындар біртекті құрылымға ие екенін көрсетті. Болат үлгілерін алдын ала қыздыру жабын мен төсеніш шекарасында тығыз қабаттың қалыптасуына себеп болады. Рентгендік дифракциялық талдау нәтижелері зерттелген жабындарда Cr_3C_2–Ni жүйесінің фазалық тұрақтылығы сақталатынын көрсетті. Алынған нәтижелер бойынша 100°C температурада алдын ала қыздырылған үлгілер ең жоғарғы қасиеттер жиынтығын көрсетті: микроқаттылықтың жоғары мәні (897,8 HV), беткі кедір-бұдырлықтың төмендеуі, тозу ізінің диаметрінің минималды мәні (712 мкм) және коррозия тоғының тығыздығының төмендеуі байқалды.*

©Д.А. Әскержанов, Р.К. Кусаинов, А.Ж. Жасұлан, К.Д. Орманбеков, А.Б. Шынарбек, 2026

Жалпы алғанда, зерттеу нәтижелері HVOF әдісімен алынған Cr_3C_2–NiCr жабындарының 12Х1МФ болаты үшін тозуға және коррозияға төзімді қорғаныш қабаты ретінде қолдану мүмкіндігін көрсетеді және оларды жоғары температуралы агрессивті ортада пайдалануға перспективалы материалдар ретінде қарастыруға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: *Жоғары жылдамдықты оттекті-отын жалынды бүрку (HVOF), 12Х1МФ тот баспайтын болат, коррозия, трибология, кедір-бұдырлық, қаттылық.*

Кіріспе

Жылу электр орталықтарында қазандық құбырлары жоғары температура әсерінен температуралық шаршауға ұшырайды. Нәтижесінде металл морттанып, ұзақ уақыт ішінде құбыр қабырғасының қалыңдығы азаяды. Сонымен қатар су буымен және қышқыл газдармен әрекеттесу нәтижесінде коррозия дамиды. Қатты бөлшектердің (күл, шлак және т.б.) жоғары жылдамдықпен құбыр немесе жабдық бетіне соғылуы эрозиялық тозуды тудырады.[1]. Әсіресе отын сапасы төмен болған жағдайда, шлак пен күлдің көп болуы тозу процесін жылдамдатады. Қазандық суы сапасыз болғанда, тұздар мен қоспалар құбырдың ішкі бетінде қатты қақ түзеді [2]. Қалыптасқан қақ қабаты жылу алмасуды төмендетіп, металдың қызып кетуі салдарынан жарылу қаупін тудырады. Агрессивті ортада жұмыс істейтіндіктен, олардың мерзімінен бұрын тозуы өндірістік қауіпсіздікке қауіп төндіріп, экономикалық шығындарға әкеледі [3-4].

Осы мәселелерді шешу мақсатында жоғары жылдамдықты оттекті-отын жалынды бүрку (HVOF) әдісімен 12Х1МФ тот баспайтын болаттан жасалған үлгілердің бетіне хром карбиді-никель хром (Cr_3C_2–NiCr) жабынын алу болды.

Қазіргі таңда жоғары жылдамдықты оттекті-отын жалынды бүрку әдісі – эрозияға, коррозияға және тозуға төзімді жабындар жасауда кеңінен қолданылып, жақсы нәтижелер береді [5]. Dominique Poirier және басқалары [6] жұмысында бүрку кезінде пайда болатын карбидтің еруі келесі салдарға әкеледі: Cr3C2 жабындардың тозуға төзімділігіне айтарлықтай әсер етсе, NiCr плазмалық бүріккіш жабындары әдетте олар карбидтермен байланыс түзуімен жабынның механикалық қасиеттеріне айтарлықтай ықпалын тигізеді. Негізгі артықшылықтары жоғары адгезия (60-100 МПа дейін), төмен кеуектілік, жоғары температураға, эрозияға және коррозияға төзімді, бөлшек материалы құрылымдық өзгерістерге ұшырамайды [7-8].

Зерттеудің негізгі мақсаты – ЖЭО-дағы қазандық құбырларының ұзақ мерзімде жұмыс жасау жағдайын арттыру үшін Cr_3C_2–NiCr жабынын HVOF әдісмен алып, коррозияға төзімділікті, тозуға төзімділігін арттыру үшін зерттеу жасау. Алынған нәтижелер беттік бүрку арқылы жабын қалыптастыру саласына материал қасиеттері өзгеруіндегі процесстер туралы ақпараттар береді.

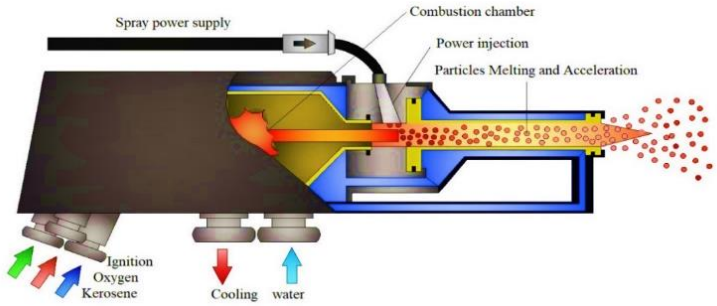
Материалдар мен әдістер

Жабын алу үшін 30-42 мкм хром карбиді-никель хром (Cr_3C_2–NiCr) ұнтағы қолданылды. Жабынды таңдалып алынған өлшемі 5х5 мм, қалыңдығы 4 мм шаршы 12Х1МФ тот баспайтын болат үлгілері бетіне алынды.

Арнайы [9] стандартқа сәйкес келетін 12Х1МФ тотбаспайтын болатты таңдау себебі қазандық құбырлары (буқыздырғыш, қайта қыздырғыш,), жоғары қысымды бу магистральдары, коллекторлар мен арматура, қазандықтардың буқыздырғыштары мен бу коллекторларындағы жұмыс шарттарына сәйкес келеді.

Жабын алу алдында үлгілер 120Р - 600Р тегістеу қағазы көмегімен өңделіп, құммен атқылау арқылы жоғары қысымды ауа ағынымен құм түйіршігі бетке соғылып, оны кедір-бұдырлау әдісі қолданылды[10].Үлгілер бірнеше температура шамасында алдын ала қыздырылды (қыздырылмаған, 100°C, 200°C), әр бүрку уақыты 15 с құрады [11]. Жабындар 1-суретте көрсетілген JP 5000 маркалы қондырғысында алынды. JP 5000 – сұйық отынмен (керосин) жұмыс істейтін жоғары қысымды жандырғышы сұйық отын мен оттегі жануы нәтижесінде аса жоғары қысымды, жоғары жылдамдықты газ ағынын түзеді, нәтижесінде ұнтақ газ ағынында болады да жақсы қызады.

Жабынның фазалық құрамын талдау үшін X'PertPRO рентгендік дифрактометр пайдаланылды, қондырғы Cu-Kα (λ = 1,5406 Å) сәулеленуімен жұмыс істейді. Алынған үлгілер 20-90° бұрыштық диапазонда, 0,02° қадаммен және санау уақыты бір қадамға 0,5 секунд ұзақтығымен дифракциялық заңдылықтар көмегімен HighScore бағдарламасында зерттелді.



Сурет 1 – JP 5000 қондырғысы

SEM3200 көмегімен үлгілердің құрылымын талдау үшін сканерлеуші электрондық микроскопия (СЭМ) пайдаланылды. Бұл құрал EDS көмегімен химиялық құрамды талдайды. Электрон көзі ретінде вольфрам жіпі пайдаланылды.

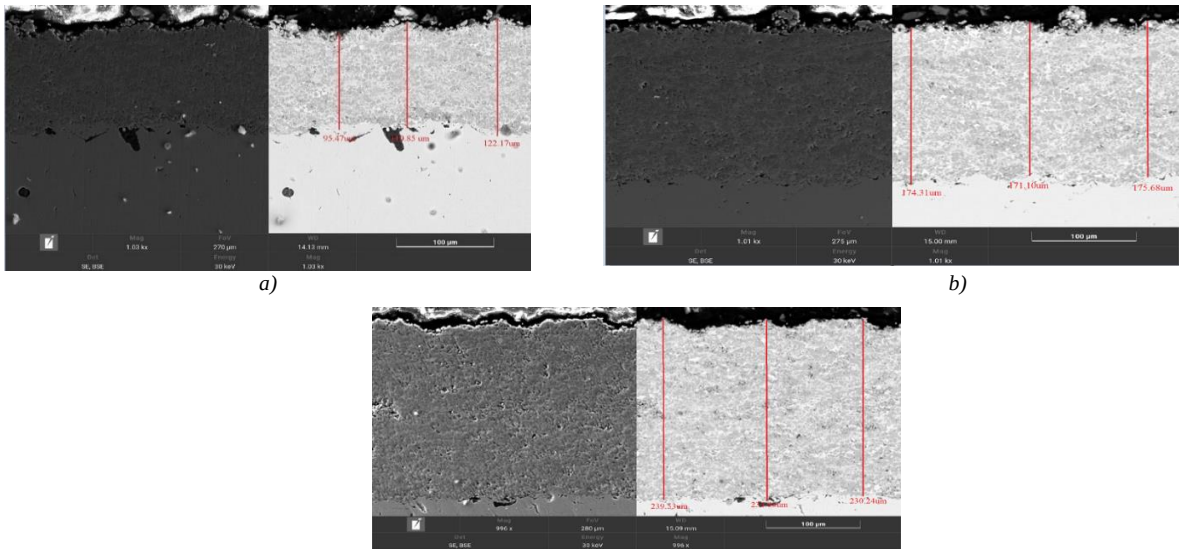
Кедір-бұдырлықты өлшеу Anytester HY2300 профилометрының көмегімен жүргізілді. Жабындардың көлденең қимасында микроқаттылық Vickers HLV-1DT микроқатты өлшегішімен келесі режимде анықталды: шегініс жүктемесі 2 Н және жүктеме әсер ету ұзақтығы 10 секунд.

Үлгілердің трибологиялық қасиеттері Anton Paar TRB3 трибометрының көмегімен зерттелді, бұл ретте үлгіні жабынның беті штанганың ұшына бекітілген 100X6 болаттан (WX15 эквиваленты) жасалған диаметрі 3 мм шардың траекториясына перпендикуляр болатындай етіп орналастырды. Тозу бетінің қисықтық радиусы ығысу сенсоры арқылы реттелді, ал үйкелісті өтеу сенсоры үйкеліс коэффициентін уақыт бойынша өлшеді. Тәжірибелер ашық ауада 10 Н жүктememен және 5 см/с жылдамдықпен жүргізілді, тозу бетінің қисықтық радиусы 1,5 мм, ал үйкеліс жолының ұзындығы 100 мм қылып орнатылды.

Коррозияға төзімділік CS936 моделді стандартты үш электродты қондырғыда жалпақ коррозиялық ұяшығымен жалғанған CS300M потенциостат-гальваностат (Corrtest Instruments, Ухань, Қытай) көмегімен потенциодинамикалық поляризация арқылы бағаланды. Жұмыс электроды 1 см^2 ашық алаңы бар үлгі болды. Салыстыру электроды ретінде қаныққан AG/AgCl электрод, ал анти-электрод ретінде платина торы қолданылды. Сынақтар 3,5% концентрациялы NaCl ерітіндісінде жүргізілді, бөлме температурасы 25°C болды. Потенциодинамикалық поляризацияны анықтау алдында ашық тізбектің потенциалы 30 минут ішінде тұрақтандырылды [12].

Нәтижелер

2-суретте сканерлеуші электронды микроскоп (СЭМ) көмегімен алынған, жоғары жылдамдықты оттекті-отын жалынды бүрку (HVOF) әдісімен қалыптастырылған Cr_3C_2–NiCr жабындарының көлденең қималары көрсетілген.



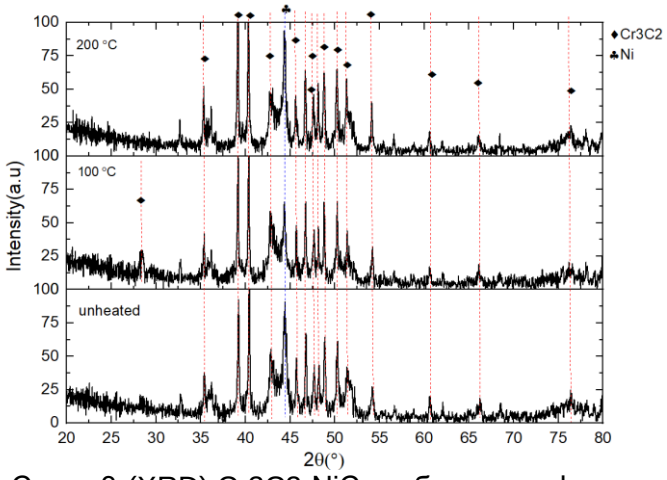
a) *b)* *c)*

Сурет 2 – 1000х үлкейтуі бар үлгілердің көлденең қимасы СЭМ кескіндері:
(a) қыздырылмаған,(b)100°C(c) 200°C

СЭМ кескіндерінен жабын мен негіздің шекара аймағында айтарлықтай ірі жарықшақтар байқалмайды. Бұл алдын ала қыздырудың жабынның негізбен байланысына оң әсер етуінде. Алдын ала қыздыру температурасының өзгеруіне қарамастан, жабындардың жалпы қалыңдығы айтарлықтай айырмашылық көрсетпейді, бұл жабын қалыңдығының негізінен HVOF бүрку режимдерімен байланысты (әрбір бүрку уақыты 15 с, бүрку қашықтығы 400 мм және ұнтақ беру жылдамдығы 60 г/мин).

Жабын құрылымының тығыз қалыптасқаны байқалады. HVOF әдісімен алынған Cr_3C_2–NiCr жабындары үшін тән құбылыс болып табылады. Мұндай жабындардың кеуектілігі әдетте 1-3% аралығында [13]. Кеуектіліктің төмен болуы жабынның жоғары тығыздығын қамтамасыз етіп, оның тозуға төзімділігі мен коррозияға қарсы қасиеттерінің жақсаруына қолайлы жағдай жасайды [14].

Фазалық құрамын рентгендік дифракциялық талдау нәтижесінде HVOF әдісімен алынған Cr_3C_2–NiCr жабындарының фазалық құрамы зерттелді 3-сурет. Әртүрлі температурада алдын ала қыздырылған үлгілердің негізгі фазалар ретінде Cr_3C_2 карбиді және Ni-негізді матрица анықталды. Cr_3C_2 фазасына сәйкес келетін дифракциялық шыңдар 2θ = 37-45° бұрыштар аралығында байқалды, ал 2θ = 44° маңында Ni фазасына сәйкес келеді.



Сурет 3-(XRD) Cr3C2-NiCr жабынының фазалар графигі.

Алдын ала қыздыру температурасының өзгерістері қарамастан, барлық үлгілерде жаңа фазалардың пайда болуы немесе бастапқы фазалардың жойылуы байқалмайды. Бұл зерттелген температуралық режимдерде Cr_3C_2–Ni жүйесінің фазалық тұрақтылығы сақталатынын көрсетеді. Дифракциялық шыңдардың сақталуы карбид фазасының термиялық өзгеріске ұшырамағанын және никель негізді матрицаның құрылымдық тұрақтылығын білдіреді.

Температураның өзгерістері дифрактограммалардағы шыңдардың жалпы сипатын айтарлықтай өзгертпейді, алайда шың пішініндегі шамалы айырмашылықтар кристаллит өлшемдерінің ұлғаюымен және жабында қалыптасқан қалдық кернеулердің азаюымен байланысты. Мұндай өзгерістер фазалық құрамның өзгеруін емес, керісінше, жабын құрылымының реттелуін және тұрақтануын сипаттайды [15].

Алдын ала қыздыру жағдайында Cr_3C_2–NiCr жабындарының фазалық тұрақтылығының сақталуы олардың пайдалану қасиеттері үшін маңызды болып табылады, себебі карбид фазасының сақталуы жабынның жоғары қаттылығын, тозуға және коррозияға төзімділігін қамтамасыз етеді.100 °C және 200 °C температурада алдын ала қыздыру HVOF әдісімен алынған Cr_3C_2–NiCr жабындарының фазалық құрамына теріс әсер етпей, құрылымдық тұрақтылықты қамтамасыз ететінін көрсетеді[14,16].

2-кестеде Cr_3C_2–NiCr жабынының беткі кедір-бұдырлығының үлгіні алдын ала қыздыру температурасына тәуелді өзгерістері көрсетілген. Қыздырылмаған жағдайда жабынның орташа арифметикалық кедір-бұдырлығы (Ra) 3,996 мкм, ал биіктік бойынша параметрі (Rz) 19,176 мкм құрады. Үлгіні 100°C температурада алдын ала қыздырғанда бұл көрсеткіштер төмендеп, Ra (3,247 мкм) және Rz (15,771 мкм) мәндеріне жетті, бұл жабын бетінің салыстырмалы түрде тегіс қалыптасқанын көрсетеді.

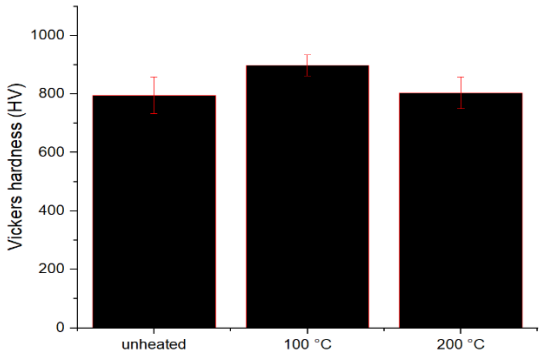
Кесте 2 – (Anytester HY2300) орташа арифметикалық кедір-бұдырлығы

Үлгі	Ra(мкм)	Rz(мкм)
қыздырылмаған	3,9964	19,1756
100 °C	3,2474	15,7712
200 °C	3,7514	18,8422

Температура 200°C-қа дейін арттырылғанда Ra (3,751 мкм) және Rz (18,842 мкм) мәндерінің қайта өсуі байқалады, бұл жабын түзілу процесінде жылулық кернеулердің қайта бөлінуімен және микроструктуралық гетерогенділіктің артуымен байланысты болуы мүмкін.

Алынған нәтижелерге сәйкес, 100 °C температурадағы алдын ала қыздыру Cr_3C_2–NiCr жабындары үшін оңтайлы режим болып табылады, себебі ол беткі қабаттың тегістігін қамтамасыз етіп, микроқатпарлардың азаюына ықпал етеді және жабынның трибологиялық әрі коррозиялық қасиеттерінің жақсаруына қолайлы жағдай жасайды [17].

12Х1МФ тот баспайтын болатының бастапқы микроқаттылығы шамамен 180 HV құрайды. Cr_3C_2–NiCr жабыны қалыптастырылғаннан кейін жабынның микроқаттылығы айтарлықтай артқаны байқалды. Қыздырылмаған үлгіде қаттылық 795,4 HV болса, 100°C температурада алдын ала қыздырылған үлгі үшін жоғары мән 897,8 HV тіркелді. Ал алдын ала қыздыру температурасы 200°C-қа дейін арттырылғанда микроқаттылық 804,1 HV-ға дейін төмендеді (4-сурет).

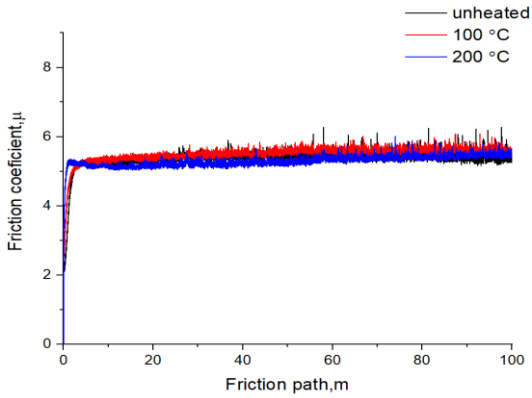


Сурет 4 – Cr_3C_2–NiCr жабыны алынғаннан кейінгі микроқаттылығын салыстыру

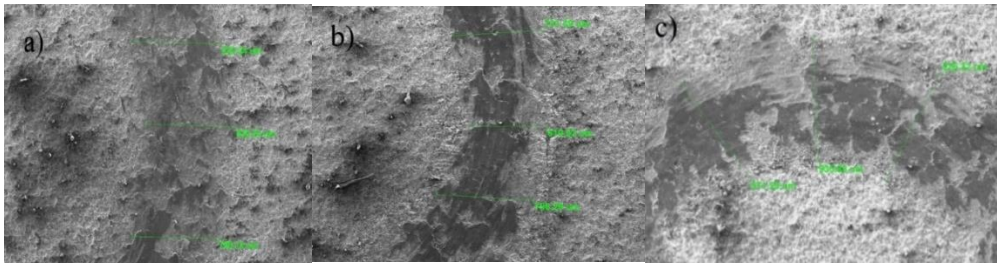
Алынған нәтижелерді түсіндіру үшін жабын түзілу процесінде температураның жоғарылауына байланысты қалдық термиялық кернеулердің қайта бөлінуі және құрылымдық қайта бірігу үрдістері бар болуында [14]. Жалпы алғанда, температуралық режимдердің өзгеруіне қарамастан, барлық жағдайларда Cr_3C_2–NiCr жабындарының қаттылығы бастапқы субстратпен салыстырғанда бірнеше есе жоғары болып қалды. Сонымен қатар, 100 °C температурада алынған жабын үшін беткі кедір-бұдырлықтың төмен мәндері жабын құрылымының салыстырмалы түрде тығыз әрі біркелкі қалыптасқанын көрсетеді. Кеуектіліктің азаюы микроқаттылықтың артуына қолайлы жағдай жасап, жабынның механикалық қасиеттерін жақсартуға ықпал етеді [18]. Бұл Cr_3C_2–NiCr жабындарының жоғары беріктікке және тозуға төзімділікке ие тиімді қорғаныш қабаты болып табылатынын көрсетеді және оларды жоғары температуралық жағдайларда қолдану тұрғысынан жақсартылған материалдар ретінде қарастыруға мүмкіндік береді [19].

Алынған нәтижелерге сәйкес, 100 м дейінгі үйкеліс қашықтығында жүргізілген трибологиялық сынақтар барысында үйкеліс коэффициентінің орташа мәндері алдын ала қыздыру температурасына байланысты белгілі бір айырмашылықтар ғана көрсетеді (5-сурет). Үйкеліс коэффициентінің салыстырмалы түрде төмен мәні 200°C температурада алдын ала қыздырылған үлгі үшін байқалды (μ = 0,529), ал қыздырылмаған және 100 °C үлгілер үшін бұл көрсеткіштер сәйкесінше μ = 0,537 және μ = 0,549 құрады.

Сонымен бірге, тозуға төзімділік көрсеткіштерін талдау барысында ең қолайлы нәтижелер 100 °C температурада алдын ала қыздырылған Cr_3C_2–NiCr жабынына тән екені байқалады. Бұл тұжырым 6-суретте келтірілген тозу морфологиясымен және тозу ізінің геометриялық параметрлерімен үйлеседі. Атап айтқанда, 100 °C үлгі үшін тозу ізінің орташа диаметрі ең төмен мәнге ие болды (d = 712 мкм), ал қыздырылмаған (d = 815 мкм) және 200 °C (d = 924 мкм) үлгілерінде тозу қарқындылығы салыстырмалы түрде жоғарырақ екені анықталды [20-23].



Сурет 5 – Трибологиялық зерттеулердің нәтижелері



Сурет 6 – Үйкеліс жолының бойындағы тозу белгілері мен микро сызаттары

Тозу жолының морфологиясын талдау нәтижелері барлық үлгілерде абразивті тозуға тән микросызаттардың бар екені байқалды. Бұл фазалық құрамның өзгеруімен емес, алдын ала қыздыру кезінде жабын құрылымының тығыздалуы, кеуектіліктің төмендеуі және карбид фазасының NiCr матрицасымен өзара әрекеттесуінің жақсаруы сияқты микроструктуралық факторлармен байланысты болуы мүмкін.

Рентгендік дифракциялық талдау нәтижелері барлық зерттелген температуралық режимдерде Cr_3C_2–NiCr жүйесінің сақталатынын және алдын ала қыздырудың фазалық құрамға айтарлықтай әсер етпейтінін көрсетеді. Осыған байланысты трибологиялық қасиеттердегі байқалған айырмашылықтар жабынның микроструктуралық күйімен және механикалық сипаттамаларымен анықталатынын айтуға болады. Жалпы алғанда, алынған нәтижелер Cr_3C_2–NiCr жабындарының тозуға төзімді механикалық қорғаныш қабаты ретінде қолдануға болатынын көрсетеді.

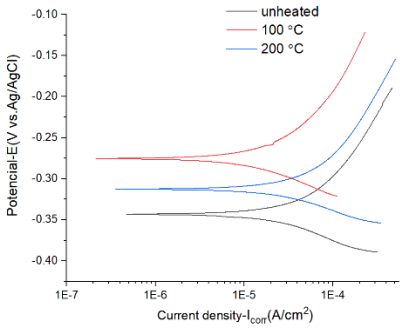
HVOF әдісімен алынған жабындардың жоғары коррозияға төзімділігі олардың төмен кеуектілігімен және тығыз құрылымымен түсіндіріледі [22]. Кеуектер санының азаюы электролиттің жабынның ішкі қабаттарына өтуін шектеп, коррозия қарқындылығын төмендетеді. 3-кесте мәліметтері бойынша, 100°C температурада алдын ала қыздырылған үлгіде коррозиялық ток тығыздығының ең төмен мәні анықталды. Бұл осы режимде қалыптасқан жабынның коррозиялық ортада тұрақтылығы жоғары екенін және оның құрылымы салыстырмалы түрде тығыз болғанын көрсетеді.

Кесте 3 – Үлгілердің коррозиялық сынақ нәтижелері

Үлгі	Коррозия тоғының тығыздығы Iк, мкА/см^2	Еркін коррозия потенциалы Ек, V
0°C	6,5968E-05	-0,34321
100°C	3,3016E-05	-0,27552
200°C	6,7805E-05	-0,3127

Сонымен қатар, беткі кедір-бұдырлықтың Ra мәнінің төмен болуы да жабын бетінің тегіс әрі тығыз қалыптасқан, нәтижесінде коррозиялық орта мен жабын арасындағы жанасу аймағы азайып, коррозия жылдамдығы төмендейді. 7-суретте көрсетілген Тафель қисықтары бұл тәуелділікті көрсетеді. Жабындардың электрохимиялық мінез-құлқы коррозиялық потенциалдың және коррозиялық ток тығыздығының өзгеруімен сипатталады, ал ең қолайлы нәтижелер 100°C температурада алдын ала қыздырылған үлгіде байқалады.

Жоғары жылдамдықты оттекті – отын жалынды бүрку әдісінде ұнтақ беру жылдамдығы мен ұнтақ–негіз арасындағы қашықтық бөлшектердің температурасына және қату кинетикасына әсер етіп, жабынның кеуектілігі мен тығыздығын анықтайды. Қыздырылмаған үлгімен және 200°C температурада алдын ала қыздырылған үлгімен жүргізілген зерттеулер көрсеткендей, жұмыс барысында бүрку қашықтығы 400 мм және ұнтақ беру жылдамдығы 60 г/мин болған жағдайда 200°C-та алдын ала қыздыру кезінде жабынның кеуектілігі салыстырмалы түрде жоғарылап, тығыздығы төмендегені байқалды [24-27].



Сурет 7 – Алынған жабындардың электрохимиялық коррозиясын өлшеу нәтижелерінің диаграммасы

Қортынды

Жүргізілген зерттеу нәтижелері HVOF әдісімен қалыптастырылған Cr_3C_2–NiCr жабындары 12Х1МФ тот баспайтын болатының тозуға және коррозияға төзімділігі артатыны байқалды. СЭМ зерттеулері барлық температуралық режимдерде алынған жабындардың негізбен жақсы байланысқанын және төмен кеуектілікпен сипатталатынын көрсетті. Алдын ала қыздыру үлгілерде жабын құрылымының тығыздығы артып, беткі кедір-бұдырлықтың төмендеуі байқалды. Рентгендік дифракциялық талдау нәтижелері зерттелген температуралық режимдерде Cr_3C_2–NiCr жүйесінің фазалық тұрақтылығы сақталатынын және алдын ала қыздырудың фазалық құрамға теріс әсер етпейтінін растады. Механикалық және трибологиялық сынақтар 100°C температурада алдын ала қыздырылған үлгілердің ең қолайлы қасиеттер жиынтығын көрсететінін анықтады. Бұл жағдайда микроқаттылықтың жоғары мәні (897,8 HV), беткі кедір-бұдырлықтың төмендеуі, тозу ізінің диаметрінің минималды мәні (712 мкм) және коррозиялық ток тығыздығының төмендеуі тіркелді.

Жалпы алғанда, алынған нәтижелер HVOF әдісімен алынған Cr_3C_2–NiCr жабындарының жоғары температуралы және агрессивті ортада жұмыс істейтін 12Х1МФ тот баспайтын болаттан жасалған қазандық құбырлары үшін тозуға және коррозияға төзімді тиімді қорғаныш қабаты ретінде қолдануға болатынын көрсетеді.

Әдебиеттер тізімі

1. Erosive wear caused by large solid particles carried by a flowing liquid: A comprehensive review / C. Kang et al // Processes. – 2024. – № 12(6). – P. 1150.
2. Ibrahim A.O. Boiler Water Chemistry: A Critical Mechanism for Boiler Tube Failure / A.O. Ibrahim, O.O. Ighodaro, M.A. Waheed // Journal of Energy Technology and Environment. – 2025. – № 7(1). – P. 128-133.
3. Slagging characteristics of a steam boiler furnace with flare combustion of solid fuel when switching to composite slurry fuel / D. Glushkov et al // Applied Sciences. – 2022. – № 13(1). – P. 434.
4. Li B. CFD investigation of slagging on a super-heater tube in a kraft recovery boiler / B. Li, A. Brink, M. Hupa //Fuel processing technology. – 2013. – № 105. – P. 149-153.
5. Sidhu T.S. State of the art of HVOF coating investigations – A review / T.S. Sidhu, S. Prakash, R.D. Agrawal // Marine Technology Society Journal. – 2005. – № 39(2). – P. 53-64.
6. Poirier D. Engineering HVOF-sprayed Cr3C2-NiCr coatings: the effect of particle morphology and spraying parameters on the microstructure, properties, and high temperature wear performance / D. Poirier, J.G. Legoux, R.S. Lima // Journal of thermal spray technology. – 2013. – № 22(2). – P. 280-289.
7. Mechanical properties optimization of Cr3C2-NiCr coatings produced by compact plasma spray process / F. Rubino et al // Surface and Coatings Technology, 2023. – № 465. – P. 129570.

8. Review of Physical and Mechanical Properties, Morphology, and Phase Structure in Cr3C2-NiCr Composite Coatings Sprayed by HVOF Method / B. Seitov et al // Coatings. – 2025. – № 15(4). – P. 479.
9. GOST 20072-74. Stal' teploustojchivaya. Tehnicheskie usloviya. – Vved. 01.01.1976. – M.: Izd-vo standartov, 1976. – 12 s. (In Russian).
10. The bonding formation during thermal spraying of ceramic coatings: a review / C.J. Li et al // Journal of Thermal Spray Technology. – 2022. – № 31(4). – P. 780-817.
11. Study of compressed air pressure on the properties of coatings obtained by supersonic metallization / B. Rakhadilov et al // Journal of Theoretical and Applied Physics. – 2024. – № 18(6).
12. An influence of oxygen flow rate and spray distance on the porosity of HVOF coating and its effects on corrosion – a review / A. Raza et al // Materials. – 2022. – № 15(18). – P. 6329.
13. Ogunmola O. Microstructure, Mechanical, and Tribological Evaluation of Carbide-Based Wear-Resistant Coatings for Aerospace Applications (Doctoral dissertation, Concordia University). – 2024.
14. Influence of Vacuum Heat Treatment on the Residual Stress of Thermal Spray Cermet Coatings / R. Ahmed et al // In World Congress on Engineering. – 2007. – P. 1181-1186.
15. Ksiazek M. Microstructure, Tribological, and Corrosion Behaviour of HVOF-Sprayed (Cr_3C_2-NiCr+ Ni) Coatings on Ductile Cast Iron / M. Ksiazek, L. Boron. – 2025.
16. Influence of thickness and surface roughness on impact wear and impact lifetime of HVOF-sprayed coatings / J. Daniel et al // Surface and Coatings Technology. – 2024. – № 488. – P. 131058.
17. The influence of heat treatment on tribological and mechanical properties of HVOF sprayed CrC–NiCr coatings / J.A. Picas et al // Microstructure and selected properties of Cr3C2–NiCr coatings obtained by HVOF on magnesium alloy substrates. Materials. – 2020. – № 13(12). – P. 2775.
18. Thermal stability of nanostructured Cr3C2-NiCr coatings / J. He et al // Journal of thermal spray technology. – 2001. – № 10(2). – P. 293-300.
19. Effect of stoichiometry conditions on the erosion and sliding wear behaviors of Cr3C2-NiCr coatings deposited by a novel ethanol-fueled HVOF process / S. Liu et al // Surface and Coatings Technology. – 2023. – № 454. – P. 129084.
20. Impact wear performances of Cr3C2 NiCr coatings by plasma and HVOF spraying / X.M. Li et al // Wear. – 1997. – № 202(2). – P. 208-214.
21. Effect of Structure Density of Milled Powder on Hot Corrosion and Erosion Resistance of HVOF-Sprayed Cr3C2-NiCr Coating / S. Ramandhany et al // Journal of Thermal Spray Technology. – 2024. – № 33(4). – P. 1075-1099.
22. Influences of sand concentration and flow velocity on hydro-abrasive erosion behaviors of HVOF sprayed Cr3C2–NiCr and WC–Cr3C2–Ni coatings / S. Hong et al // Journal of Materials Research and Technology. – 2022. – № 21. – P. 1507-1518.
23. Jia L. Design and analysis of a low-temperature oxygen-fuel spray system / L. Jia. – 2007.
24. Jackson K.A. Kinetics of solidification / K.A. Jackson, B. Chalmers //Canadian Journal of Physics. – 1956. – № 34(5). – P. 473-490.
25. The effect of HVOF spray distance on solid particle erosion resistance of WC-based cermets bonded by Co, Co-Cr and Ni deposited on mg-alloy substrate / E. Jonda et al // Advances in Science and Technology. Research Journal. – 2024. – № 18(2).
26. Identifying the optimal HVOF spray parameters to attain minimum porosity and maximum hardness in iron based amorphous metallic coatings / S. Vignesh et al // Defence technology. – 2017. – № 13(2). – P. 101-110.

Қаржыландыру

Бұл зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті тарапынан қаржыландырылды (грант № BR24992870).

Д.А. Әскержанов[1,2*], Р.К. Кусаинов[1,2], А.Ж. Жасұлан[1,2], К.Д. Орманбеков[1], А.Б. Шынарбек[1]
[1]Шәкәрім университет, Инжиниринговый центр,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А
[2]Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А
*e-mail: dumanaskerzhanov541@gmail.com

СТРУКТУРНЫЕ, ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ И КОРРОЗИОННЫЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ CR_3C_2–NICR, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ HVOF

Данное исследование направлено на повышение срока службы котельных труб из стали 12Х1МФ, применяемых на тепловых электростанциях. Покрытия Cr_3C_2–NiCr были получены методом высокоскоростного кислородно-топливного напыления (HVOF), после чего изучены их структурно-фазовые, механические, трибологические и коррозионные свойства. Установлено, что предварительный нагрев образцов при различных температурах (без нагрева, 100°C и 200°C) оказывает существенное влияние на морфологию, пористость и механические характеристики покрытий. Результаты СЭМ-анализа показали низкую пористость покрытий, тогда как данные рентгеноструктурного анализа подтвердили стабильность фазы Cr_3C_2 и способность матрицы NiCr эффективно удерживать карбидные частицы. Это препятствует разрушению покрытия и обеспечивает фазовую стабильность при повышенных температурах. Наилучшие результаты были получены для покрытий, сформированных при температуре предварительного нагрева 100°C: твердость увеличилась до 897,8 HV, снизилась шероховатость поверхности, стабилизировался коэффициент трения, а диаметр износового следа достиг минимального значения (712 мкм). Кроме того, отмечено снижение скорости коррозии. В целом полученные результаты свидетельствуют о высокой эффективности покрытий Cr_3C_2–NiCr в качестве защитного слоя с повышенной прочностью, износо- и коррозионной стойкостью, что делает их перспективными для применения в высокотемпературных агрессивных средах.

Ключевые слова: *высокоскоростное кислородно-топливное напыление (HVOF), сталь 12Х1МФ, коррозия, трибология, шероховатость поверхности, твердость.*

D.A. Askerzhanov[1,2*], R.K. Kussainov[1,2], A.Zh. Zhassulan[1,2], K.D. Ormanbekov[1], A.B. Shynarbek[1]

[1]Shakarim University, Engineering Center,
071412, Republic of Kazakhstan, Semey, 20A Glinka St.
[2]Shakarim University,
071412, Republic of Kazakhstan, Semey, 20A Glinka St.
*e-mail: dumanaskerzhanov541@gmail.com

STRUCTURAL, TRIBOLOGICAL, AND CORROSION PROPERTIES OF CR_3C_2–NICR COATINGS DEPOSITED BY THE HVOF METHOD

This study is aimed at extending the service life of 12Kh1MF steel boiler tubes used in thermal power plants. Cr_3C_2–NiCr coatings were deposited by the high-velocity oxygen–fuel (HVOF) spraying method, and their structural–phase, mechanical, tribological, and corrosion properties were investigated. It was found that preheating the substrates at different temperatures (without preheating, 100 °C, and 200 °C) significantly affects the coating morphology, porosity, and mechanical characteristics. SEM analysis revealed that the coatings exhibit low porosity, while XRD results confirmed the stability of the Cr_3C_2 phase and the ability of the NiCr matrix to effectively bind the carbide particles. This prevents coating spallation and ensures phase stability at elevated temperatures. The coatings obtained at a preheating temperature of 100 °C demonstrated the best overall performance: hardness increased up to 897.8 HV, surface roughness decreased, the coefficient of friction stabilized, and the wear track diameter reached its minimum value (712 μm). In addition, a reduced corrosion rate was observed. Overall, the results demonstrate that Cr_3C_2–NiCr coatings are effective protective layers with high strength, wear resistance, and corrosion resistance, making them suitable for application in high-temperature aggressive environments.

Key words: *high-velocity oxygen–fuel (HVOF) spraying, 12Kh1MF steel, corrosion, tribology, surface roughness, hardness.*

Авторлар туралы мәліметтер

Думан Аңсағанұлы Әскержанов* – «Техникалық физика» мамандығының магистранты, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы, Инжиниринг орталықтың ғылыми қызметкері; e-mail: dumanaskerzhanov541@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-3706-4087.

Ринат Кенжеевич Кусаинов –Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы, Инжиниринг орталықтың жетекшісі; e-mail: rinat.k.kus@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5166-4761.

Айнұр Жасұланқызы Жасұлан – «Техникалық физика» мамандығының докторанты, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы, Инжиниринг орталықтың аға ғылыми қызметкері; e-mail: ainur.99.99.99@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-5887-0135.

Куаныш Даулетович Орманбеков – «Технологиялық машиналар мен жабдықтар» мамандығының докторанты, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы, Инжиниринг орталықтың «Материалдар бетін өңдеудің плазмалық технологиялары» зертханасының меңгерушісі; e-mail: kuanysh.dauletson@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6099-2812.

Айбек Бақытжанұлы Шынарбек – «Технологиялық машиналар мен жабдықтар» мамандығының докторанты, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы, Инжиниринг орталықтың «Материалтану және материалдар беттерін модификациялаудың электролиттік-плазмалық технологиялары» зертханасының меңгерушісі; e-mail: shinarbekov16@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-2877-5178.

Сведения об авторах

Думан Ансаганулы Әскержанов* – магистрант по специальности «Техническая физика», Шәкәрім университет, Республика Казахстан, научный сотрудник Инжинирингового центра; e-mail: dumanaskerzhanov541@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-3706-4087.

Ринат Кенжеевич Кусаинов – Шәкәрім университет, Республика Казахстан, руководитель Инжинирингового центра; e-mail: rinat.k.kus@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5166-4761.

Айнур Жасуланкызы Жасулан – докторант по специальности «Техническая физика», Шәкәрім университет, Республика Казахстан, старший научный сотрудник Инжинирингового центра; e-mail: ainur.99.99.99@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-5887-0135.

Куаныш Даулетович Орманбеков – докторант по специальности «Технологические машины и оборудование», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; заведующий лабораторией «Плазменные технологии обработки поверхности материалов» Инжинирингового центра; e-mail: kuanysh.dauletson@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6099-2812.

Айбек Бакытжанулы Шынарбек – докторант по специальности «Технологические машины и оборудование», Шәкәрім университет, Республика Казахстан, заведующий лабораторией «Электролитно-плазменные технологии модификации поверхности материалов и материаловедения» Инжинирингового центра; e-mail: shinarbekov16@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-2877-5178.

Information about the Authors

Duman Ansaganuly Askerzhanov* – Master's student in Technical Physics, Shakarim University, Republic of Kazakhstan, Research Fellow at the Engineering Center; e-mail: dumanaskerzhanov541@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-3706-4087.

Rinat Kenzheevich Kusainov – Shakarim University, Republic of Kazakhstan; Head of the Engineering Center; e-mail: rinat.k.kus@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5166-4761.

Ainur Zhassulankyzy Zhassulan – PhD student in Technical Physics, Shakarim University, Republic of Kazakhstan, Senior Research Fellow at the Engineering Center; e-mail: ainur.99.99.99@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-5887-0135.

Kuanysh Dauletovich Ormanbekov – PhD student in Technological Machines and Equipment, Shakarim University, Republic of Kazakhstan, Head of the Plasma Technologies for Materials Surface Treatment Laboratory at the Engineering Center; e-mail: kuanysh.dauletson@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6099-2812.

Aibek Bakytzhanuly Shynarbek – PhD student in Technological Machines and Equipment, Shakarim University, Republic of Kazakhstan; Head of the Electrolytic – Plasma Technologies for Materials Surface Modification and Materials Science Laboratory at the Engineering Center; e-mail: shinarbekov16@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-2877-5178.

Редакцияға енуі 05.01.2026
Өңдеуден кейін түсуі 11.03.2026
Жариялауға қабылданды 12.03.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-64

МРНТИ: 44.31.31

CC BY 4.0
Check for updates

Н.Т. Рустамов[1], О.Д. Меирбекова[1]*, Н.Б. Мухамеджанов[1], А.Н. Бергузинов[2]
[1]Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмеда Ясави,
160400, Республика Казахстан г. Туркестан, ул. Б.Саттарханова 29
[2]Торайгыров университет,
140000, Республика Казахстан г. Павлодар, ул. Ломова, 64
*e-mail: oksana_120183@mail.ru

ЛОКАЛЬНАЯ ФРАКТАЛЬНАЯ СОЛНЕЧНАЯ ТЕПЛОВАЯ СТАНЦИЯ

Аннотация: *В данной работе предлагается новый тип фрактальной солнечной тепловой станции (ФСТС), основанной на использовании фрактального солнечного коллектора с модульной архитектурой. Разрабатываемая ФСТС ориентирована на обеспечение локальных потребителей тепловой энергией в автономных и удалённых районах, а также для объектов с ограниченной площадью размещения. Особенностью конструкции является применение фрактальных*

©Н.Т. Рустамов, О.Д. Меирбекова, Н.Б. Мухамеджанов, А.Н. Бергузинов, 2026

абсорберов, конфигурация которых позволяет не только эффективно поглощать прямую солнечную радиацию, но и использовать отражённые солнечные лучи для дополнительной выработки электрической энергии. Для этого на тыльной стороне абсорберов размещаются фотоэлектрические элементы, преобразующие отражённое излучение в электричество.

Отмечается, что комбинированное использование фрактального коллектора для одновременной генерации тепловой и электрической энергии повышает общую эффективность использования солнечной инсоляции и способствует увеличению энергетической плотности установки. В статье проводится оценка коэффициента полезного действия ФСТС, рассматриваются энергетические потери, особенности теплового баланса и факторы, влияющие на эффективность преобразования энергии. Дополнительно перечисляются ключевые преимущества предлагаемой конструкции, такие как гибкость в установке, повышенная надежность и возможность масштабирования, а также указываются потенциальные недостатки, связанные с конструктивной сложностью и необходимостью точного расчёта геометрии фрактальных элементов.

Ключевые слова. *Солнечная тепловая станция, фрактальный солнечный коллектор, тепловая и электрическая энергия, абсорбер, апертурная площадь.*

Введение. Современные солнечные энергетические системы стремятся к повышению эффективности путём одновременного использования фотоэлектрической и тепловой составляющих солнечного излучения. Традиционные концентрирующие системы (CSP) обеспечивают получение высоких температур в фокусе, однако значительная часть солнечной энергии остаётся неиспользованной из-за расфокусировки, рассеяния и оптических потерь.

Солнечная тепловая технология, в отличие от фотоэлектрических систем, является крупномасштабной. Одним из важных отличий солнечных тепловых электростанций от фотоэлектрических является то, что они генерируют электроэнергию косвенно. Такие станции работают следующим образом: тепло солнечных лучей собирается и используется для нагрева рабочей жидкости. Образующийся пар приводит в действие турбогенератор, который вырабатывает электроэнергию [1].

Солнечные тепловые электростанции представляют собой активные системы. Несмотря на разнообразие конструкций, у них есть несколько общих элементов: зеркала отражают и концентрируют солнечный свет, а приёмники собирают сконцентрированную солнечную энергию и преобразуют её в тепловую. Далее тепловая энергия используется генератором для производства электрической энергии.

Существует три основных типа концентрирующих солнечных тепловых электростанций (рис. 1):

- линейные концентрирующие системы, включающие параболические желоба и линейные отражатели Френеля;
- солнечные башенные электростанции;
- системы солнечных антенн/двигателей.

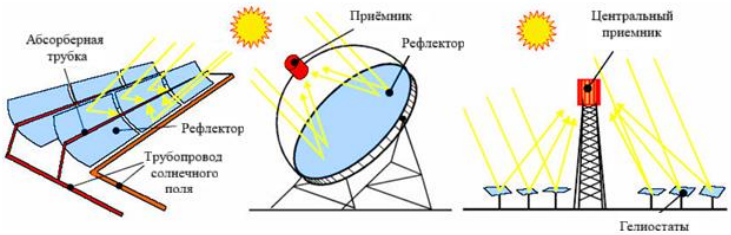


Рисунок 1 – Типы солнечных тепловых станции

Преобразование солнечной энергии можно разделить на два типа: преобразование в тепловую или электрическую энергию. В зависимости от этого различаются и установки, осуществляющие данное преобразование: для первого типа используются солнечные коллекторы, для второго – солнечные батареи. Кроме того, можно выделить ещё и солнечные тепловые электростанции, которые могут рассматриваться как промежуточное звено между двумя типами преобразований.

Солнечные коллекторы представляют собой устройства, преобразующие энергию Солнца в тепло. Система солнечного коллектора состоит из следующих элементов:

коллектор, контур теплообмена и тепловой аккумулятор (бак с жидкостью). Принцип работы прост: циркулирующая жидкость (вода или антифриз) нагревается в солнечном коллекторе, передаёт энергию аккумуляционному баку, где нагретая вода накапливается и хранится до момента использования. Существует три основных вида солнечных коллекторов [2]:

Плоский коллектор – плоская герметичная конструкция, содержащая абсорбирующий слой; в качестве теплоносителя (поступающего по трубкам, соединённым с абсорбирующим слоем) используется пропилен-гликоль; сверху коллектор закрыт стеклом. Данная установка является наиболее простой, а её принцип работы полностью соответствует базовой схеме, указанной выше.

Вакуумный коллектор – состоит из нескольких стеклянных полых трубок, внутри которых расположены более тонкие трубки с теплопоглощающим элементом. В качестве теплоизоляции используется вакуум между трубками. Принцип работы следующий: поглотитель энергии (например, эфир) нагревается, испаряется и передаёт тепло теплообменнику, нагревающему теплоноситель, который затем поступает в бак-аккумулятор [3].

Воздушный коллектор – устройство, в котором воздух контактирует с нагревательным элементом и подаётся для обогрева помещения. Применяется редко, так как воздух менее эффективно проводит тепло по сравнению с жидкостями. Тем не менее, у него есть преимущество: при низких температурах отсутствует проблема замерзания теплоносителя [4].

Сравнивая данные типы солнечных коллекторов, можно отметить, что плоские коллекторы являются наиболее популярными благодаря своей прочности и в ряде случаев более высокой эффективности. Вакуумные коллекторы обладают более хрупкой конструкцией и меньшим сроком службы (обычно 10-15 лет, тогда как у плоских – 15-30 лет), однако имеют важное достоинство: при повреждении заменяется только отдельная трубка, а не весь коллектор. Кроме того, вакуумные коллекторы дольше сохраняют тепло в условиях низких температур.

В настоящее время наблюдается рост интереса к гибридным системам (ГС), фрактальным абсорберам и биоинспирированным конфигурациям распределения элементов на солнечных коллекторах. Особое внимание привлекают фрактальные структуры (включая спираль Фибоначчи), которые позволяют равномерно распределять поток энергии и улучшать тепловой съём по всей поверхности концентратора [5].

Цель работы: Разработка солнечной тепловой станции, работающей на базе фрактального солнечного коллектора, и оценка её коэффициента полезного действия.

Методы исследования. Когда говорят о солнечной тепловой станции, обычно подразумевают систему, которая не просто преобразует солнечную инсоляцию в электричество напрямую, а концентрирует солнечное излучение, нагревает теплоноситель и далее использует полученное тепло. В солнечных тепловых электростанциях (иногда – «концентрирующие солнечные установки», КСУ) применяются зеркала или линзы, фокусирующие солнечный свет на приёмник. В приёмнике нагревается теплоноситель (жидкость, расплавленные соли и др.). Затем теплоноситель передаёт свою энергию для получения пара, который приводит в действие паровую турбину и генератор, производящий электроэнергию [6].

Некоторые станции оснащаются системами хранения тепловой энергии – например, резервуарами с расплавленными солями, которые сохраняют тепло и позволяют вырабатывать электроэнергию даже ночью или при пасмурной погоде [7]. Таким образом, «солнечная тепловая станция» – это не фотоэлектрические панели (PV), а промышленная установка, использующая концентрированное солнечное тепло.

Среди технологий солнечных тепловых станций выделяют следующие основные подходы (рис. 1):

Параболические ряды (линейные концентраторы) – длинные параболические зеркала, фокусирующие свет на трубках с теплоносителем.

Башенные станции (solar power tower) – множество гелиостатов, направляющих солнечный свет на приёмник в верхней части башни, что позволяет достигать очень высоких температур.

Системы типа «dish/Stirling» – зеркала, имеющие форму тарелки, концентрирующие свет на небольшом приёмнике или двигателе; такие установки обычно имеют меньшую мощность.

Выбор технологии зависит от цели применения: производство электричества, комбинированное теплоснабжение, горячее водоснабжение, наличие систем хранения тепла и др.

Солнечные тепловые станции обладают рядом преимуществ:

– возможность производить электроэнергию и/или тепло;

– наличие систем хранения тепла обеспечивает работу вне солнечного дня (вечером, ночью, при облачности);

– экологичность: отсутствие сжигания топлива и минимальные выбросы CO_2;

– снижение затрат на отопление, горячую воду и производство энергии.

Солнечная энергия является одним из самых чистых и доступных источников энергии на планете. Локальные солнечные тепловые электростанции (СЭС) позволяют использовать эту энергию для получения электричества и тепла прямо на месте – в домах, небольших предприятиях и удалённых регионах. Такие установки компактны, просты в эксплуатации и способны существенно снизить энергозатраты. Для удалённых районов они незаменимы [8].

В основе локальной солнечной тепловой станции лежит нагрев рабочей жидкости солнечной энергией с последующим использованием тепла для выработки электричества или отопления/ГВС. На рис. 2 показана предлагаемая нами локальная солнечная тепловая станция, работающая на базе фрактального солнечного коллектора.

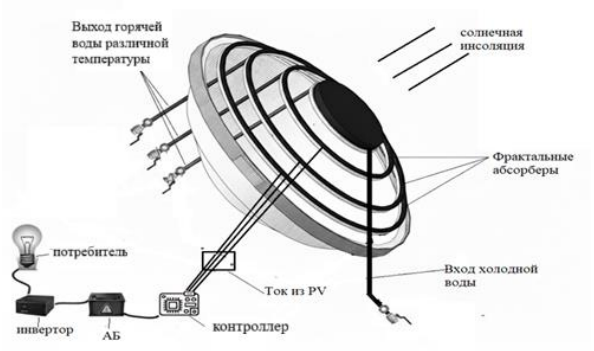


Рисунок 2 – Фрактальный солнечный коллектор

Фрактальный солнечный коллектор представляет собой концентрирующую солнечную тепловую станцию, в которой на фокусе параболического концентратора располагается металлическая цилиндрическая чашка (тепловой приёмник) [9]. Через чашку непрерывно протекает холодная вода, нагреваясь до высокой температуры, благодаря чему получается горячая вода. На обратной стороне чашки закреплены фотоэлектрические панели (PV), которые охлаждаются проточной холодной водой. В результате они:

– не перегреваются;

– работают в оптимальном температурном режиме;

– демонстрируют повышенный КПД по сравнению с обычными PV-панелями.

Таким образом, вода в чаше одновременно выполняет две функции: теплового теплоносителя и охладителя для фотоэлектрических панелей. Это является ключевой особенностью предложенной системы. В классических гибридных терминалах PV/T подобный принцип используется целенаправленно, однако здесь он реализован в концентрирующей конфигурации, что делает решение уникальным.

Описание конструкции. На рис. 3 изображена ФСТС. Станция включает следующие элементы: 1 – параболический концентратор; 2 – первый фрактальный абсорбер, расположенный в фокусе концентратора; 3 – фотоэлектрическая панель, расположенная с нижней стороны первого абсорбера; 4 – тороидальные абсорберы, расположенные вокруг абсорбера 2 по принципу чисел Фибоначчи в апертурной зоне концентратора; 5 – полимерные фотоэлектрические панели, закреплённые на нижней стороне каждого тороидального абсорбера; 6 – система наведения параболического концентратора на движение Солнца; 7 – теплораспределитель; 8 –теплообменник; 9 – бойлер; 10 – кран подачи холодной воды; 11 –

кран для потребителя тепловой энергии; 12 – контроллер; 13 – аккумулятор; 14 – инвертор; 15 – потребитель электрической энергии [10].

Принцип работы ФСТС. Предложенная ФСТС функционирует следующим образом.

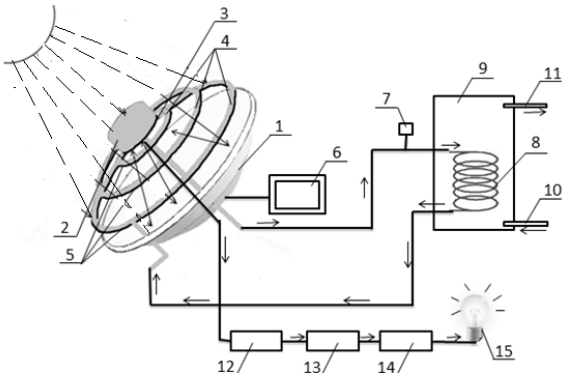


Рисунок 3 – Фрактальная солнечная тепловая станция

Солнечные лучи, отражённые и сфокусированные параболическим концентратором 1, попадают на первый фрактальный абсорбер 2, обшитый с нижней стороны фотоэлектрической панелью 3. Абсорбер нагревает теплоноситель, протекающий внутри него.

Затем лучи попадают на тороидальные абсорберы 4, также обшитые с нижней стороны полимерными фотоэлектрическими панелями 5, где дополнительно нагревают теплоноситель.

Отражённая часть солнечных лучей от апертурной поверхности концентратора 1 падает на полимерные фотоэлектрические панели 5, расположенные на обратной стороне тороидальных абсорберов 4, а также на панели 3 первого абсорбера 2, в результате чего вырабатывается электрический ток.

Электрический ток через контроллер 12 поступает в аккумулятор 13, а затем через инвертор 14 передаётся потребителю электрической энергии 15.

При этом теплоносители в абсорбере 2 и в каждом тороидальном абсорбере 4 имеют различные температуры, поэтому распределение тепла осуществляется теплораспределителем 7.

Холодная вода через кран 10 поступает в бойлер 9. Нагретая вода из первого фрактального абсорбера 2 поступает в теплообменник, а далее через кран 11 – к потребителю тепловой энергии.

Наведение параболического концентратора на Солнце осуществляется системой 6 [11;12].

Результаты исследований. Чтобы КПД иметь смысл, его нужно разделить на тепловой КПД, электрический КПД и общий когенерационный КПД. Для оценки я использую стандартные значения:

Характеристические данные ФСТС:

– Отражательная способность зеркал (ρ) = 0.88

– Коэффициент оптических потерь ($К_{оп}$) = 0.85

– КПД абсорберов (η_{abs}) = 0.70 для тороидального (хороший показатель)

– КПД PV-панелей на тыльной стороне = 12-15% (при рассеянном + отражённом свете)

– Процент солнечного потока, попадающий на PV после отражений = 18-22%

– Средняя температура теплоносителя ~ 250-350°C

– Интегральная солнечная плотность = 1000 Вт/м²

Теперь оценим КПД гелиоустановки.

Расчет теплового КПД ($\eta_{ФСТС}$)

Тепловая эффективность определяется эффективностью оптической системы и способностью абсорбера поглощать тепло.

Формула расчета:

$$\eta_{ФСТС} = \rho \cdot \tau_{опт} \cdot \eta_{абс}$$

Подстановка значений:

$$\eta_{\text{ФСТС}} = 0.88 \cdot 0.85 \cdot 070$$

Результат:

$$\eta_{\text{ФСТС}} \approx 0.5236$$

Обсуждение научных результатов. Таким образом тепловой КПД составляет примерно 52+54%. Это высокий показатель для малых станций (на крупных промышленных СТС он обычно составляет 45-60%).

Расчет электрического КПД (η_{PV})

Электрическая часть работает за счет потока, который не попал в фокус или был переотражен на тыльную сторону (гибридная система).

Определяем поток излучения, попадающего на панели (I_{PV})

$$I_{PV} = 0.20 \cdot I_{\text{солн}}$$

$$I_{PV} \approx 0.20 \cdot 1000 = 200\text{Вт}/m^2$$

Определяем итогового электрического вклада от полной апертуры $PV_{\text{общ}}$ Учитываем КПД самих панелей при данном потоке:

$$\eta_{PV} = 0.20 \cdot 0.14$$

Результат:

$$\eta_{PV} = 0.028$$

Электрический КПД составляет 2.8-3.2% от полной апертуры системы. Несмотря на малое значение, это выгодно, так как электричество является более ценным видом энергии, чем тепло.

Общий когенерационный КПД ($\eta_{\text{общ}}$)

Общая эффективность установки складывается из тепловой и электрической составляющих.

Формула:

$$\eta_{\text{общ}} = \eta_{\text{абсорбер}} + \eta_{PV-\text{общ}}$$

Расчет:

$$\eta_{\text{общ}} \approx 0.523 + 0.028 \approx 0.551$$

Предварительный итог: Общий КПД базовой конфигурации составляет ~55%.

Применение фрактальной конструкции в ФСТС позволяет улучшить показатели за счет снижения затенения и более равномерного распределения потока. Факторы улучшения:

- снижение паразитного экранирования,
- стабилизация теплового потока,
- более высокая излучательная равномерность.

Ожидаемый прирост теплового КПД за счет этих факторов составляет 5-8%.

Таким образом итоговая оценка с учетом фрактальности:

$$\eta_{\text{общ}} \approx 58\% - 60\%$$

Заключение. Локальные солнечные тепловые электростанции (ССТ) – это реальный и эффективный способ использования возобновляемой энергии непосредственно на месте потребления. Они объединяют экологичность, автономность и экономию ресурсов, позволяя преобразовывать солнечный свет в тепло и электричество даже на небольших объектах.

Развитие технологий способствует повышению их эффективности и доступности, что делает солнечное тепло важной частью энергетики будущего. Разработанная фрактальная солнечная тепловая станция (ФСТС) демонстрирует уровень эффективности, сопоставимый с современными малыми СТС, оснащёнными качественной оптикой.

Концентраторные источники солнечной энергии, объединяющие тепловые коллекторы и фотоэлектрические модули в единую систему, обладают значительным потенциалом и могут занять существенную долю на рынке альтернативной энергетики. В Казахстане такие системы имеют особую значимость, поскольку отечественные отрасли энергетики пока не производят готовые фотоэлектрические системы прямого применения. Большинство реализуемых на рынке солнечных преобразователей импортировано либо полностью, либо по отдельным компонентам.

Предлагаемая в данной работе ФСТС обеспечивает выработку тепла и электричества на основе оригинальной конструкции когенеративного фрактального коллектора. По сравнению с традиционными стационарными плоскими коллекторами её производство требует значительно меньших затрат на единицу пиковой мощности. Кроме того, с

экологической точки зрения производство и эксплуатация ФСТС более безопасны, оказывая меньшее воздействие на окружающую среду.

Концепция ФСТС, предложенная в данной работе, объединяет несколько современных направлений: фронтальная фокусирующая чаша, фрактальные абсорберы, расположенные по спирали Фибоначчи на апертуре, и охлаждаемые PV-элементы на обратной стороне абсорберов. Такой подход позволяет одновременно получать тепловую и электрическую энергию с высокой эффективностью, оптимизировать тепловое распределение и минимизировать перегрев фотоэлектрических модулей.

В целом, предложенная ФСТС демонстрирует высокий потенциал для локальных объектов, сочетая инновационную конструкцию, экономическую целесообразность и экологическую безопасность, что делает её перспективной для широкого внедрения в альтернативной энергетике Казахстана и других стран с высокой солнечной инсоляцией.

Список литературы

1. Калинин В.Н. Солнечные тепловые электростанции: теория и практика / В.Н. Калинин, С.А. Иванов – М.: Энергоатомиздат, 2018. – 320 с.
2. Мартынов А.П. Фрактальные структуры в солнечных коллекторах и их эффективность / А.П. Мартынов, И.В. Петров // Вестник альтернативной энергетики. – 2020. – № 4. – С. 45-53.
3. Duffie J.A. Solar Engineering of Thermal Processes / J.A. Duffie, W.A. Beckman – 4th ed. – Hoboken: Wiley, 2013. – 980 p.
4. Zhang L. Hybrid PV/T solar collectors: Performance analysis and design optimization / L. Zhang, Q. Li, X. Wang // Renewable Energy. – 2019. – Vol. 133. – P. 1200-1215.
5. Ткачёв А.А. Солнечные гибридные энергетические системы: тепловые и электрические аспекты / А.А. Ткачев // Энергетическая эффективность. – 2021. – Т. 12, № 2. – С. 15-28.
6. Soteris A. Kalogirou. Solar Energy Engineering: Processes and Systems / A. Soteris – 2nd ed. – Academic Press, 2014. – 752 p.
7. Меирбекова О.Д. К вопросу создания гибридных энергетических систем / О.Д. Меирбекова, Н.Т. Рустамов // Проблемы информатики и энергетики, Ташкент, 2022. – № 3. – С. 83.-90.
8. An Improved Hybrid Wind Power Plant for Small Power Generation / N. Rustamov et al // International journal of renewable energy research. – 2023. – Vol.13, № 2. – P. 629-635.
9. Thermal and energy characteristics of a cogenerative fractal solar collector / N.T. Rustamov et al European Journal of Technical and Natural Sciences. – 2024. – № 1. – P. 3-10.
10. Energetic optimization of a solar photovoltaic thermal (PV/T) air collector / F. Sarhaddi et al // Int. Jour. Energy Res. – 2010. – P. 343-34.
11. Performance evaluation of solar photovoltic/thermal systems / B.J. Huang et al // Solar Energy. – 2001. – V. 70. – P. 443-448.
12. Duffie J.A. Solar Engineering of Thermal Processes / J.A. Duffie, W.A. Beckman. – 4th ed. – Hoboken: Wiley, 2013. – 980 p.

References

1. Kalinin V.N. Solnechnye teplovye ehlektrostantsii: teoriya i praktika / V.N. Kalinin, S.A. Ivanov – M.: Ehnergoatomizdat, 2018. – 320 s. (In Russian).
2. Martynov A.P. Fraktal'nye struktury v solnechnykh kollektorakh i ikh ehffektivnost' / A.P. Martynov, I.V. Petrov // Vestnik al'ternativnoi ehnergetiki. – 2020. – № 4. – S. 45-53. (In Russian).
3. Duffie J.A. Solar Engineering of Thermal Processes / J.A. Duffie, W.A. Beckman – 4th ed. – Hoboken: Wiley, 2013. – 980 p. (In English).
4. Zhang L. Hybrid PV/T solar collectors: Performance analysis and design optimization / L. Zhang, Q. Li, X. Wang // Renewable Energy. – 2019. – Vol. 133. – P. 1200-1215. (In English).
5. Tkachev A.A. Solnechnye gibridnye ehnergeticheskie sistemy: teplovye i ehlektricheskie aspekty / A.A. Tkachev // Ehnergeticheskaya ehffektivnost'. – 2021. – T. 12, № 2. – S. 15-28. (In Russian).
6. Soteris A. Kalogirou. Solar Energy Engineering: Processes and Systems / A. Soteris – 2nd ed. – Academic Press, 2014. – 752 p. (In English).
7. Meirbekova O.D. K voprosu sozdaniya gibridnykh ehnergeticheskikh sistem / O.D. Meirbekova, N.T. Rustamov // Problemy informatiki i ehnergetiki, Tashkent, 2022. – № 3. – S. 83.-90. (In Russian).
8. An Improved Hybrid Wind Power Plant for Small Power Generation / N. Rustamov et al // International journal of renewable energy research. – 2023. – Vol.13, № 2. – R. 629-635. (In English).

9. Thermal and energy characteristics of a cogenerative fractal solar collector / N.T. Rustamov et al European Journal of Technical and Natural Sciences. – 2024. – № 1. – R. 3-10. (In English).
10. Energetic optimization of a solar photovoltaic thermal (PV/T) air collector / F. Sarhaddi et al // Int. Jour. Energy Res. – 2010. – P. 343-34. (In English).
11. Performance evaluation of solar photovoltic/thermal systems / B.J. Huang et al // Solar Energy. – 2001. – V. 70. – P. 443-448. (In English).
12. Duffie J.A. Solar Engineering of Thermal Processes / J.A. Duffie, W.A. Beckman. – 4th ed. – Hoboken: Wiley, 2013. – 980 p. (In English).

Н.Т. Рустамов[1], О.Д. Меирбекова[1]*, Н.Б. Мұхамеджанов[1], А.Н. Бергузинов[2]
[1]Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті,
160400,Қазақстан Республикасы Түркістан қ., Б. Саттарханов к, 29
[2]Торайғыров университеті,
140000, Қазақстан Республикасы Павлодар қ, Ломов к, 64
*e-mail: oksana_120183@mail.ru

ЛОКАЛДЫ ФРАКТАЛДЫ КҮН ЖЫЛУ СТАНЦИЯСЫ

Осы жұмыста модульдік архитектураға негізделген жаңа типтегі фракталды күн жылу станциясы (ФЖС) ұсынылады. Дайындалып отырған ФЖС локалды тұтынушыларды жылулық энергиямен қамтамасыз етуге бағытталған, соның ішінде автономды және шалғай аудандарда, сондай-ақ орнату алаңы шектеулі объектілерде қолданылады.

Құрылымның ерекшелігі – фракталды абсорберлерді қолдану, олардың конфигурациясы тек тікелей күн радиациясын тиімді сіңіріп қана қоймай, шағылған күн сәулесін қосымша электр энергиясын өндіру үшін пайдалануға мүмкіндік береді. Осы мақсатта абсорберлердің артқы бетіне фотоэлектрлік элементтер орналастырылған, олар шағылған сәулені электр энергиясына айналдырады.

Фракталды коллекторды жылулық және электр энергиясын бір уақытта өндіру үшін қолдану жалпы күн энергиясын пайдалану тиімділігін арттырып, құрылғының энергетикалық тығыздығын жоғарылатуға ықпал етеді. Мақалада ФЖС-тің пайдалы әсер коэффициенті (КПД) бағаланған, энергетикалық шығындар, жылулық баланс ерекшеліктері және энергияны түрлендіру тиімділігіне әсер ететін факторлар қарастырылған. Сонымен қатар ұсынылған конструкцияның негізгі артықшылықтары – орнатудағы икемділік, сенімділіктің жоғары болуы және масштабтау мүмкіндігі – атап көрсетілген, сондай-ақ фракталды элементтердің геометриясын дәл есептеуді қажет ететін конструктивтік күрделілік сияқты мүмкін болатын кемшіліктер де көрсетілген.

Түйін сөздер: *Күн жылу станциясы, фракталды күн коллекторы, жылулық және электр энергиясы, абсорбер, апертуралық алаң.*

N.T. Rustamov[1], O.D. Meirbekova[1]*, N.B. Mukhamedzhanov[2], A.N. Berguzinov[2]
[1]Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University,
160400, Republic of Kazakhstan, Turkistan, st.Sattarhanov, 29
[2]Toraighyrov University,
140000, Republic of Kazakhstan, Pavlodar, st.Lomov, 64
*e-mail: oksana_120183@mail.ru

LOCAL FRACTAL SOLAR THERMAL POWER STATION

This work proposes a new type of fractal solar thermal power station (FSTS) based on the use of a fractal solar collector with a modular architecture. The developed FSTS is aimed at supplying local consumers with thermal energy in autonomous and remote areas, as well as for facilities with limited installation space.

A key feature of the design is the use of fractal absorbers, whose configuration allows not only efficient absorption of direct solar radiation but also the utilization of reflected sunlight for additional electricity generation. For this purpose, photovoltaic (PV) elements are placed on the rear side of the absorbers, converting the reflected radiation into electricity.

The combined use of a fractal collector for simultaneous generation of thermal and electrical energy increases the overall efficiency of solar insolation utilization and contributes to higher energy density of the installation. The article evaluates the efficiency (coefficient of performance, COP) of the FSTS, examines energy losses, thermal balance characteristics, and factors affecting energy conversion efficiency. Additionally, the key advantages of the proposed design are outlined, including installation flexibility, enhanced reliability, and scalability, as well as potential disadvantages related to structural complexity and the need for precise calculation of the geometry of fractal elements.

Key words: *Solar thermal power station, fractal solar collector, thermal and electrical energy, absorber, aperture area.*

Авторлар туралы ақпарат

Насим Тулегенович Рустамов – техника ғылымдарының докторы, аға оқытушы, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Түркістан қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: nasim52@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6437-6600.

Оксана Даировна Меирбекова* – аға оқытушы, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Түркістан қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: oksana_120183@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0949-1443.

Нурідін Бақтияруλы Мухамеджанов – аға оқытушы, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Түркістан қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: nuridin.mukhamejanov@ayu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-3243-7342.

Асхат Нурланович Бергузинов – PhD, профессор, Торайғыров университеті, Павлодар қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: askhat_berguzinov@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6954-8259.

Сведения об авторах

Насим Тулегенович Рустамов – доктор технических наук, старший преподаватель, Международный казахско-турецкий университет имени Хожди Ахмеда Ясави, г. Туркестан, Республика Казахстан; e-mail: nasim52@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6437-6600.

Оксана Даировна Меирбекова* – старший преподаватель, Международный казахско-турецкий университет имени Хожди Ахмеда Ясави, г. Туркестан, Республика Казахстан; e-mail: oksana_120183@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0949-1443.

Нуридин Бахтиярович Мухамеджанов – старший преподаватель, Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмеда Ясави, г. Туркестан, Республика Казахстан; e-mail: nuridin.mukhamejanov@ayu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-3243-7342.

Асхат Нурланович Бергузинов – PhD, профессор, Торайгыров университет, г. Павлодар, Республика Казахстан; e-mail: askhat_berguzinov@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6954-8259.

Information about the authors

Nassim Rustamov Tulegenovich – Doctor of Technical Sciences, Senior Lecturer, Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University, Turkistan, Republic of Kazakhstan; e-mail: nasim52@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6437-6600.

Oxana Dairovna Meirbekova* – Senior Lecturer, Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University, Turkistan, Republic of Kazakhstan; e-mail: oksana_120183@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0949-1443

Nuridin Baktiyarovich Mukhamejanov – senior lecturer, International Kazakh-Turkish university named after Khoja Ahmed Yasawi, Turkestan, Republic of Kazakhstan; e-mail: nuridin.mukhamejanov@ayu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-3243-7342.

Askhat Nurlanovich Berguzinov – PhD, Professor, Toraighyrov University, Pavlodar, Republic of Kazakhstan; e-mail: askhat_berguzinov@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6954-8259.

Поступила в редакцию 27.01.2026
Принята к публикации 16.03.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-65

МРНТИ: 31.17.15

CC BY 4.0
Check for updates

М. Төлегенқызы[1], Р.А. Нарманова[1], А. Серікқұл[2], Н.М. Мұхиддин[1], Н.О. Аппазов[*]
[1]Қорқыт Ата атындағы Қызылорда университеті,
Қазақстан Республикасы, Қызылорда, Айтеке би көшесі, 29 А
[2]Қарағанды Индустриялық Университеті,
Қазақстан Республикасы, Теміртау, Республика даңғылы, 30
[*]e-mail: nurasar.82@korkyt.kz

КҮРІШ ҚАУЫЗЫНАН АЛЫНҒАН КАЛЬЦИЙ СИЛИКАТЫ: СИНТЕЗ ЖӘНЕ АДСОРБЦИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ

Аңдатпа: *Бұл жұмыста күріш қауызынан кальций силикатының синтезі және оның физика-химиялық, сондай-ақ адсорбциялық қасиеттерін кешенді бағалау ұсынылады. Сорбент күріш қауызы құрамындағы кремнеземді натрий гидроксидімен сілтілі экстракциялау, одан кейін кальций хлоридімен тұндыру арқылы алынды. Ұсынылған тәсіл ауылшаруашылық қалдықтарын ұтымды пайдалануды қамтамасыз етіп, экологиялық жүктемені төмендетеді әрі үнемділікпен ерекшеленеді. Синтез барысында микротолқынды сәулелендіру қолданылып, процесс уақыты едәуір қысқарып, кремнеземді натрий силикаты ерітіндісі түрінде экстракциялау тиімділігі артты. Алынған кальций силикатының құрылымдық және адсорбциялық сипаттамаларын жетілдіру мақсатында материал 300-900°C аралығында термиялық өңдеуден өткізілді. Нәтижелер бойынша оңтайлы қасиеттер 700°C температурада байқалды. Дәл осы жағдайда материал йод бойынша жоғары адсорбциялық белсенділікті (56%) көрсетті және дамыған кеуектілік, қолайлы меншікті бет қасиеттерін күшейтті. Рентгендік дифракциялық талдау, морфологиялық зерттеулер және элементтік құрамды бағалау синтезделген үлгінің құрылымдық тұрақтылығын, қайта өңдеуге төзімділігін және жоғары тиімділігін растады. Материалдың құрылымдық ерекшеліктері адсорбция жылдамдығын арттырып, су тазарту жағдайларына бейімделгіштігін көрсетті. Бұл процестің жеделдеуіне және кремнезем экстракциясының артуына қосымша үлес қосып, өнімділікті өсірді және ресурстық тиімділікті күшейтті. Жалпы алғанда, алынған нәтижелер кальций силикатын суды органикалық және бейорганикалық ластағыштардан тазартуға арналған перспективті адсорбент ретінде сипаттайды. Ұсынылған әдіс экологиялық қауіпсіз, технологиялық жағынан қарапайым, қолжетімді шикізатты кеңінен пайдалануға мүмкіндік береді. Осы ғылыми зерттеу нәтижелері тиімді, арзан және тұрақты сорбенттерді әзірлеуге, су сапасын жақсартуға бағытталған әрі қарай қолданбалы зерттеулерге берік негіз қалайды.*

Түйін сөздер*: күріш қауызы, кальций силикаты, сорбент, адсорбция, адсорбциялық белсенділік, элементтік құрам.*

Кіріспе

Күріш – ауыл шаруашылығындағы ең маңызды дақылдардың бірі және адам үшін көмірсулардың негізгі көзі. Күрішті қайта өңдеу барысында едәуір мөлшерде қалдықтар түзіледі, олардың бастысы – күріш қауызы (күріш массасының 20%-ына дейін), ол айтарлықтай мөлшерде кремнеземді қамтиды [1, 2]. Күріш қауызының әлемдік жыл сайынғы өндірісі шамамен 200 млн тоннаға жетеді [3], бұл оны құнды жаңартылатын шикізат етеді. Құрамындағы кремнеземнің (~20%) және органикалық көміртектің (30-50%, негізінен целлюлоза мен лигнин түрінде) жоғары мөлшерінің арқасында күріш қауызы биологиялық ыдырауға төзімді сорбциялық материалдар алудың болашағы зор шикізаты болып табылады [4].

Күріш қауызын өнеркәсіптік қазандықтарда отын ретінде қолдану оның төмен жылу бөлу қабілеті, ылғалдылығының жоғары болуы және жинау мен тасымалдауға кететін

©М. Төлегенқызы, Р.А. Нарманова, А. Серікқұл, Н.М. Мұхиддин, Н.О. Аппазов, 2026

шығындармен шектелген. Цемент және шиналар өнеркәсібінде негізінен қауыздың кремнеземдік бөлігі қолданылады. Ал оны ашық алаңдарда жағу парниктік және улы заттардың – CO, ұшпа органикалық қосылыстардың және канцерогенді полициклді ароматты көмірсутектердің бөлінуіне әкеліп, қоршаған орта мен адам денсаулығына кері әсер етеді. Сондықтан күріш қауызының қайта өңделуі – күріш өсіру және қайта өңдеумен айналысатын барлық елдер үшін өзекті мәселе. Қауыздың кремнийлі де, органикалық бөлігін де тиімді пайдалануға мүмкіндік беретін технологияларды іздеу – басым бағыт болып табылады. Бұл биомассаны терең қайта өңдеу экологиялық жүктемені азайтып, экономикалық қайтарымды арттыруға және қосылған құны жоғары өнім шығаруға мүмкіндік береді. Аграрлық өңірлер үшін бұл – қалдықтарды азайтатын және «жасыл» технологияларды дамытатын айналмалы экономиканың перспективалы бағыты [5, 6].

Қазіргі таңда күріш қауызының қайта өңделуі бойынша экологиялық қауіпсіз және ресурстарды үнемдейтін технологияларды жасауға бағытталған белсенді зерттеулер жүргізілуде. Зерттеуде күріш қауызынан кремнеземді алу және оны адсорбциялық процестер негізінде сарқынды суларды тазарту жүйелерінде қолдану үшін функционализациялаудың қазіргі жетістіктері көрсетілген [7]. Жұмыста күріш қауызының кремнеземін өнеркәсіптік SiO_2-ге балама ретінде пайдалану әлеуеті қарастырылған [8-11] еңбектерінде осы шикізаттан белсендірілген көмір мен биошихта алу тәсілдері сипатталған.

Айтарлықтай ғылыми жетістіктерге қарамастан, күріш қауызын толық көдеге жарату әлі іске асырылған жоқ, сондықтан оның қайта өңдеу мәселесі әлі де өткір күйінде қалып отыр. Осыған байланысты бұл агроөнеркәсіптік қалдықтан құнды компоненттерді алудың тиімді әдістерін іздеу – қазіргі заманғы зерттеулердің маңызды бағыты.

[12] жұмысында күріш қауызынан органикалық еріткіштер мен матрицаларды қолданбай, кремний диоксиді мен кальций оксиді көзі ретінде пайдалана отырып, β-волластонит синтездеу мақсаты қойылды. Синтез әдісі ретінде автоклавтау қолданылып, оның β-волластониттің фазалық құрамы мен морфологиясына әсері алғаш рет зерттелді.

[13] мақаласында күріш қауызы мен жұмыртқа қабығын пайдаланып кальций-силикатты плиталар алу қарастырылған. Шикізатты дайындау барысында күріш қауызынан алынған күлді (≈93% SiO_2) күйдірілген жұмыртқа қабығымен (≈99% CaO) араластырып, 1050°C температурада қыздырған. Алынған кальций силикаты ұнтағынан, портландцементтен және шикі қауыз күлінен бөлме температурасында плиталар қалыптастырылды. Өнімдердің тығыздығы төмен (<1000 кг/м³), беріктігі жеткілікті (≈6 МПа) және жылу өткізгіштігі төмен (<0,153 Вт/(м·К)) болды, бұл оларды құрылыс саласында ішкі жылу оқшаулау үшін пайдалануға мүмкіндік береді.

[14] еңбегінде күріш қауызының күлі (91,50% SiO_2) және *Pomacea canaliculata* ұлуларының қабығы (98,25% CaO) негізінде кальций силикатын қатты фазалық реакция әдісімен синтездеу ұсынылған. Қоспа 1:1 мольдік қатынаста 5-8 сағат бойы ұнтақталып, кейін 800-1000°C температурада 2 сағат бойы күйдірілген. ИҚ-спектроскопия және рентгенофазалық талдау нәтижелері кальций силикатының кристалдық фазасының түзілуін растады, әрі ұнтақтау уақыты артқан сайын оның түзілу дәрежесі жоғарылады.

[15] зерттеуінде кальций силикаты бөлме температурасында синтезделді. Бұл үшін күріш қауызы негізінде алынған натрий силикатының (22,4% Si) сұйылтылған ерітіндісіне қарқынды араластыру кезінде $CaCl_2$-нің 20%-дық ерітіндісі қосылды. Түзілген ақ тұнба жуылып, 85°C-та кептірілді. Алынған материал рентгенофазалық талдау әдісімен зерттелді.

[16] еңбегінде басқа әдіс ұсынылған: күріш қауызы NaOH немесе KOH ерітінділерімен 50-95°C температурада өңделген, кейін алынған экстракт pH 4,5-6,0-ге дейін қышқылданып тұндырылған. Тұнба жуылып, 90-105°C-та тұрақты массаға дейін кептірілді.

Аталған тәсілдердің негізгі кемшіліктері – жоғары энергия сыйымдылығы, технологиялық процестердің күрделілігі және қымбат реагенттердің қолданылуы.

Әдебиеттерді талдау көрсеткендей, соңғы жылдары күріш қауызын қайта өңдеу арқылы функционалды материалдар алу бойынша белсенді зерттеулер жүргізілуде. Бұл жұмыстар әсіресе ауыр металдармен ластанудың өсуіне байланысты өзекті болып отыр, өйткені олар жоғары уыттылыққа және биологиялық белсенділікке ие. Сондықтан бұл зерттеу күріш қауызы негізінде кальций силикатын алу технологиясын әзірлеуге және оның сорбциялық белсенділігін зерттеуге бағытталған.

Ұсынылған тәсілдің басты артықшылығы – күріш қауызынан алынған сорбенттің сарқынды суларды тазартуда тиімді әрі қолжетімді шешімге айнала алуы. Оны пайдалану

экологиялық қауіпсіз және экономикалық тұрғыдан тиімді су тазарту технологияларын жасауға мүмкіндік береді, бұл тұрақты даму мен айналмалы экономика қағидаттарына сәйкес келеді.

Зерттеу әдістері

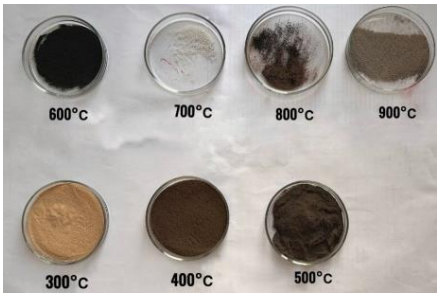
Зерттеу нысандары ретінде күріш қауызы негізінде синтезделген кальций-силикатты сорбент үлгілері алынды. Ол үшін алдын ала ұнтақталған, жуылып, кептірілген 25 г қауызы 375 мл 1 М NaOH ерітіндісімен қуаты 900 Вт микротолқынды пеште тұрақты араластыру арқылы 10 минут бойы өңделді. Алынған натрий силикатының ерітіндісі қатты целлюлозалық қалдықтардан Бюхнер воронкасы арқылы сүзу арқылы бөлінді. Сүзіндіге 375 мл 1 М $CaCl_2$ ерітіндісі қосылып, нәтижесінде ақ тұнба түзілді. Тұнба декантациядан, жуудан, кептіруден және ұнтақтаудан өтті, содан кейін муфель пешінде 300-900°С температура аралығында (100°С-қа көтере отырып) бір сағат бойы термоөңдеуге салынды. Нәтижесінде әртүрлі түсті үлгілер алынды.

Синтезделген үлгілердің йод бойынша адсорбциялық белсенділігі МемСТ 6217-74 талаптарына сәйкес анықталды.

Сорбенттердің фазалық құрамы рентгендік дифракция (XRD) әдісімен Rigaku SmartLab SE құрылғысында зерттелді, онда Cu Kα сәулеленуі (λ = 1,5406 Å) 40 кВ және 50 мА жұмыс параметрлерінде қолданылды. Сканерлеу 2θ = 5-80° бұрыш диапазонында 0,001° қадаммен және 2°/мин жылдамдықпен жүргізілді.

Нәтижелерді талдау

1-суретте 300-900°С аралығындағы әртүрлі термоөңдеу температураларында алынған кальций-силикатты сорбент үлгілері берілген.



Сурет 1 – Күріш қауызынан алынған кальций силикат сорбенттерінің үлгілері

Йод бойынша адсорбция көрсеткіші пайызбен (%) өрнектеліп, материалдың йод молекулаларын сіңіру қабілетін сипаттайды. Бұл көрсеткіш сорбенттің синтез жағдайына байланысты тиімділігін бағалауға мүмкіндік береді. Ең жоғарғы мән (56%) 700°С-та өңделген үлгіде тіркелді (1-кесте). Бұл температуралық аймақта оңтайлы кеуекті құрылым қалыптасып, меншікті беткей ауданы артады, нәтижесінде йод молекулаларын сорбциялауға ең қолайлы жағдай жасалады.

Кесте 1 – Сорбент үлгілерінің йод бойынша адсорбциялық белсенділігі

Т, ℃	300	400	500	600	700	800	900
А, %	27,4	29,6	32,5	43,7	56	31,3	9,7

Деректерді интерпретациялау:

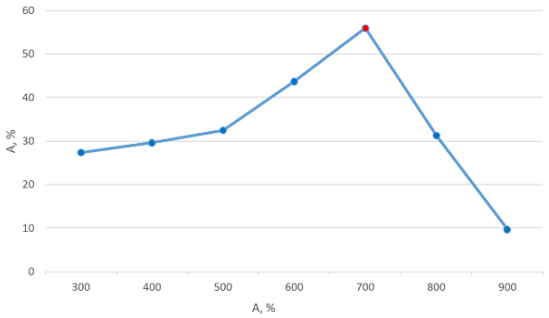
300-500°С: төмен адсорбциялық белсенділік кеуекті құрылымның әлсіз дамуы және материалдың жартылай аморфты күйімен түсіндіріледі;

600-700°С: кристалдық фазаның түзілуі және микропоралар жүйесінің кеңеюі сорбциялық қабілеттің айтарлықтай өсуіне ықпал етеді;

800-900°С: микрокеуекті құрылымның тығыздалуы және балқу құбылыстары байқалады, бұл адсорбциялық белсенділіктің төмендеуіне әкеледі.

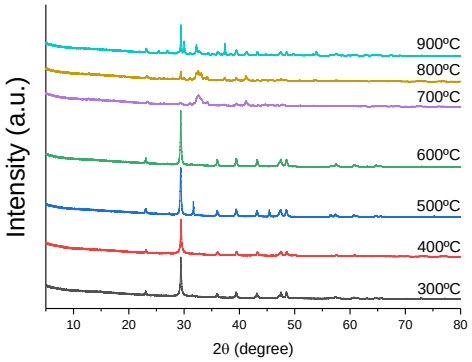
Йод бойынша адсорбциялық белсенділікті анықтау сорбент бетінің дамуын сипаттайтын жанама көрсеткіш болып табылады. Йод молекулаларының шағын өлшемі мен микропораларға ену қабілетінің арқасында бұл әдіс адсорбциялық қасиеттердің дәл әрі ақпараттық сипаттамасын береді. Мұндай тәсіл әсіресе ауыр металдардың, органикалық қосылыстардың және газдардың сорбциясы кезінде материалдың мінез-құлқын болжауда маңызды болып табылады.

Жүргізілген зерттеулердің негізінде термоөңдеу температурасының артуы сорбенттің адсорбциялық белсенділігінің белгілі бір оңтайлы мәнге дейін ғана өсуіне, содан кейін оның төмендеуіне алып келетіні анықталды (2-сурет). Мұндай әсер материалдың құрылымы мен кеуектілігіндегі өзгерістерге байланысты. Төмен температураларда белсенділіктің төмен болуы беткейдің жеткіліксіз активтенуімен түсіндіріледі, ал 800-900°C аралығында белсенділіктің төмендеуі кеуекті құрылымның тығыздалуы немесе бұзылуы және беттің жартылай көмірленуімен байланысты.



Сурет 2 – Алынған сорбент үлгілерінің йод бойынша адсорбциялық белсенділігі

Синтезделген сорбенттердің кристалдық құрылымын зерттеу үшін рентгендік дифракция әдісі қолданылды (Rigaku SmartLab SE, Cu Kα сәулеленуі). Алынған нәтижелерге сәйкес әртүрлі температурада өңделген үлгілерде кальций мен кремний қосылыстарының әртүрлі фазалары тіркелді (3-сурет).



Сурет 3 – Rigaku SmartLab SE қондырғысын пайдалана отырып рентгендік дифракция әдісімен жүргізілген үлгілердің құрылымдық талдауы

Жеті үлгі (300°C, 400°C, 500°C, 600°C, 700°C, 800°C және 900°C) бойынша жүргізілген рентгенографиялық талдау кальций силикатының (Ca_2SiO_4), кальций оксидінің (CaO) және кремний диоксидінің (SiO_2) фазаларының бар екенін көрсетті. 700-900°C дейін қыздырғанда дифрактограммаларда кальций силикатының фазалары басым бола бастайды, олар орторомбиялық модификация мен моноклинді Ca_2SiO_4 (ларнит) қоспасы түрінде кездеседі.

Төмен температуралар үшін кальциттің ромбоэдрлік фазасының болуы тән, бұл 2θ бұрыштарында байқалатын дифракциялық шыңдардың пайда болуымен дәлелденеді: 23,05°, 29,49°, 31,5°, 35,96°, 39,38°, 43,17°, 47,08°, 47,54°, 48,57°, 56,59° және 57,45°. Бұл мәндер (012), (104), (006), (110), (113), (202), (024), (018), (116), (211) және (122) жазықтықтарына сәйкес келеді (ICDD № 00-005-0586).

Орторомбиялық Ca_2SiO_4 модификациясы 2θ бұрыштарында тіркеледі: 20,36°, 21,81°, 23,18°, 23,43°, 26,26°, 29,35°, 30,67°, 32,24°, 32,66° және 47,39°. Бұл көрсеткіштер (200), (210), (011), (111), (201), (020), (301), (220), (311) және (121) жазықтықтарына сәйкес келеді (ICDD № 00-024-0034).

Жоғары температураларда сонымен қатар ларниттің (Ca_2SiO_4) моноклинді фазасының болуы да расталды, ол 2θ бұрыштарындағы келесі шыңдармен сипатталады: 18,11°, 19,10°, 23,24°, 23,47°, 26,36°, 27,49°, 28,07°, 29,26°, 31,06°, 31,77°, 32,05°, 32,13°, 32,59° және 34,33°.

Бұл шыңдар (-101), (200), (210), (111), (020), (-211), (120), (211), (211), (310), (-301), (-121), (002), (121) және (301) жазықтықтарына сәйкес келеді (ICDD № 00-033-0302) (2-сурет).

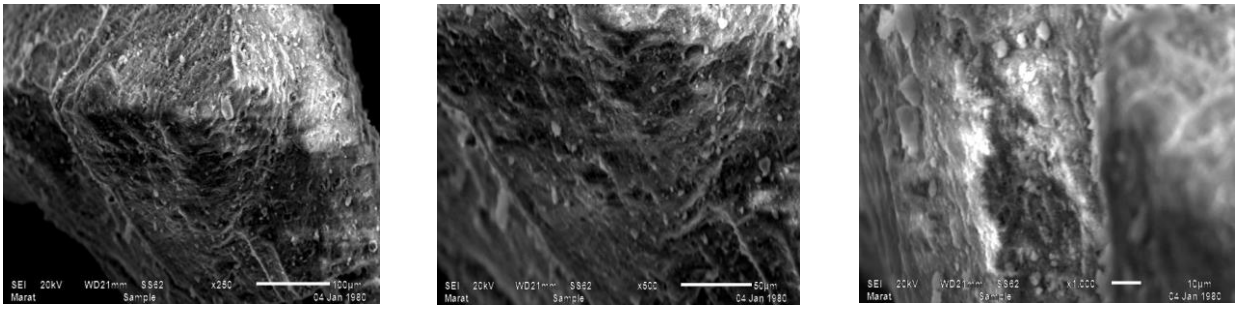
Алынған сорбенттердің элементтік құрамы рентгенфлуоресцентті спектрометр (NEX CG Rigaku) көмегімен анықталды. Талдау нәтижесінде материалдың негізін кальций оксиді (CaO) мөлшері 60-75% аралығында және кремний диоксиді (SiO_2) 55-58% шегінде құрайтыны көрсетілді. Негізгі компоненттерден бөлек, үлгілерде күкірт триоксиді (SO_3), калий оксиді (K_2O) және темір оксиді (Fe_2O_3) сияқты аз мөлшерде қоспалар да табылды. Мұндай қоспалардың болуы сорбенттердің химиялық тұрақтылығын және құрылымдық беріктігін арттыруға ықпал етеді.

2-кестеде 300-900°C аралығындағы әртүрлі термоөңдеу температураларында кальций-силикатты сорбенттердің элементтік құрамының өзгеруі жөніндегі деректер келтірілген. Бұл мәліметтер материалдың химиялық сипаттамаларының синтез жағдайларына тәуелділігін қадағалауға мүмкіндік береді.

Кесте 2 – Алынған үлгілердің элементтік құрамы

№	Термиялық өңдеу температурасы, ℃	Алынған кальций силикатының элементтік құрамы				
		CaO, %	SiO_2, %	SO_3, %	K_2O, %	Fe_2O_3, %
1	300	63	58	0,484	0,024	0,006
2	400	67	57	0,406	0,049	0,004
3	500	57	55	2,310	0,208	0,047
4	600	75	56	0,328	0,075	0,007
5	700	60	58	0,507	0,045	0,021
6	800	63	56	0,227	0,049	0,013
7	900	60	58	0,507	0,046	0,021

Сорбенттердің беткі морфологиясы растрлы электрондық микроскопия (SEM) әдісімен зерттелді. 700°C температурада синтезделген үлгінің микрофотосуреттері (4-сурет) ×250-×1000 ұлғайтуда микрокеуектердің біркелкі таралуын және жарылған құрылымның болуын анықтады. Бұл сипаттамалар материалдың жоғары адсорбциялық қабілеттілігін қамтамасыз ететін маңызды факторлар болып табылады.



a) Микрофотосурет, ×250 есе b) Микрофотосурет, ×500 есе c) Микрофотосурет, ×1000 есе

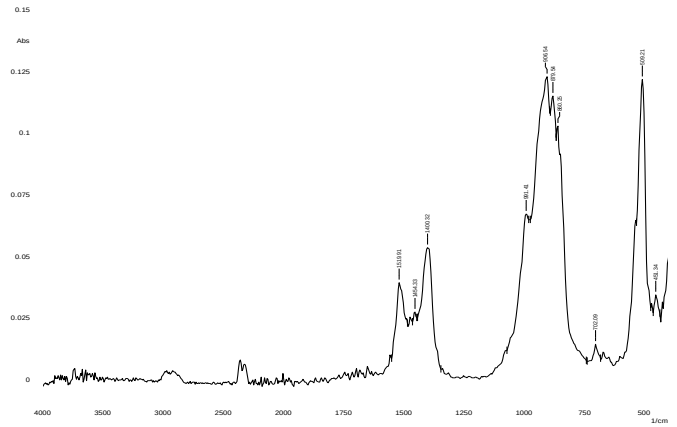
Сурет 4 – 700°C температурада алынған кальций силикаты сорбенті үлгісінің микрофотосуреттері

Жоғары температурада (800-900°C) өңделген үлгілерде беттің тығыздалуы және микрокеуектер санының азаюы байқалды. Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, бұл құбылыстар сорбциялық белсенділіктің төмендеуіне алып келді.

700°C температурада алынған үлгінің ИҚ-спектрінде (5-сурет) 991,41; 906,54; 879,54; 702,09; 509,21 және 451,34 $см^{-1}$ жиіліктерінде Si-O-Si және Ca-O-Si байланыстарының тербелістеріне сәйкес келетін жұтылу жолақтары айқын тіркелді. Бұл деректер кальций силикатының жоғары дәрежеде реттелген кристалдық құрылымының түзілгенін көрсетеді.

Жолақтардың таралу сипаты аморфты кремний диоксидінің кремний тетраэдрлері арқылы полимерленіп, берік силикатты тор түзгенін дәлелдейді. Мұнда кальций иондары кремнийқұрамды құрылымдармен берік байланысқан, бұл кристалдық фазаның толық қалыптасуы мен оның тұрақтылығын көрсетеді.

1400-1519 $см^{-1}$ диапазонында әлсіз жолақтар байқалады, олар карбонат топтарына сәйкес келеді. Бұл үлгіде термиялық ыдыраудың толық жүрмеуіне байланысты сақталып қалған $CaCO_3$ қалдық фазасының болуын білдіреді.



Сурет 5 – 700°С температурада алынған кальций силикаты сорбентінің үлгісінің ИҚ-спектрі

Осылайша, 700°С-та Na_2SiO_4-тің (сілтілік экстракциядан кейін алынған) кальций тұздарымен реакциясы іс жүзінде толық жүріп, кеуекті құрылымды силикаттың қалыптасуын қамтамасыз етті. Дәл осы температура сорбент алу үшін оңтайлы болып шықты: поликонденсацияның жоғары дәрежесіне қол жеткізілді, тұрақты силикатты тор түзілді және қалдық қосылыстардың мөлшері барынша азайды.

Қорытынды

Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, кальций-силикатты сорбенттердің адсорбциялық белсенділігі температураға тәуелді. Ең жоғары белсенділік 700°С-та алынған үлгіде тіркеліп (56 %), бұл температурада оңтайлы кеуекті құрылым мен үлкен меншікті бет қалыптасты.

Рентгенофазалық талдау Ca_2SiO_4, CaO және SiO_2 фазаларының бар екенін, ал 700-900°С-та кальций силикаты фазаларының басым болатынын көрсетті. Элементтік құрам бойынша материалдың негізін CaO (60-75 %) және SiO_2 (55-58 %) құрайды, ал SO_3, K_2O және Fe_2O_3 қоспалары сорбенттің беріктігі мен химиялық тұрақтылығын арттырды.

СЭМ зерттеулері 700°С-та алынған үлгінің біркелкі микрокеуекті құрылымын растады, ал 800-900°С-та құрылымның тығыздалуы белсенділікті төмендетті. ИҚ-спектроскопия Ca-O-Si және Si-O-Si байланыстары бар тұрақты кристалдық құрылым түзілгенін дәлелдеді.

Осылайша, 700°С температурасы сорбент алудың оңтайлы шарты болып табылады. Ұсынылған әдіс арзан әрі қолжетімді шикізат – күріш қауызынан экологиялық таза және тиімді сорбциялық материалдар алуға мүмкіндік береді.

Әдебиеттер тізімі

1. Babaso P.N. Rice husk and its applications: Review / P.N. Babaso, H. Sharanagouda // Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci. – 2017. – № 6(10). – P. 1144-1156. https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.610.138.
2. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2017). Rice market monitor, 20(2), 36. FAO: Rome. http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.24108.95368.
3. Нгуен М.Х. Способ получения активированного угля и диоксида кремния из рисовой шелухи / М.Х. Нгуен, Н.Т. Данг // Sci-Article.ru. – 2014. https://sci-article.ru/stat.php?i=1408911852 (дата обращения: 17.10.2025).
4. Sustainable use of rice husk for the cleaner production of value-added products / S.S. Shukla et al // J. Environ. Chem. Eng. – 2022. – № 10(1). – Article 106899. https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106899.
5. Experimental study on rice husk combustion in a circulating fluidized bed / M. Fang et al // Fuel Process. Technol. – 2004. – № 85. – P. 1273-1282. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2003.08.002.
6. Combustion and emission characteristics of a swirling fluidized-bed combustor burning moisturized rice husk / V.I. Kuprianov et al // Appl. Energy. – 2010. – № 87. – P. 2899-2906. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.09.009.
7. Advances in extraction of silica from rice husk and its modification for friendly environmental wastewater treatment via adsorption technology / S. Ijaz et al // J. Water Process Eng. – 2024. – № 71, Article 107187. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.107187.
8. A review of the use of rice husk silica as a sustainable alternative to traditional silica sources in various applications / M.A. Taiye et al // Environ. Prog. Sustain. Energy. – 2024. – № 43(6), Article e14451. https://doi.org/10.1002/ep.14451.

9. Simultaneous removal of 3d transition metals from multi-component solutions by activated carbons from co-mingled wastes / S.B. Lyubchik et al // Sep. Purif. Technol. – 2008. – № 60(3). – P. 264-271. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2007.08.020.
10. The kinetic parameters evaluation for the adsorption processes at "liquid-solid" interface / S. Lyubchik et al // In: Electrokinetics Across Disciplines and Continents: New Strategies for Sustainable Development. – 2015. – P. 81-109. https://doi.org/10.1007/978-3-319-20179-5_5.
11. Effect of rice husk biochar additive on concrete properties / R. Narmanova et al // AIP Conf. Proc. – 2024. – 3243, 020055. https://doi.org/10.1063/5.0247632.
12. Ismail H. Effect of autoclaving and sintering on the formation of β-wollastonite / H. Ismail, R. Shamsudin, M.A. Abdul Hamid // Mater. Sci. Eng. – 2016. – № 58. – P. 1077–1081. https://doi.org/10.1016/j.msec.2015.09.030.
13. Hossain S.K.S. Development of sustainable calcium silicate board: Utilization of different solid wastes / S.K.S. Hossain, P.K. Roy // Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidr. – 2019. – № 58(6). – P. 274-284. https://doi.org/10.1016/J.BSECV.2019.06.003.
14. Synthesis and characterization of calcium silicate from rice husk ash and shell of snail Pomacea canaliculata by solid state reaction / R. Phuttawong et al // Adv. Mater. Res. – 2015. – № 1103. – P. 1-7. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1103.1.
15. Моносиликаты кальция как компоненты композиционных материалов / С.Б. Буланова и др. // Технология неорганических веществ и материалов. – 2009. – Т. 10, № 3. – С. 143-149. http://dx.doi.org/10.1134/S0040579510040160.
16. Патент 2548421 Российская Федерация. Способ получения кремнийсодержащего сорбента для очистки воды от микроорганизмов / Земнухова Л.А., Харченко У.В., Беленева И.А. – Официальный бюллетень. – 2015. – № 11 (20.04.2015). https://patents.google.com/patent/RU2548421C1/ru (дата обращения: 17.10.2025).

References

1. Babaso P.N. Rice husk and its applications: Review / P.N. Babaso, H. Sharanagouda // Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci. – 2017. – № 6(10). – R. 1144-1156. https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.610.138. (In English).
2. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2017). Rice market monitor, 20(2), 36. FAO: Rome. http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.24108.95368. (In English).
3. Nguen M.KH. Sposob polucheniya aktivirovannogo uglya i dioksida kremniya iz risovoi shelukhi / M.KH. Nguen, N.T. Dang // Sci-Article.ru. – 2014. https://sci-article.ru/stat.php?i=1408911852 (data obrashcheniya: 17.10.2025). (In Russian).
4. Sustainable use of rice husk for the cleaner production of value-added products / S.S. Shukla et al // J. Environ. Chem. Eng. – 2022. – № 10(1). – Article 106899. https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106899. (In English).
5. Experimental study on rice husk combustion in a circulating fluidized bed / M. Fang et al // Fuel Process. Technol. – 2004. – № 85. – R. 1273-1282. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2003.08.002. (In English).
6. Combustion and emission characteristics of a swirling fluidized-bed combustor burning moisturized rice husk / V.I. Kuprianov et al // Appl. Energy. – 2010. – № 87. – R. 2899-2906. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.09.009. (In English).
7. Advances in extraction of silica from rice husk and its modification for friendly environmental wastewater treatment via adsorption technology / S. Ijaz et al // J. Water Process Eng. – 2024. – № 71, Article 107187. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.107187. (In English).
8. A review of the use of rice husk silica as a sustainable alternative to traditional silica sources in various applications / M.A. Taiye et al // Environ. Prog. Sustain. Energy. – 2024. – № 43(6), Article e14451. https://doi.org/10.1002/ep.14451. (In English).
9. Simultaneous removal of 3d transition metals from multi-component solutions by activated carbons from co-mingled wastes / S.B. Lyubchik et al // Sep. Purif. Technol. – 2008. – № 60(3). – R. 264-271. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2007.08.020. (In English).
10. The kinetic parameters evaluation for the adsorption processes at "liquid-solid" interface / S. Lyubchik et al // In: Electrokinetics Across Disciplines and Continents: New Strategies for Sustainable Development. – 2015. – R. 81-109. https://doi.org/10.1007/978-3-319-20179-5_5. (In English).

11. Effect of rice husk biochar additive on concrete properties / R. Narmanova et al // AIP Conf. Proc. – 2024. – 3243, 020055. https://doi.org/10.1063/5.0247632. (In English).
12. Ismail H. Effect of autoclaving and sintering on the formation of β-wollastonite / H. Ismail, R. Shamsudin, M.A. Abdul Hamid // Mater. Sci. Eng. – 2016. – № 58. – R. 1077–1081. https://doi.org/10.1016/j.msec.2015.09.030. (In English).
13. Hossain S.K.S. Development of sustainable calcium silicate board: Utilization of different solid wastes / S.K.S. Hossain, P.K. Roy // Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidr. – 2019. – № 58(6). – R. 274-284. https://doi.org/10.1016/J.BSECV.2019.06.003. (In English).
14. Synthesis and characterization of calcium silicate from rice husk ash and shell of snail Pomacea canaliculata by solid state reaction / R. Phuttawong et al // Adv. Mater. Res. – 2015. – № 1103. – R. 1-7. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1103.1. (In English).
15. Monosilikaty kal'tsiya kak komponenty kompozitsionnykh materialov / S.B. Bulanova i dr. // Tekhnologiya neorganicheskikh veshchestv i materialov. – 2009. – T. 10, № 3. – S. 143-149. http://dx.doi.org/10.1134/S0040579510040160. (In Russian).
16. Patent 2548421 Rossiiskaya Federatsiya. Sposob polucheniya kremniisoderzhashchego sorbenta dlya ochistki vody ot mikroorganizmov / Zemnukhova L.A., Kharchenko U.V., Beleneva I.A. – Ofitsial'nyi byulleten'. – 2015. – № 11 (20.04.2015). https://patents.google.com/patent/RU2548421C1/ru (data obrashcheniya: 17.10.2025). (In Russian).

M. Tolegenkyzy[1], R.A. Narmanova[1], A. Serikkul[2], N.M. Mukhiddin[1], N.O. Appazov[1*]
[1]Korkyt Ata Kyzylorda University,
Republic of Kazakhstan, Kyzylorda, Ayteke Bi Street, 29 A
[2]Karaganda Industrial University,
Republic of Kazakhstan, Temirtau, Republic Avenue, 30
*e-mail: nurasar.82@korkyt.kz

CALCIUM SILICATE OBTAINED FROM RICE HUSK: SYNTHESIS AND INVESTIGATION OF ADSORPTION PROPERTIES

In this paper, we propose a synthesis of calcium silicate from rice husk and a comprehensive assessment of its physicochemical and adsorption properties. The sorbent was obtained by alkaline extraction of silica contained in rice husk with sodium hydroxide followed by precipitation with calcium chloride. The proposed method ensures rational use of agricultural waste, reduces the burden on the environment and is cost-effective. Microwave irradiation was used in the synthesis, which significantly reduces the process time and increases the efficiency of silica extraction in the form of a sodium silicate solution. To improve the structural and adsorption characteristics of the obtained calcium silicate, the material was subjected to heat treatment in the temperature range of 300-900°C. According to the results, optimal properties were observed at a temperature of 700°C. It was at this temperature that the material showed high adsorption activity for iodine (56%), increased developed porosity and favorable specific surface properties. X-ray diffraction analysis, morphological studies and elemental composition assessment confirmed the structural stability, resistance to processing and high efficiency of the synthesized sample. The structural features of the material contributed to an increase in the adsorption rate and demonstrated its adaptability to water treatment conditions. This additionally contributed to the acceleration of the process and an increase in silica extraction, increased productivity and increased resource efficiency. In general, the obtained results characterize calcium silicate as a promising adsorbent for water purification from organic and inorganic pollutants. The proposed method allows for the wide use of environmentally friendly, technologically simple and accessible raw materials. The results of this scientific study create a solid basis for further applied research aimed at developing effective, inexpensive and stable sorbents and improving water quality.

Key words: *rice husk, calcium silicate, sorbent, adsorption, adsorption activity, elemental composition.*

М. Толегенкызы[1], Р.А. Нарманова[1], А. Сериккул[2], Н.М. Мухиддин[1], Н.О. Аппазов[1*]
[1]Кызылординский университет имени Коркыт Ата,
Республика Казахстан, Кызылорда, улица Айтеке би, 29 А
[2]Карагандинский Индустриальный Университет,
Республика Казахстан, г. Темиртау, проспект Республики, 30
*e-mail: nurasar.82@korkyt.kz

КАЛЬЦИЙ СИЛИКАТ, ПОЛУЧЕННЫЙ ИЗ РИСОВОЙ ШЕЛУХИ: СИНТЕЗ И ИЗУЧЕНИЕ АДСОРБЦИОННЫХ СВОЙСТВ

В данной работе предложен синтез силиката кальция из рисовой шелухи и проведена комплексная оценка его физико-химических и адсорбционных свойств. Сорбент получен щелочной экстракцией кремнезема, содержащегося в рисовой шелухе, гидроксидом натрия с последующим осаждением хлоридом кальция. Предложенный метод обеспечивает рациональное использование сельскохозяйственных отходов, снижает нагрузку на окружающую среду и является экономичным. При синтезе использовалось микроволновое облучение, что значительно сокращает время процесса и повышает эффективность извлечения кремнезема в виде раствора силиката натрия. Для улучшения структурно-адсорбционных характеристик полученного силиката кальция материал подвергался термической обработке в интервале температур 300-900°C. Согласно результатам, оптимальные свойства наблюдались при температуре 700°C. Именно при этом материал проявил высокую адсорбционную активность по йоду (56%), повышенную развитую пористость и благоприятные удельные поверхностные свойства. Рентгеноструктурный анализ, морфологические исследования и оценка элементного состава подтвердили структурную стабильность, устойчивость к переработке и высокую эффективность синтезированного образца. Структурные особенности материала способствовали повышению скорости адсорбции и продемонстрировали его адаптивность к условиям водоподготовки. Это дополнительно способствовало ускорению процесса и повышению извлечения кремнезема, повышению производительности и повышению ресурсоэффективности. В целом полученные результаты характеризуют силикат кальция как перспективный адсорбент для очистки воды от органических и неорганических загрязняющих веществ. Предложенный метод позволяет широко использовать экологически безопасное, технологически простое и доступное сырье. Результаты данного научного исследования создают прочную основу для дальнейших прикладных исследований, направленных на разработку эффективных, недорогих и стабильных сорбентов и повышение качества воды.

Ключевые слова: *рисовая шелуха, силикат кальция, сорбент, адсорбция, адсорбционная активность, элементный состав.*

Авторлар туралы мәліметтер:

Меруерт Төлегенқызы – техника ғылымдарының магистрі, Қорқыт Ата атындағы Қызылорда университеті; e-mail: meruert.tolegenkyzy22@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-8916-9596.

Роза Абдибековна Нарманова – техника ғылымдарының кандидаты, доцент, Қорқыт Ата атындағы Қызылорда университеті; e-mail: roza_an@mail.ru. ORCID:https://orcid.org/0000-0001-5672-7418.

Анель Серіккұл – докторант, Қарағанды Индустриялық Университеті; e-mail: nelliess@mail.ru. ORCID:https://orcid.org/0009-0005-2200-9182.

Нұршат Мұратқызы Мұхиддин – магистрант, Қорқыт Ата атындағы Қызылорда университеті; e-mail: nurshat_00_12@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-0379-3381.

Нұрбол Орынбасарұлы Аппазов* – химия ғылымдарының кандидаты, профессор, Қорқыт Ата атындағы Қызылорда университеті; e-mail: nurasar.82@korkyt.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8765-3386.

Information about the authors:

Meruyert Tolegenkyzy – master of Technical Sciences, Korkyt Ata Kyzylorda University; e-mail: meruert.tolegenkyzy22@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-8916-9596.

Roza Abdibekovna Narmanova – candidate of technical sciences, Associate Professor, Korkyt Ata Kyzylorda University; e-mail: roza_an@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5672-7418.

Anel Serikkul – doctoral student, Karaganda Industrial University; e-mail: nelliess@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-2200-9182.

Nurshat Muratkyzy Mukhiddin – Master's student at Korkyt Kyzylorda University; e-mail: nurshat_00_12@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-0379-3381.

Nurbol Orynbasaruly Appazov* – candidate of Chemical sciences, professor, Korkyt Ata Kyzylorda University; e-mail: nurasar.82@korkyt.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8765-3386.

Сведения об авторах

Меруерт Толегенкызы – магистр технических наук, Кызылординский университет имени Коркыт Ата; e-mail: meruert.tolegenkyzy22@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-8916-9596.

Роза Абдибековна Нарманова – кандидат технических наук, доцент, Кызылординский университет имени Коркыт Ата; e-mail: roza_an@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5672-7418.

Анель Сериккул – докторант, Карагандинский Индустриальный Университет; e-mail: nelliess@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-2200-9182.

Нуршат Муратқызы Мухиддин – магистрант, Кызылординский университет имени Коркыт Ата; e-mail: nurshat_00_12@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-0379-3381.

Нурбол Орынбасарулы Аппазов* – кандидат химических наук, профессор, Кызылординский университет имени Коркыт Ата; e-mail: nurasar.82@korkyt.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8765-3386.

Редакцияға енуі 22.10.2025
Өңдеуден кейін түсуі 17.12.2025
Жариялауға қабылданды 18.12.2025

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-66

ҒТАХР: 61.31

BY 4.0
Check for updates

А.К. Баешова*, С. Молайган[1], А.Б. Баешов[1], Р.М. Есетов[1], Б. Леска[2]
[1]Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті,
физика-химиялық зерттеу және талдау орталығы,
050040, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., әл-Фараби даңғылы, 71
[2]Адам Мицкевич университеті,
61-614, Польша, Познань, Uniwersytetu Poznanskiego к-сі, 8
*e-mail: azhar_b@bk.ru

СУЛЫ ЕРІТІНДІЛЕРДЕ АЛЮМИНИЙ ПЛАСТИНАСЫНДА СУТЕК БӨЛІНУ РЕАКЦИЯСЫНА ОРТАНЫҢ ӘСЕРІ

Аңдатпа: *Сутек алудың баламалы және тиімді тәсілдерін әзірлеу қазіргі заманғы маңызды ғылыми-техникалық міндеттердің бірі болып табылады. Перспективалы бағыттардың бірі – алюминийдің сумен әрекеттесуі нәтижесінде сутек алу; алайда алюминий бетінде тұрақты оксидтік қабықшаның болуы әдеттегі жағдайларда реакцияның жүруіне кедергі келтіреді. Осы жұмыстың мақсаты фосфор немесе күкірт қышқылдарының сулы ерітінділеріне натрий хлоридін қосу арқылы алюминий бетін белсенділендіру және сутектің бөліну жылдамдығын анықтау. Эксперименттік зерттеулерде фосфор немесе күкірт қышқылдары, химиялық тазалықтағы натрий хлориді және А85 маркалы алюминий қолданылды. Сутек газын алу зертханалық жағдайда шкаласы бар шыны бюретка типті қондырғыда жүргізілді. Бөлінген сутектің көлемі бюреткадан ығыстырылған судың көлемі бойынша анықталды. Қышқылды сулы ерітінділерге натрий хлоридін қосқанда, алюминий бетінің оксидтік қабықшасы бұзылып, оның сумен әрекеттесуі орын алды. Хлорид-иондардың әсерінен алюминийдің локалды еруі нәтижесінде кеуекті және біртекті емес бет қалыптасып, сутектің бөліну қарқындылығы едәуір артты. Фосфор қышқылының 1-7 моль·л$^{-1}$ концентрацияларында сутектің бөліну жылдамдығы 8 мл·сағ$^{-1}$·см$^{-2}$-ден аспайды, алайда натрий хлоридін (25 г·л$^{-1}$) қосқанда ол 50,02 мл·сағ$^{-1}$·см$^{-2}$-ге дейін өсіп, 6,25 есе артатыны анықталды. Күкірт қышқылының 0,5-2,5 моль·л$^{-1}$ концентрацияларында натрий хлориді бар ортада сутектің бөліну жылдамдығы 25,27-ден 108,38 мл·сағ$^{-1}$·см$^{-2}$-ге дейін өсіп, шамамен 5 есе артады. Сонымен, натрий хлориді қосылған қышқылды сулы ерітінділерде бөлме температурасында алюминий бетінде сутек алу мүмкіндігі көрсетілді. Алюминий бетін белсенділендірудің ұсынылып отырған әдісі арзан, әрі қолжетімді реагенттерді қолдануға негізделген, оның арасында алюминий сынықтарын пайдалану арқылы автономды сутек өндіру жүйелерін дамыту үшін перспективалы болып табылады.*

Түйін сөздер: *алюминий, сутек, жылдамдық, фосфор қышқылы, натрий хлориді, күкірт қышқылы*

Кіріспе

Бүгінгі таңда сутектік энергетикаға қызығушылықтың бүкіл әлем бойынша жоғары деңгейде артуын соңғы жылдардағы жарияланымдар көрсетеді. Мысалы, Arsad A.Z. және т.б. шолуында [1] HydESS жүйелерінің жаңартылатын энергия көздерімен біріктірілгендегі энергетикалық тұрақтылықтағы рөлі көрсетіліп, негізгі зерттеу бағыттары айқындалған. Басқа әдебиет көздерінде [2-5] сутектік энергетиканың маңыздылығы сипатталған. Солардың арасында [2, 3] Scopus деректері негізінде сутек энергетикасы мен сутекті сақтау саласындағы жаһандық ғылыми үрдістерге библиометриялық талдаулар жасалған. Бір авторлар [4] сутектік энергетиканы дамыту жолындағы қиындықтарды атап өтсе, басқалары [5] энергияның бұл

©А.К. Баешова, С. Молайган, А.Б. Баешов, Р.М. Есетов, Б. Леска, 2026

түрінің әлеуметтік маңызына тоқтаған. Сутектің қолдану аясының кеңдігі жылдан-жылға артып келетіні туралы деректер де әдебиетте көп кездеседі. Мысалы, мына зерттеулерде [6-8] сутек қозғалтқыштарының дамуы, оларды қолданудағы негізгі қиындықтар және нөлдік көміртек шығарындыларына жетудегі әлеуеті қарастырылған. Жаңадан шыққан еңбектерде де сутекке байланысты өзекті мәселелер назардан тыс қалмаған. Сутекті сақтау мен тасымалдаудың құнын төмендету үшін әртүрлі технологиялардың технико-экономикалық тиімділігі салыстырмалы түрде талданған [9].

Сутектік энергетиканы дамытуда сутек газын алу әдістерін жасау және және жетілдіру өзекті мәселелердің бірі болып табылады. Біз жариялаған шолуларда [10, 11] сутек алудың барлық әдістерін сипаттаған болатынбыз. Әдебиет көздерін зерттеу және талдау нәтижесінде сутекті металл ұнтақтарын немесе олардың құймаларын, әсіресе алюминийді, сумен әрекеттестіру арқылы алу, көңіл қоярлық мәселе екеніне көзіміз жеткен. Алюминийдің бетінде оксидтік қабаттың болуына байланысты, оның сумен әрекеттесу реакциясы әдеттегі жағдайларда жүрмейтіні белгілі. Сол себептен, әрқашан алюминий бетіндегі оксидтік қабатты жойып, оның бетін белсенділендіріп отыру қажет. Осы орайда, әдебиетте алюминий бетін белсенділендіру мүмкіндіктері қарастырылған. Мысалы, сулы-сілтілі ертінділермен, жоғары температура немесе жоғары қысымдарды пайдалану арқылы, галий-индий құймаларын қолдану сияқты әдістерді пайдалану жөнінде мәліметтер кездеседі [12].

Сонымен бірге бастапқы шикізат ретінде алюминийдің майдаланған ұнтағын қолдану және оны құрғақ күйде тұз кристалдарымен белсенділендіру, соңынан суда еріту сияқты әдістер де ұсынылған [13]. Бірақ, алюминий ұнтағын алу – процесті күрделендіре түседі, көп сатылылық орын алады және өте майда дисперсті ұнтақтармен реакциялар жүргізу кезінде жылдамдықтың күрт артуы қауіптілікті де арттырады. Ал басқа зерттеушілер, алюминий ұнтақтарын тұзбен белсенділендірумен қатар, реакция кезінде бөлінетін жылуды пайдалануды ұсынады [14]. Алюминий бетін белсенділендіру мәселелеріне арналған шолулар да аз емес. Ол еңбектерде сілті ерітінділерін пайдалану, шар диірменінде ұнтақталған алюиминийге хлоридтерді қосу сияқты әдістер сипатталған және олардың артықшылықтары мен кемшіліктері көрсетілген [15-20]. Мысалы, алюминийдің беттік қабатының сумен әрекеттесудегі ең басты кедергі екенін айта келе, шолу жасаған авторлар [15], келешекте тиімділікті арттыру үшін алюминий сынықтарын пайдалануды ұсынады. Кейбір зерттеулерде [16, 17] судан алюминий арқылы сутек алудың әдістерінің артықшылықтары мен кемшіліктерін қарастырып, салыстырулар келтірілген. Алюминийден жасалған бұйымдарды суықта өндеп, соңынан қыздырылған галий-индий құймасын қосу арқылы да сутек алу ұсынылған [18]. Алюминий ұнтақтарын түрлі вариацияларда, оның арасында, алюминий қалдықтарынан алынған түрін (AWCR) пайдаланып, механикалық жолмен белсенділендіріп, сумен әрекеттестіріп, сутек алуға болатыны көрсетілген [19]. Әдебиетте кездесетін шолуда [20] түрлі тұздар қосып, алюминийдің реакцияға түсу қабілетін жоғарылату үшін оның бетін белсенділендіріп, сутек алуды сипаттаған және экономикалық тұрғыдан талдаулар жасалған. Дегенмен, бұл әдістер экологиялық тұрғыдан қауіпті, оларды іске асыру қиын және қымбатқа түсетіні де баяндалады. Біз бұрынғы жұмыстарымызда [21, 22] алюминий бетін сынап тұзымен белсенділендіру және деполяризатор-материалдарды қолдану арқылы судан сутек алу әдісін іске асырған едік. Бұл әдістерде бөлме температурасында сутек газының бөліну жылдамдығын айтарлықтай жоғарылатуға қол жеткіздік.

Осы жұмыстың негізгі мақсаты алюминий бетін сулы ерітінділерде фосфор қышқылына немесе күкірт қышқылына натрий хлоридін қосу арқылы белсенділендіру және сутек газының бөліну жылдамдығын анықтау болып табылады.

Зерттеу әдістері

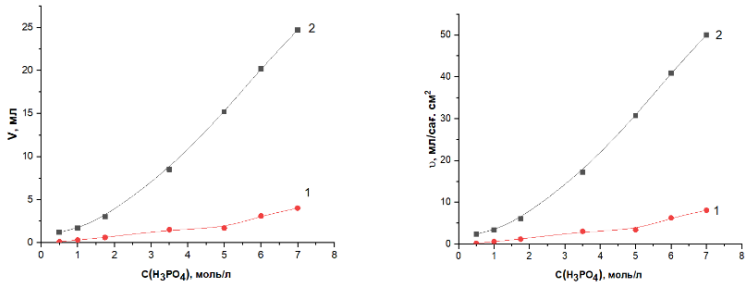
Сулы ерітінділерден сутек алу мақсатында «х.т» маркалы ортофосфор, күкірт қышқылдары, натрий хлориді қолданылды. Қолданылған алюминийдің (пластина түрінде) маркасы А85, тазалығы 99,85%-ке тең. Эксперимент алдында алюминий пластинасы Matrix 1000, содан кейін Mirka Finland 2000 түрпі қағаздарымен тазаланып, сумен шайылып, этил спиртімен сүртіліп, майсыздандырылды. Сутек алу әдісі біздің бұрынғы жұмыстарымызда [21, 22] көрсетілген лабораториялық қондырғыда іске асырылды. Арнайы шкаламен жабдықтандырылған, шыныдан жасалған бюретка аударылып, ерітінді құйылған кең ыдыстың бетіне штатив арқылы орналастырылды. Бұл ыдыстың түбіне алюминий пластинасы орналастырылды. Аударылып, теріс қойылған бюретканың төменгі жағына төңкерілген воронка орналастырылды. Олар су құйылған кең ыдысқа батырылды. Бюретка сумен

толтырылды. Суға фосфор қышқылын және натрий хлоридін қосқан кезде судан сутек бөлінеді де, бюреткаға жиналады, су төмендегі ыдысқа ығыстырылады. Сутек көлемі, ығыстырылған судың көлеміне теңестіріледі. Сутектің көлемін қалыпты жағдайға келтіріп отырдық. Қолданылған алюминий пластинасының бетінің өзгерісін қадағалау мақсатында JSM 6610 LV (JEOL, Жапония) сканерлеуші электронды микроскопта микрофотографиялар түсірілді. Реакция жүргізу барысында алюминий пластинасының потенциалының өзгеруін қадағалау В7-78/2 әмбебап цифрлық вольтметрмен хлор-күміс электродына салыстырмалы түрде іске асырылды.

Барлық тәжірибелер бөлме температурасында (әдетте 25^0C) жүргізілді, температураны реттегіші бар магниттік араластырғыш (OC40-Pro) арқылы бір қалыпта ұстап тұрдық.

Ғылыми нәтижелерді талқылау

Фосфор қышқылы, сатылап диссоциацияланатын, орташа күшке ие электролит болып табылады. Ол сулы ортада, негізінен, бірінші саты бойынша, сутек және дигидрофосфат иондарын түзе диссоциацияланады, тотықтырғыш қасиеті жоқ, металдармен әрекеттескенде, аса жоғары белсенділік танытпайды. Бұл тұжырым алюминийге де қатысты. Біз алюминий пластинасын фосфор қышқылының әртүрлі концентрациялы ерітінділеріне салып, бөлінетін сутек көлемін және сутек бөліну жылдамдығын анықтадық. 1-суретте көрсетілгендей, фосфор қышқылының концентрациясы 1-7 моль/л аралығында өзгертілгенде, сутек өте аз мөлшерде бөлінеді. Тәжірибе 3,5 минут (0,06 сағ.) бойы жүргізілген кезде, бөлінетін сутектің көлемі 4 мл-ден аспады (сурет 1а, 1-қисық) және бұл газдың бөліну жылдамдығы 8 мл/сағ.·см^2-ге дейін ғана жетті (сурет 1ә, 1-қисық). Ал дәл осындай жағдайларда ерітіндіге 25 г/л NaCl қосқан кезде, сутектің қарқынды түрде бөлінгенін байқаймыз. Демек, бұл кезде бөлінетін газдың көлемі 24,7 мл құраған болса (сурет 1а, 2-қисық), жылдамдығы 50,02 мл/сағ.·см^2-ге жетті (сурет 1ә, 2-қисық). Процестің қарқындылығы жуық шамамен 6 есе артқанын көріп отырмыз.



(а) (ә)

т = 0,06 сағ., S (Al) = 8,23 см^2

1 сурет – а) алюминий пластинасында бөлінетін сутек көлеміне фосфор қышқылының концентрациясының әсері; ә) сутектің бөліну жылдамдығына қышқыл концентрациясының әсері. Екі суретте де: 1 қисық – тек фосфор қышқылымен әрекеттесу; 2-қисық – фосфор қышқылына 25 г/л NaCl қосқан кезде

Бұл нәтижелерді түсіндіру үшін алюминийдің пассивтелу механизмін қарастырайық. Әдебиетте келтірілген деректер бойынша, алюминийдің және оның құймаларының пассивтелуі үшін небәрі ең басында жұқа моноқабаттың болуы жеткілікті. Бұрынғы зерттеушілердің пікірі бойынша, пассивтелудің термодинамикалық тұрғыдан аса тиімді процесс екенін ескеретін болсақ, ең соңында бүтін түрде моноқабат түзіледі де, алюминий беті толық пассивацияға ұшырайды. Оксидтік қабаттың қалыптасуына байланысты, алюминий бетіне тотықтырғыштың (су, гидроксил-иондар) жетуі тежеледі де, алюминийдің еруі диффузиялық шектеулермен іске асады. Алюминийдің коррозияға ұшырауы, оның арасында анодтық поляризация кезінде тотығуы, осы процеске қандай қосылыстар немесе факторлар әсер ететіні жөніндегі ғылыми зерттеулер әдебиетте көп кездеседі [23-26].

Біз қолданып жүрген әдеттегі алюминий пластиналары болғандықтан, олар әрқашан оксидтермен қапталған. Сол себепті, сулы ортада алюминийдің еруі аса қиындатылған процесс болып табылады. Ал осы тәжірибемізде фосфор қышқылының сулы ерітінділеріне натрий хлоридін қосқан кезде, алюминий бетіндегі оксидтік қабат бұзылады да, алюминий, электртерістілігі жоғары металл ретінде ($E^o = -1{,}663$ В) ериді (реакция 1).

$$Al \leftrightarrow Al^{3+} + 3e \qquad E^o = -1{,}663\ \text{В} \qquad (1)$$

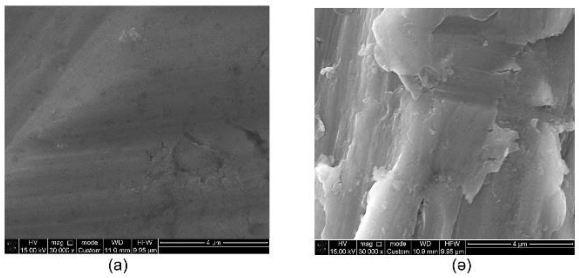
Мұның себебі, ерітіндіге қосылған хлор иондарының рөліне байланысты.Белгілі зерттеулердің кейбіріне сүйенетін болсақ [25], хлорид-иондар классикалық тұрғыдан алюминий бетін белсендірушы болып табылады және оның анодтық еруіне қарқынды түрде ықпалын келтіреді. Қышқылды ортада алюминийдің еруі сутек бөлінуіне (реакция 2) әкелетіні туралы әдебиет көздерінде мәліметтер кездеседі [26].

$$2Al + 6H_3O^+ \rightarrow 2Al^{3+} + 3H_2 + 6\ H_2O \qquad (2)$$

Хлорид-иондардың белсендіргіш әсері металл бетіндігі оксидтік қабаттың тасымалдануымен байланысты және электрод бетінде оттек атомдарын ығыстыра отырып, адсорбциялануымен негізделеді. Депассивация нақты белсендірілген учаскелерде басталады, соңынан бұл процеске басқа да учаскелер тартыла бастайды деген тұжырымдар әдебиетте [27] келтірілген. Пассивацияның белгілі бір фактордың әсерімен бұзылуы белсенділік танытатын қабырғалар арқылы қарқынды түрде орын алады, содан кейін басқа да, белсенділігі төмен болып келетін, қабырғалар процеске түсе бастайды. Мысалы, ерітіндіге хлор иондары енгізілген кезде, алюминийдің пассивтілігін осы хлор иондары бұза бастайды. Хлорид-иондар алдымен пассивті қабаттың бетіне қонады (адсорбцияланады), соңынан осы қабатқа сіңіріледі де, оны бұзады, содан кейін алюминиймен $[AlCl_4]^-$ кешен түзе реакцияға түседі Осы аниондардың пассивтеуші оксидтермен әрекеттесуінің қайтымдылығы жойылады да, локалды түрде түзілген, депассивацияланған нүктелерде питтингтер пайда болады. Содан кейін алюминийдің реакцияға түсуінің де қарқындауы орын алады. Айта кететін мәселе, алюминийдің электрохимиялық жолмен еруі өте жиі зерттелген. Осы зерттеулердегі тұжырымдарды химиялық еруіне де қолданып отырмыз, себебі, металдың сулы ерітінділерде еруі тотығу-тотықсыздану реакциясы ретінде қарастырылады, демек, анодтық еру деп түсіндіріледі.

Алюминийді фосфор қышқылының ерітіндісіне батырған кезде көзге көрінетін сутек газының көпіршіктері байқалмайды. Ал енді осы пластинаның СЭМ микрофотосуреттеріне көңіл бөлсек, 2 а суретте оның беті бір текті, көзге түсетін кеуектер, шұңқырлар байқалмайды. Фосфор қышқылының күші орташа екенін және алюминий фосфатының аз еритінін ескерсек, алюминий бастапқы кезде аз ериді де, оның иондары фосфат иондарымен әрекеттеседі деп тұжырымдауға болады. Сол кезде түзілген алюминий фосфаты пластина бетін айтарлықтай пассивтейді де, реакция өте баяу жүреді. 1 а, ә-суреттерде алюминийде бөлінетін сутек газының көлемінің және оның бөліну жылдамдығының өсуі фосфор қышқылының концентрациясына байланысты көрсетілген.

Ал алюминийді фосфор қышқылының натрий хлориді қосылған ерітіндісіне батырғаннан кейінгі микрофотосуретте (сурет 2 ә) пластина бетінің айтарлықтай өзгерістерге ұшырағанын көруге болады. Алюминий бетінде оның локалды түрде еруінің нәтижесінде түзілген терең шұңқырлар мен кратерлер, терең жолақтар кеуекті және бір текті емес беттік аудан – қарқынды ерудің нәтижелерін байқатады. Фосфор қышқылы ерітіндісіне натрий хлоридін қосқан кезде, алюминидің бетіндегі оксидтік пленканың бұзылуын және бұл металдың қарқынды түрде еруін оның потенциалының теріс мәндер аумағына ығысуы да дәлелдейді. Хлор-күміс салыстырмалы электодын пайдаланып, В7-78/2 әмбебап вольтметр көмегімен өлшенген потенциал мәндері алюминий потенциалының -1,062 В-тен -1,264 В-ке дейін өзгергенін көрсетеді. Бұл өлшеулер 7М H_3PO_4 ерітіндісінде жүргізілді (температура 25^0C).



Сурет 2 – Алюминийдің беттік қабатының 30 000 есе үлкейтілген СЭМ фотосуреті
а – фосфор қышқылының ерітіндісіне батырылғаннан кейін кептірілген күйі; ә – фосфор қышқылына натрий хлориді қосылған ерітіндіге батырылғаннан кейін кептірілген күйі

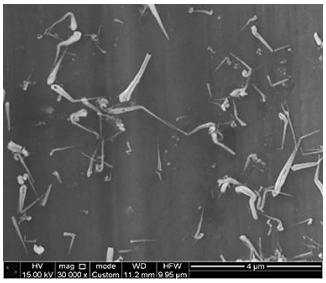
Сутек бөліну реакциясын алюминий пластинасында күкірт қышқылында да жүргіздік. Әрине, бұл қышқылда алюминий әдеттегі жағдайларда ерімейтіні белгілі. Ал біз жүргізген зерттеулерде күкірт қышқылына NaCl қосып, сутек бөліну жылдамдығын есептеген кезде, сутек қарқынды түрде бөлінетіні анықталды.

1-кестеден көрініп тұрғандай, алюминий күкіртқышқылды ортамен NaCl қатысында қарқынды түрде, сутек бөле, әрекеттеседі. Сутек бөліну жылдамдығы күкірт қышқылының 0,5-2,5 моль/л-ге тең концентрацияларының интервалында айтарлықтай артады да, содан кейін аздап, кеми бастайды.

Кесте 1 – Алюминийдің күкірт қышқылы ерітіндісімен NaCl қатысында әрекеттесуі кезінде бөлінетін сутек көлемі және оның бөліну жылдамдығы: т = 0,05сағ., C(NaCl) = 25 г/л, S(Al) = 8,23 см^2

C(H_2SO_4), моль/л	NaCl қатысында бөлінетін сутек көлемі, мл	NaCl қатысында сутек бөліну жылдамдығы, мл/сағ·см^2
0.5	10.4	25.27
1.0	24.7	60.02
1.5	36.4	88.45
2.0	45.3	110.08
2.5	52.1	126.60
3.0	44.6	108.38

Алюминийді натрий хлориді қосылған аз концентрациялы күкірт қышқылына батырғаннан кейінгі СЭМ фотосуретке (сурет 3) көңіл бөлсек, хлор иондарының қарқынды түрде алюминий бетінің пассивтілігін бұзатыны, реакцияның қарқынды түрде жүретіні расталады.



Сурет 3 – Алюминийдің беттік қабатының 30 000 есе үлкейтілген СЭМ фотосуреті: күкірт қышқылына натрий хлориді қосылған ерітіндіге батырылғаннан кейін кептірілген күйі

Қорытынды

Келтірілген тәжірибелердің нәтижелері лабораториялық жағдайда, бөлме температурасында қарапайым қондырғыда алюминий пластинасында сулы ерітінділерден сутек бөліну мүмкіндігін көрсетті. Әдетте суда пассивацияға ұшырайтын алюминий, натрий хлориді қосылған фосфор немесе күкірт қышқылының сулы ерітіндісінде, сутек бөле, қарқынды түрде еритіні анықталды. Осылай, әдетте өте пассивті болып табылатын, алюминийдің бетін белсенділендіру мүмкіндігі көрсетілді. Хлор иондарының қарқынды түрде алюминий бетінің пассивтілігін бұзатыны, шұңқырлық коррозия орын алатыны, питтингтер түзілетіні, сутек бөліну реакциясы жүретіні көрсетілді. Алюминий бетін белсенділендірудің ұсынылып отырған әдісі арзан, әрі қолжетімді реагенттерді қолдануға негізделген, оның арасында алюминий сынықтарын пайдалану арқылы автономды сутек өндіру жүйелерін дамыту үшін перспективалы болып табылады.

Әдебиеттер тізімі

1. Hydrogen energy storage integrated hybrid renewable energy systems: A review analysis for future research directions / A.Z. Arsad et al // Inter. Jour. of Hydro. Ener. – 2022. – № 47(39). – P. 17285-17312. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.03.208.

2. Ozsari I. Trend analysis and evaluation of hydrogen energy and hydrogen storage research / I. Ozsari // Ener. Storage. – 2023. – № 5(6). – P. e471. https://doi.org/10.1002/est2.471.

3. Sustainability and challenges in hydrogen production: An advanced bibliometric analysis / B.D. Catumba et al // Inter. Jour. of Hydro. Ener. – 2023. – № 48(22). – P. 7975-7992. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.11.215.
4. Fueling the future: A comprehensive review of hydrogen energy systems and their challenges / T.T. Le et al // Inter. Journ. of Hydro. Ener. – 2024. – № 54. – P. 791-816. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.08.044.
5. Socio-economic aspects of hydrogen energy: An integrative review / G.D. Sharma et al // Techno. Forecast. and Soc. Change. – 2023. – № 192. – P. 122574. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122574.
6. Hydrogen engine operation strategies: Recent progress, industrialization challenges, and perspectives / Z. Sun et al // Inter. Jour. of Hydro. Ener. – 2023. – № 48(1). – P. 366-392. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.09.256.
7. Evro S. Carbon neutrality and hydrogen energy systems / S. Evro, B.A. Oni, O.S. Tomomewo // Inter. Jour. of Hydro. Ener. – 2024. – № 78. – P. 1449-1467. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.06.407.
8. Sustainable hydrogen energy in aviation–A narrative review / T. Yusaf et al // Inter. Jour. of Hydro. Ener. – 2024. – № 52. – P. 1026-1045. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.02.086.
9. Research on Storage and Transportation Cost Control and Technological Breakthroughs from the Perspective of Global Hydrogen Energy Development / Y. Gu et al // Jour. of Sust. Built Environ. – 2025. – № 2(5). – P. 33-38. https://doi.org/10.70731/9ygthr89.
10. Baeshova A.K. Sutekti sudan aludyn keibir belgili zhane zhana adisterinin salystyrmaly sipattamasy / A.K. Baeshova, S. Molajgan, A.B. Baeshov // Vest. KazNPU im. Abaya, Estestv. – geogr. Nauki. – 2018. – № 2 (56). – P. 22-27.
11. Bayeshova A.K. Hydrogen energetics current state and hydrogen production methods / A.K. Bayeshova, S. Molaigan, A.B. Bayeshov // Izv. NAN RK. Ser. Him. i Tekh. – 2018. – № 5. – P. 107-116. https://doi.org/10.32014/2018.
12. Milinchuk V.K. Avtonomnyj generator vodoroda na osnove himicheskogo razlozheniya vody alyuminiem / V.K. Milinchuk, E.R. Klinshpont, V.I. Belozerov // Izv. Vys. Uch. Zav. Yader. Ener. – 2015. – № 2. – P. 49-59.
13. Alinejad B. A novel method for generating hydrogen by hydrolysis of highly activated aluminum nanoparticles in pure water / B. Alinejad, K. Mahmoodi // Inter. Jour. of Hydro. Ener. – 2009. – № 34(19). – P. 7934-7938. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.07.028.
14. Mahmoodi K. Enhancement of hydrogen generation rate in reaction of aluminum with water / K. Mahmoodi, B. Alinejad // Inter. Jour. of Hydro. Ener. – 2010. – № 35(11). – P. 5227-5232. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.03.016.
15. An overview of hydrogen production from Al-based materials / L. Sun et al // Nanotech. Rev. – 2023. – № 12(1). https://doi.org/10.1515/ntrev-2022-0521.
16. Kaur P. A critical assessment of aluminum-water reaction for on-site hydrogen-powered applications / P. Kaur, G. Verma // Mat. Today Ener. – 2024. – № 40. – P. 101-508. https://doi.org/10.1016/j.mtener.2024.101508.
17. Bolt A. A review of unique aluminum–water based hydrogen production options / A. Bolt, I. Dincer, Agelin-Chaab // Energy & Fuels. – 2021. – № 35(2). – P. 1024-1040.
18. Activation of bulk aluminum and its application in a hydrogen generator / J.T. Slocum et al // Applied Energy. – 2020. – № 279. – P. 115-712.
19. Hydrogen production via activated waste aluminum cans and its potential for methanation / S.T. Lim et al // Energy & Fuels. – 2021. – № 35(19). – P. 16212-16221.
20. Kumar D. An overview on activation of aluminium-water reaction for enhanced hydrogen production / D. Kumar, K. Muthukumar // Jour. of Alloys and Comp. – 2020. – T. 835. – P. 155-189.
21. Bayeshova A. Obtaining Hydrogen by Aluminium interaction with water / A. Bayeshova, A. Bayeshov, S. Molaigan // Jour. of Chem. Tech. and Met. – 2019. – № 3(54). – P. 639-642.
22. Rol' depolyarizatorov v processah vydelenya vodoroda iz vody na poverhnosti amal'gamy alyuminiya / A. Bayeshov et al // News of the of Sci. of the RK. JSC «D. V. Sokolsky institute of Fuel, catalysis fnd Electrochemistry», series Chemistry and Technology. – 2023. – № 1(454). – P. 15-26. https://doi.org/10.32014/2023.2518-1491.144.

23. Gordeeva E.O. Effektivnost' formirovaniya poristyh oksidnyh plenok pri anodnom okislenij alyuminiya / E.O. Gordeeva, I.V. Roslyakov, A.I. Sadykov // Elektrohimiya. – 2018. – № 54(11). – P. 999-1009.
24. Takahashi H. Role of anodic oxide films in the corrosion of aluminum and its alloys / H. Takahashi, M. Chiba // Corr. Rev. – 2018. – № 36(1). – P. 35-54.
25. Anodnoe rastvorenie alyuminiya v rastvorah hlorida litiya I phiziko-himicheskie svoistva produktov ego rastvoreniya / L.R. Salemgaraeva i dr. // Vest. Tekhn. Univ. – 2018. – № 21(7). – P. 33-36.
26. Vliyanie anionov na elektrohimicheskoe povedenie alyuminiya v rastvorah solei / I.O. Grigor'evna et al // Vest. Tekhn. Univ. – 2018. – № 21(7). – P. 46-50.
27. Grigor'yeva I.O. Vliyaniye khlorid-ionov na elektrokhimicheskoye rastvoreniye i anodnuyu aktivatsiyu alyuminiya v vodnykh sredakh / I.O. Grigor'yeva, A.F. Dresvyannikov, L.R. Khayrullina // Vest. Tekhn. Univ. – 2014. – № 17(5). – P. 246-250.

А.К. Баешова[*], С. Молайган[1], А.Б. Баешов[1], Р.М. Есетов[1], Б. Леска[2]
[1]Центр физико-химических методов анализа,
Казахский Национальный Университет имени аль-Фараби,
050040, Республика Казахстан, г. Алматы, проспект аль-Фараби, 71
[2]Университет имени Адам Мицкевича,
61–614, Польша, Познань, ул. Uniwersytetu Poznanskiego, 8
[*]e-mail: azhar_b@bk.ru

ВЛИЯНИЕ СРЕДЫ НА РЕАКЦИЮ ВЫДЕЛЕНИЯ ВОДОРОДА НА АЛЮМИНИЕВОЙ ПЛАСТИНЕ В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ

Разработка альтернативных и эффективных способов получения водорода является актуальной научно-технической задачей. Перспективным подходом является получение водорода при взаимодействии алюминия с водой; однако протеканию реакции при обычных условиях препятствует наличие устойчивой оксидной плёнки на поверхности алюминия. Целью настоящей работы является активация поверхности алюминия путём введения хлорида натрия в водные растворы фосфорной или серной кислот и определение скорости выделения водорода. Экспериментальные исследования проводились с использованием фосфорной и серной кислот, хлорида натрия химической чистоты и алюминия марки А85. Получение водорода осуществлялось в лабораторных условиях на градуированной стеклянной установке бюреточного типа. Объём выделившегося водорода определяли по объёму вытесненной воды. Добавление хлорида натрия в кислые водные растворы приводило к разрушению оксидного слоя на поверхности алюминия и инициировало его взаимодействие с водой. Локальное растворение алюминия под действием хлорид-ионов вызывало формирование пористой и неоднородной поверхности, что существенно повышало скорость выделения водорода. В растворах фосфорной кислоты при концентрациях 1-7 моль·л$^{-1}$ скорость выделения водорода не превышала 8 мл·ч$^{-1}$·см$^{-2}$, однако при добавлении хлорида натрия (25 г·л$^{-1}$) возрастала до 50,02 мл·ч$^{-1}$·см$^{-2}$, увеличиваясь в 6,25 раза. В растворах серной кислоты (0,5-2,5 моль·л$^{-1}$) в присутствии хлорида натрия скорость выделения водорода возрастала от 25,27 до 108,38 мл·ч$^{-1}$·см$^{-2}$, что соответствует увеличению примерно в 5 раз. Таким образом, показана возможность получения водорода на алюминиевой поверхности при комнатной температуре из кислых водных растворов с добавлением хлорида натрия. Предложенный подход основан на использовании недорогих и доступных реагентов и может быть перспективным для автономных систем получения водорода, в том числе с использованием алюминиевого лома.

Ключевые слова: *алюминий, водород, скорость выделения, фосфорная кислота, хлорид натрия, серная кислота*

A.K. Bayeshova[*], S. Molaigan[1], A. Bayeshov[1], R.M. Esetov[1], B. Leska[2]
[1]Center of Physico-Chemical Methods of Research and Analysis,
Al-Farabi Kazakh National University,
050040, Republic of Kazakhstan, Almaty, 71 al-Farabi Avenue
[2]Adam Mickiewicz University,
61-614, Poland, Poznan, Uniwersytetu Poznanskiego, 8
[*]e-mail: azhar_b@bk.ru

THE INFLUENCE OF THE MEDIUM ON THE HYDROGEN EVOLUTION REACTION ON AN ALUMINIUM PLATE IN AQUEOUS SOLUTIONS

The development of alternative and efficient hydrogen production routes remains a critical scientific and technological challenge. One promising approach involves hydrogen generation from water through its interaction with aluminum; however, the presence of a stable oxide layer on the aluminum surface inhibits the reaction under ambient conditions. This study aims to activate the aluminum surface by introducing sodium chloride into aqueous solutions of phosphoric and sulfuric acids and to quantify the hydrogen evolution rate. Experiments were conducted using phosphoric and sulfuric acids, chemical-grade sodium chloride, and A85 aluminum. Hydrogen production was carried out under laboratory conditions using a calibrated glass burette-type setup. The volume of evolved hydrogen was determined by measuring the volume of water displaced from the burette. The addition of sodium chloride to acidic aqueous solutions resulted in the destruction of the aluminum oxide layer and initiated aluminum-water interaction. Localized dissolution induced by chloride ions led to the formation of a porous and heterogeneous surface, significantly enhancing hydrogen evolution. In phosphoric acid solutions (1-7 mol·L^{-1}), the hydrogen evolution rate remained low (up to 8 mL·h^{-1}·cm^{-2}); however, upon addition of sodium chloride (25 g·L^{-1}), the rate increased to 50.02 mL·h^{-1}·cm^{-2}, representing a 6.25-fold enhancement. In sulfuric acid solutions (0.5-2.5 mol·L^{-1}) containing sodium chloride, the hydrogen evolution rate increased from 25.27 to 108.38 mL·h^{-1}·cm^{-2}, corresponding to an approximately fivefold increase. Thus the results demonstrate the feasibility of hydrogen generation on aluminum surfaces at room temperature using acidic aqueous solutions supplemented with sodium chloride. The proposed activation approach relies on inexpensive and readily available reagents and shows potential for autonomous systems hydrogen production, including applications based on aluminum scrap.

Key words: *aluminum, hydrogen, release rate, phosphoric acid, sodium chloride, sulfuric acid.*

Авторлар туралы мәліметтер

Ажар Коспановна Баешова* – техника ғылымдарының докторы, профессор, Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, физика-химиялық зерттеу және талдау орталығы; e-mail: azhar_b@bk.ru.

Сержан Молайган – PhD-докторант, Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, физика-химиялық зерттеу және талдау орталығы; e-mail: molaiganserjan@gmail.com.

Абдуали Баешов – химия ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, физика-химиялық зерттеу және талдау орталығы; e-mail: bayeshov@mail.ru.

Расул Мұратбайұлы Есетов – химия және химиялық технология факультетінің 3 курс студенті, Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, физика-химиялық зерттеу және талдау орталығы; e-mail: rasulesetov17@gmail.com.

Богуслава Леска – профессор, ғылым докторы, [2]Адам Мицкевич университеті; e-mail: boguslava.leska@amu.edu.pl.

Сведения об авторах

Ажар Коспановна Баешова* – Доктор технических наук, профессор, Центр физико-химических методов анализа, Казахский Национальный Университет имени аль-Фараби; e-mail: azhar_b@bk.ru.

Сержан Молайган – PhD-докторант, Центр физико-химических методов анализа, Казахский Национальный Университет имени аль-Фараби; e-mail: molaiganserjan@gmail.com.

Абдуали Баешов – Доктор химических наук, профессор, академик НАН РК, Центр физико-химических методов анализа, Казахский Национальный Университет имени аль-Фараби; e-mail: bayeshov@mail.ru.

Расул Мұратбайұлы Есетов – студент факультета химии и химической технологии, Центр физико-химических методов анализа, Казахский Национальный Университет имени аль-Фараби; e-mail: rasulesetov17@gmail.com.

Богуслава Леска – профессор, доктор наук, Университет имени Адам Мицкевича; e-mail: boguslava.leska@amu.edu.pl.

Information about the authors

Azhar Bayeshova* – Doctor of Technical Science, Professor, Center of Physico-Chemical Methods of Research and Analysis, Al-Farabi Kazakh National University; e-mail: azhar_b@bk.ru.

Syerjan Molaigan – PhD-doctoral student, Center of Physico-Chemical Methods of Research and Analysis, Al-Farabi Kazakh National University; e-mail: molaiganserjan@gmail.com.

Abduali Bayeshov – Doctor of Chemical Science, Professor, Academician of the National Academy of Sciences of the Republic Kazakhstan; e-mail: bayeshov@mail.ru.

Rasul Muratbayuly Esetov – Student of the Faculty of Chemistry and Chemical Technology; e-mail: rasulesetov17@gmail.com.

Boguslawa Leska – Professor, dr.habilitation, Adam Mickiewicz University; e-mail: boguslava.leska@amu.edu.pl.

Редакцияға енуі 08.10.2025
Өңдеуден кейін түсуі 09.01.2026
Жариялауға қабылданды 02.02.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-67

МРНТИ: 61.01.91

BY 4.0
Check for updates

С.А. Батырбай*, О.К. Бейсенбаев[1], А.С. Сидиков[2], Н.М. Дауренбек[1]
[1]Южно-Казахстанский университет им. М. Ауезова
160012, Республика Казахстан, г. Шымкент, проспект Тауке хана, 5
[2]Филиал Российского государственного университета нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина в городе Ташкент,
Республика Узбекистан, г. Ташкент, ул. Дурмон йули, 34
*symbat_batyrbay@mail.ru

МОДИФИКАЦИЯ ГУДРОНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГОССИПОЛОВОЙ СМОЛЫ И ВТОРИЧНОГО ПОЛИПРОПИЛЕНА

Аннотация: *В современных условиях особое внимание уделяется разработке экологичных и долговечных вяжущих материалов, получаемых с применением вторичных и возобновляемых ресурсов. Одним из перспективных направлений является модификация нефтяных вяжущих природными и полимерными компонентами, способными улучшать их эксплуатационные характеристики. В настоящем исследовании проведено модифицирование гудрона смесью госсиполовой смолы и вторичного полипропилена (ВПП) при участии персульфата калия ($K_2S_2O_8$), выполняющего функцию инициатора радикальных процессов. Применение методов ИК-Фурье-спектроскопии и растровой электронной микроскопии позволило установить образование новых функциональных групп, повышение степени полярности вяжущего и более равномерное распределение полимерной фазы в его структуре. Проведённые испытания показали улучшение адгезионных, термических и деформационных свойств модифицированного материала по сравнению с исходным гудроном. Повышение структурно-механической прочности и стабильности к старению свидетельствует о синергетическом эффекте между госсиполовой смолой и ВПП. Разработанная технология демонстрирует эффективность утилизации отходов хлопкоперерабатывающей промышленности и пластика, что открывает возможности для создания устойчивых, высококачественных и конкурентоспособных вяжущих систем с пониженными экологическими рисками и расширенными областями применения, включая дорожное строительство, гидроизоляционные покрытия, промышленные смеси и инновационные композитные материалы для строительной отрасли.*

Ключевые слова:*гудрон, госсиполовая смола, вторичный полипропилен,персульфат калия,ИК-спектроскопия, растровая электронная микроскопия.*

Введение

Полимерное модифицирование битумных вяжущих позволяет существенно повысить их эксплуатационные качества, включая сопротивляемость колееобразованию, растрескиванию и улучшение адгезии к минеральным заполнителям [1, 2]. Однако использование первичных полимеров сопровождается ростом себестоимости и оказывает неблагоприятное воздействие на окружающую среду [3]. Одним из рациональных направлений считается применение возобновляемых и вторичных источников полимерного сырья, в частности переработанного полипропилена (ВПП), широко встречающегося в составе твёрдых бытовых отходов [4-6].

Особый интерес представляет использование природной госсиполовой смолы – побочного продукта переработки хлопкового сырья, содержащего активные фенольные и альдегидные группы, способствующие химическому взаимодействию с битумной матрицей [7, 8]. Совмещение госсиполовой смолы с ВПП обеспечивает образование структурированных композиций, сочетающих эластичность полимера и полярность смолы, что повышает совместимость компонентов [9].

Для активации межфазного взаимодействия и устранения несовместимости между полимерной и битумной фазами применяют инициаторы радикальных реакций, такие как персульфат калия ($K_2S_2O_8$) [10-12]. При его термическом разложении образуются сульфат-радикалы, способные инициировать процессы прививки и функционализации макромолекул

©С.А. Батырбай, О.К. Бейсенбаев, А.С. Сидиков, Н.М. Дауренбек, 2026

полипропилена, что приводит к улучшению адгезионных свойств, повышению гомогенности и устойчивости полученного материала [13].

Таким образом, комбинированное использование госсиполовой смолы, переработанного полипропилена и персульфата калия представляет собой перспективное направление для разработки экологичных и долговечных битумных композиций.

Условия и методы исследования

В качестве исходного вяжущего применялся нефтяной гудрон, полученный из остаточных фракций нефтепереработки. Для модификации использовались две добавки: госсиполовая смола и вторичный полипропилен (ВПП), введённые в количестве 5% от массы битумного материала. Для активации химических превращений и инициирования радикальных реакций в систему добавлялся персульфат калия ($K_2S_2O_8$) в дозировке 0,5-1 %.

Процесс модификации осуществлялся методом расплавного смешения. Компоненты последовательно загружались в предварительно разогретый гудрон при температуре 180-200°С. Смесь перемешивалась в лабораторном смесителе в течение 45-60 мин до достижения однородной консистенции. После окончания смешения образцы выдерживались при комнатной температуре не менее 24 ч, что обеспечивало стабилизацию структуры и завершение химического взаимодействия между компонентами.

Для изучения изменений химической структуры применялся метод ИК-Фурье-спектроскопии (FTIR), позволяющий определить появление новых функциональных групп и увеличение степени полярности вяжущего. Анализ микроструктуры и распределения полимера в битумной матрице выполнялся с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ).

Результаты исследований

ИК-спектрыобразца – 1 (рис. 1) показали, что наличие интенсивных полос в области 1050-1215 см$^{-1}$ и 2924 см$^{-1}$ указывает на внедрение цепей вторичного полипропилена в матрицу гудрона. Полосы в области 1396-1590 см$^{-1}$ подтверждают присутствие ароматических и азотсодержащих структур, связанных с госсиполовой смолой. Сохранение широкого диапазона деформационных колебаний (507-812 см$^{-1}$) свидетельствует о стабильной ароматической основе битумной матрицы. Присутствие персульфата калия, по-видимому, способствовало частичному окислению, что отражается в усилении полос С–О и С–О–С (1050-1215 см$^{-1}$). По результатам ИК-спектроскопии установлено, что модификация гудрона госсиполовой смолой и вторичным полипропиленом в присутствии персульфата калия сопровождается изменением спектральных характеристик.

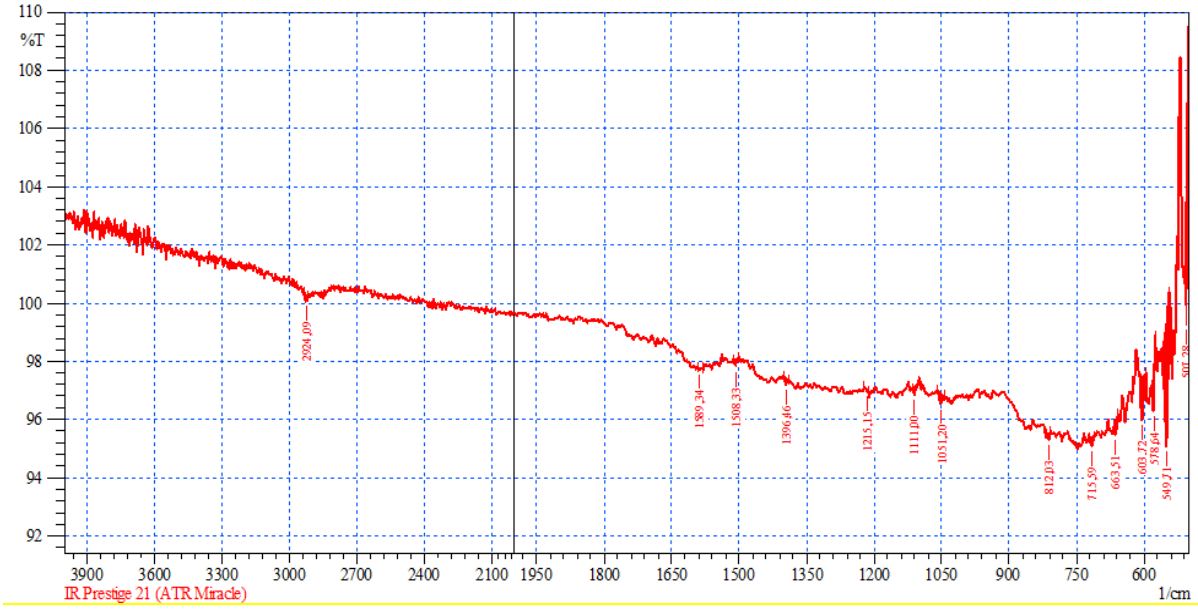


Рисунок 1 – ИК-Фурье спектроскопия модифицировонного гудрона

РЭМ-анализ. По результатам растровой электронной микроскопии (рис. 2) модифицированного гудрона установлено, что основным элементом является углерод (88,31%), что подтверждает органическую природу материала. Повышенное содержание

кислорода (10,62%) связано с процессами окислительной модификации при введении госсиполовой смолы и вторичного полипропилена в присутствии персульфата калия. Присутствие серы (1,07%) отражает участие инициатора и возможное образование сульфоксидных и сульфоновых групп. Полученные данные свидетельствуют об успешном протекании реакции модификации и формировании функционализированной структуры вяжущего.

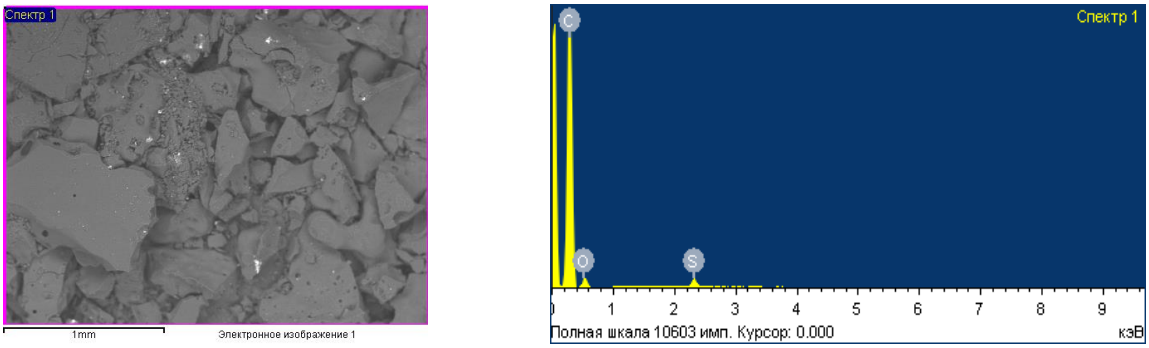


Рисунок 2 – Результаты растровой электронной микроскопии модифицировонного гудрона

Обсуждение научных результатов

Анализ экспериментальных данных показал, что введение госсиполовой смолы и вторичного полипропилена в состав нефтяного гудрона при применении персульфата калия в качестве инициатора вызывает существенные изменения в его структуре и химическом составе. По данным ИК-Фурье спектроскопии отмечено появление новых полос поглощения, соответствующих связям С–О и С–О–С, что свидетельствует о формировании кислородсодержащих функциональных групп и реализации реакций радикальной модификации. Повышение интенсивности сигналов в области 1400-1600 $см^{-1}$ указывает на участие ароматических и фенольных фрагментов госсиполовой смолы, способствующих увеличению полярности и химической активности системы [14, 15].

Результаты растровой электронной микроскопии показали равномерное распределение полимерных включений в битумной матрице и отсутствие выраженной фазовой неоднородности, что свидетельствует о хорошей совместимости компонентов [16, 17]. Элементный анализ подтвердил увеличение содержания кислорода и серы, что связано с процессами окислительной модификации и взаимодействием с инициатором. Полученные результаты демонстрируют, что взаимодействие госсиполовой смолы, вторичного полипропилена и битумной основы приводит к формированию стабильной полимерно-битумной структуры с улучшенными эксплуатационными характеристиками [18, 19].

Таким образом, комбинированная модификация гудрона природными и вторичными компонентами позволяет не только повысить долговечность и адгезионные свойства вяжущего, но и снизить экологическую нагрузку, что подтверждает перспективность данного направления.

Заключение

Результаты проведённой работы показали, что использование композиции на основе госсиполовой смолы и вторичного полипропилена в присутствии персульфата калия способствует глубокой структурной трансформации нефтяного гудрона. В ходе модификации формируются новые кислородсодержащие группы, что повышает полярность, химическую активность и устойчивость системы. По данным ИК-Фурье спектроскопии и растровой электронной микроскопии установлено, что компоненты взаимодействуют на молекулярном уровне, обеспечивая равномерное распределение полимера и повышение однородности битумной матрицы. Таким образом, предложенный подход демонстрирует возможность эффективного использования природных и вторичных ресурсов для получения экологичных, долговечных и экономически целесообразных вяжущих материалов.

Список литературы

1. Shafabakhsh G. Using Waste Plastics as Asphalt Modifier: A Review / G. Shafabakhsh, M. Sadeghnejad, M. Karami // Materials. – 2022. – Vol. 15, № 14. – P. 8112.

2. Ariyawansa C. Using Waste Plastics as Asphalt Modifier: A Review / C. Ariyawansa, S. Sirisomboonchai, Y. Zhou // International Journal of Pavement Research and Technology. – 2022. – Vol. 15. – Article 8745802.
3. Li H. A chemical method to upcycle waste polypropylene into bitumen modifiers / H. Li, X. Zhang, Q. Yang // Journal of Cleaner Production. – 2025. – Vol. 457. – P. 141239.
4. Saeed K. Recycled Polymer Modified Bitumen for Road Construction / K. Saeed, M. Raza, N. Ali // International Journal of Engineering Research and Applications. – 2023. – Vol. 13, № 4. – P. 45-53.
5. Mohammed S. Recycling micro polypropylene in modified hot asphalt mixture / S. Mohammed, M. El-Basyouny, K. Omar // Scientific Reports. – 2023. – Vol. 13. – Article 30857.
6. Yernazarov E. Modified Bitumen Materials from Kazakhstani Oilfield / E. Yernazarov, L.L. Frolova, R.V. Silva // Advances in Polymer Technology. – 2024. – Vol. 43, № 2. – P. 112-121.
7. Abbas M. The nutritional and industrial significance of cottonseeds and gossypol / M. Abbas, A. Ibrahim, H. Chen // Plant Phenome Journal. – 2023. – Vol. 6. – Article e10433.
8. Niu X. The potential roles of gossypol as anticancer agent / X. Niu, J. Zhang, Y. Liu // Frontiers in Pharmacology. – 2024. – Vol. 15. – Article 10722855.
9. Gulomov Sh.T. Researches of process of reception of anticorrosive materials and building bitumens on the basis of gossypol resin / Sh.T. Gulomov, Kh.Z. Rajapbayev // Zamonaviy fan ta'lim va tarbiya jurnali. – 2018. – № 1. – P. 112-118.
10. Kumar V. Radiation and Radical Grafting Compatibilization of Polymers for Improved Bituminous Binders / V. Kumar, A. Patel, R. Singh // Polymer Bulletin. – 2024. – Vol. 81, № 9. – P. 4112-4127.
11. Bhattacharyya A. Grafting: a versatile means to modify polymers / A. Bhattacharyya. – Famagusta: Eastern Mediterranean University, 2017. – 32 p.
12. Rao K.R. Studies on $K_2S_2O_8$/Ascorbic acid initiated synthesis and grafting / K.R. Rao, A. Sharma, M. Khan // YMER Journal. – 2021. – Vol. 20, № 3. – P. 153-160.
13. Liu B. Solid-state hydroxylation of polypropylene initiated by potassium persulfate / B. Liu, P. Zhou, Y. Wang // Macromolecular Research. – 2025. – Vol. 33, № 5. – P. 712-721.
14. Oxidative Modification of Bitumen with Natural Resins / X. Li et al // Fuel. – 2022. – Vol. 320. – P. 124-138.
15. Effect of Bio-based Additives on Bitumen Rheology and Structure / R.A. Al-Mansob et al // Materials Today Communications. – 2020. – Vol. 25. – P. 101-136.
16. Morphological Characterization of Polymer-Modified Asphalt Binders / J. Zhang et al // Construction and Building Materials. – 2019. – Vol. 229. – P. 116-147.
17. Gawel I. The Role of Polymer Distribution in Bitumen Compatibility / I. Gawel, F. Czechowski // Fuel Processing Technology. – 2018. – Vol. 176. – P. 150-158.
18. Sustainable Asphalt Using Recycled Polymers and Natural Additives / M.S. Sureshkumar et al // Journal of Materials Research and Technology. – 2020. – Vol. 9(6). – P. 13688-13700.
19. Performance Enhancement of Asphalt Binder via Radical Grafting / H. Wang et al // Polymer Degradation and Stability. – 2021. – Vol. 183. – P. 109-121.

С.А. Батырбай[1*], О.К. Бейсенбаев[1], А.С. Сидиков[2], Н.М. Дауренбек[1]
[1]М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті
160012,Қазақстан Республикасы, Шымкент қ., Тәуке хан даңғылы,5
[2]И.М. Губкин атындағы Ресей мемлекеттік мұнай және газ университетінің филиалы,
Өзбекстан Республикасы, Ташкент қаласы, дурмон йули көшесі, 34
*e-mail: symbat_batyrbay@mail.ru

ГОССИПОЛ ШАЙЫРЫ МЕН ЕКІНШІЛІК ПОЛИПРОПИЛЕН НЕГІЗІНДЕ ГУДРОНДЫ МОДИФИКАЦИЯЛАУ

Қазіргі жағдайда қайталама және жаңартылатын ресурстарды пайдалану арқылы экологиялық таза әрі ұзақ мерзімді байланыстырғыш материалдарды әзірлеуге айрықша назар аударылуда. Перспективалы бағыттардың бірі – мұнай негізіндегі байланыстырғыштарды олардың пайдалану қасиеттерін жақсарта алатын табиғи және полимерлі компоненттермен модификациялау болып табылады. Осы зерттеуде гудрон госсипол шайыры мен екіншілік полипропилен (ЕПП) қоспасымен, радикалдық процестердің инициаторы қызметін атқарған калий

персульфатының ($K_2S_2O_8$) қатысуымен модификацияланды. ИҚ-спектроскопия және растрлық электронды микроскопия әдістерін қолдану нәтижесінде жаңа функционалдық топтардың түзілуі, байланыстырғыштың полярлығының артуы және полимер фазасының құрылымда біркелкі таралуы анықталды. Жүргізілген сынақтар модификацияланған материалдың бастапқы гудронмен салыстырғанда адгезиялық, жылулық және деформациялық қасиеттерінің жақсарғанын көрсетті. Құрылымдық-механикалық беріктіктің және қартаюға төзімділіктің артуы госсипол шайыры мен ЕПП арасындағы синергетикалық әсерді дәлелдейді. Әзірленген технология мақта өңдеу және пластик қалдықтарын тиімді түрде қайта пайдалануға мүмкіндік беріп, экологиялық тәуекелі төмен, тұрақты, сапалы және бәсекеге қабілетті байланыстырғыш жүйелерді жасауға жол ашады. Мұндай жүйелер жол құрылысында, гидрооқшаулағыш жабындарда, өнеркәсіптік қоспаларда және құрылыс саласына арналған инновациялық композиттік материалдарда қолдануға лайық.

Түйін сөздер: *гудрон, госсипол шайыры,екіншілік полипропилен ,калий персульфаты, ИҚ-спектроскопиясы, растрлық электронды микроскопия.*

S.A. Batyrbay[1*], O.K. Beisenbayev[1], A.S. Sidikov[2], N.M. Daurenbek[1]
[1]M. Auezov South Kazakhstan University,
160012, Shymkent, Republic of Kazakhstan, Tauke Khan avenue,5
[2]Branch of the Russian State University of Oil and Gas (NRU) named after I.M. Gubkin
Republic of Uzbekistan, Tashkent, Durmon Yuli Street, 34
* e-mail: symbat_batyrbay@mail.ru

MODIFICATION OF TAR USING GOSSYPOLE RESIN AND RECYCLED POLYPROPYLENE

In modern conditions, special attention is given to the development of environmentally friendly and durable binders produced using secondary and renewable resources. One of the promising approaches is the modification of petroleum binders with natural and polymer components capable of improving their performance characteristics. In this study, the modification of bitumen residue was carried out using a mixture of gossypol resin and recycled polypropylene (RPP) in the presence of potassium persulfate ($K_2S_2O_8$), which served as a radical initiator. The application of FTIR spectroscopy and scanning electron microscopy made it possible to identify the formation of new functional groups, an increase in binder polarity, and a more uniform distribution of the polymer phase within its structure. The conducted tests revealed improvements in the adhesive, thermal, and deformation properties of the modified material compared to the original bitumen residue. The enhancement of structural-mechanical strength and aging resistance indicates a synergistic effect between gossypol resin and RPP. The developed technology demonstrates the efficiency of utilizing cotton processing and plastic waste, offering opportunities to create sustainable, high-quality, and competitive binder systems with reduced environmental risks and expanded areas of application, including road construction, waterproofing coatings, industrial mixtures, and innovative composite materials for the construction industry.

Key words: *tar, gossypol resin, secondary/recycled polypropylene, potassium persulfate, FTIR analysis, scanning electron microscopy.*

Сведения об авторах

Сымбат Азатханқызы Батырбай* – PhD докторант кафедры «Технология неорганических и нефтехимических производств», Южно-Казахстанского университета им. М. Ауэзова, г. Шымкент, Республика Казахстан; e-mail: symbat_batyrbay@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-4738-4687.

Орал Курганбекович Бейсенбаев – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология неорганических и нефтехимических производств» Южно-Казахстанского университета им. М. Ауэзова, г.Шымкент, Республика Казахстан; e-mail: oral-kb@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9442-213X.

Абдужалол Сидикович Сидиков – доктор химических наук, профессор кафедры «Общая химия, химия нефти и газа» филиал Российского государственного университета нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина филиала в городе Ташкент, Республика Узбекистан; e-mail: sidikov_a@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5393-8201.

Назарбек Мұхаддасұлы Дәуренбек – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технология неорганических и нефтехимических производств» Южно-Казахстанского университета им. М. Ауэзова, г.Шымкент, Республика Казахстан; e-mail: daurenbekn@yandex.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4238-3359.

Авторлар туралы мәліметтер

Сымбат Азатханқызы Батырбай* – «Бейорганикалық және мұнайхимия өндірістерінің технологиясы» кафедрасының PhD докторанты, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: symbat_batyrbay@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-4738-4687.

Орал Курганбекович Бейсенбаев – Техника ғылымдарының докторы, «Бейорганикалық және мұнайхимия өндірістерінің технологиясы» кафедрасының профессоры, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: oral-kb@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9442-213X.

Абдужалол Сидикович Сидиков –Химия ғылымының докторы, «Жалпы химия, мұнай және газ химиясы» кафедрасының профессоры, И.М. Губкин атындағы Ресей мемлекеттік мұнай және газ университетінің филиалы, Ташкент қ., Өзбекстан Республикасы; e-mail: sidikov_a@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5393-8201.

Назарбек Мұхаддасұлы Дәуренбек – техника ғылымдарының кандидаты, доцент, «Бейорганикалық және мұнайхимия өндірістерінің технологиясы» кафедрасының меңгерушісі, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: daurenbekn@yandex.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4238-3359.

Information about the authors

Symbat Batyrbay* – PhD doctoral student of the department «Technology of inorganic and petrochemical industries» of M. Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Republic of Kazakhstan; e-mail: symbat_batyrbay@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-4738-4687.

Oral Beisenbaev – Doctor of technical sciences, professor of the department «Technology of inorganic and petrochemical industries» of M. Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Republic of Kazakhstan; e-mail: oral-kb@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9442-213X.

Abdujalol Sidikov – Doctor of chemical sciences, professor of department of «General chemistry, chemistry of oil and gas» at the branch of the Russian State University of Oil and Gas (NRU) named after I.M. Gubkin in Tashkent, Republic of Uzbekistan; e-mail: sidikov_a@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5393-8201.

Nazarbek Daurenbek – кандидат Candidate of technical sciences, associate professor, head of the department «Technology of inorganic and petrochemical industries» of M. Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Republic of Kazakhstan; e-mail: daurenbekn@yandex.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4238-3359.

Поступила в редакцию 14.10.2025
Поступила после доработки 08.12.2025
Принята к публикации 09.12.2025

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-68

МРНТИ: 61.51.37

CC BY 4.0
Check for updates

А.Н. Сабитова*, Ж.Ш. Шәріпхан, Б.Б. Баяхметова, Б.С. Гайсина, Ж.К. Кабышева
Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20А,
*e-mail: alfa-1983@mail.ru

ОБЗОР ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННОГО БИТУМА: ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ

Аннотация: *В статье проведен экспертный аналитический обзор отечественных и зарубежных литературных источников на основе поставленных задач по реализации цели разработки инновационных технологии получения высококачественного битума из побочных продуктов нефтедобычи и переработки.*

Современные научные работы демонстрируют эффективность использования полимерных, минеральных и биологических компонентов, а также вторичных материалов для повышения долговечности и устойчивости битумных вяжущих. Особое внимание уделено полимерным модификаторам, таким как СБС (стирол-бутадиен-стирол), которые повышают эластичность и прочность битума, снижая вероятность растрескивания и деформации. Использование вторичных материалов, включая резиновую крошку, вакуумный газойль и золу-унос, не только улучшает свойства битума, но и снижает негативное воздействие на окружающую среду. Перспективным направлением является применение биомодификаторов, среди которых особую роль играет лигнин – природный полимер, обладающий высокой химической и термической стабильностью.

©А.Н. Сабитова, Ж.Ш. Шәріпхан, Б.Б. Баяхметова, Б.С. Гайсина, Ж.К. Кабышева, 2026

Исследования показали, что введение лигнина в состав битума улучшает его реологические свойства, повышает устойчивость к старению и окислению, а также способствует увеличению жесткости и прочности покрытия. Лигнин может выступать как наполнитель или частичная замена битума, что делает его экологически и экономически выгодным компонентом.

Применение различных модифицирующих добавок, включая полимеры, промышленные отходы и биокомпоненты, способствует повышению качества битума, снижению затрат на его производство, увеличению энергоэффективности технологических процессов и продлению срока службы дорожных покрытий. Также важно оценить изменение свойств битума в процессе производства и укладки асфальтобетонной смеси.

Ключевые слова: *нефтяной дорожный битум, добыча и переработка нефти, модифицированный битум, лигнин, биологические компоненты.*

Введение

В связи с увеличением спроса современного общества на качество строительных материалов и качества дорожного покрытия, а также увеличением нагрузки на дорожно-строительные материалы обособленным вопросом в целом в мире и в Республике Казахстан стоит вопрос внедрения/разработки технологии получения высококачественного битума.

Казахстан, будучи крупным нефтедобывающим государством, производит битум преимущественно из нефти. Развитая нефтеперерабатывающая отрасль страны выпускает широкий ассортимент битумных марок, используемых в разнообразных сферах, включая строительство (дорожное строительство, гидроизоляция), промышленность и другие сектора экономики [1].

Установлено, что в Казахстане производятся и реализуются взаимозаменяемые между собой марки нефтяного дорожного битума БНД 60/90, БНД 70/100, БНД 100/130. Общий годовой объем производства битума в 2020 году составил 961 тыс. тонн, осуществляемых 4 заводами с общей мощностью в 985 тыс. тонн. Данный показатель не может расти из-за отсутствия новых заводов и значительной модернизации действующих [2]. Вместе с тем, ввиду развития сетей автомобильных дорог в Казахстане, потребность битума ежегодно растет. При этом, спрос имеет острый сезонный характер (весенне-летний период), связанный с началом периода строительства и реконструкции дорог.

Битум также требует особых условий для хранения (поддержание одной температуры), из-за чего большую роль играет наличие специальных хранилищ для битума. У конечных потребителей, в виде дорожно-строительных компаний, как правило, нет хранилищ для битума, что требует поиска альтернативных решений по его хранению и доставке. В связи с этим возрастает актуальность использования мобильных битумных хранилищ, изотермических автоцистерн и организации поставок по принципу «just-in-time», что позволяет минимизировать потери материала и обеспечить непрерывность строительных работ. Несмотря на то, что качество дорожных битумов хоть и соответствует свойствам битумов различных марок согласно ГОСТ 22245-90 «Битумы нефтяные дорожные вязкие. Технические условия» [3], оно все еще нуждается в совершенствовании. Под влиянием внешних (температура воздуха, вода, динамические нагрузки и т.д.) и внутренних (физико-химические свойства почвы, состав и структура горных пород, движение литосферных плит, уровень и колебания грунтовых вод, процессы окисления и испарения летучих компонентов, диффузия влаги и солей, пластическая деформация основания, циклы замерзания-оттаивания, усадка или разбухание глинистых грунтов, а также биологические воздействия, включая деятельность микроорганизмов и прорастание корней) факторов в битуме происходят необратимые процессы, приводящие к изменению его структуры и свойств и, как следствие, изменение свойств асфальтобетона и дорожного покрытия в целом [4]. Так, при выполнении дорожно-строительных работ может использоваться битум, который частично утратил свои качественные характеристики из-за неправильных условий хранения и воздействия неблагоприятных метеорологических факторов. Колебания температуры, повышенная влажность, воздействие ультрафиолетового излучения и другие климатические условия могут негативно сказываться на свойствах битума, снижая его вязкость, адгезионные свойства и долговечность. Эти ключевые факторы оказывают значительное влияние на качество и эксплуатационные характеристики дорожного покрытия. Использование битума с ухудшенными свойствами может привести к снижению прочности асфальтобетонного покрытия, его преждевременному износу и необходимости частых ремонтов. В связи с этим

актуальной задачей является разработка и внедрение технологий получения высококачественного битума, обладающего улучшенными физико-химическими характеристиками и устойчивостью к внешним воздействиям. Совершенствование процессов переработки нефти и модификации битума позволит повысить долговечность дорожного покрытия и снизить затраты на его обслуживание.

В настоящее время наблюдается рост спроса на высококачественные нефтяные битумы. Одновременно с этим потребители предъявляют все более строгие требования к качеству выпускаемых нефтебитумов, что обусловливает необходимость совершенствования их производства [5].

Таким образом, целью настоящего обзорного исследования является систематизация и анализ факторов, влияющих на изменение физико-химических свойств битума, а также современных подходов к их улучшению посредством применения модифицирующих добавок различного происхождения – полимеров, биомодификаторов, промышленных отходов и биокомпонентов – с целью повышения эксплуатационных характеристик, энергоэффективности технологических процессов, снижения себестоимости производства и увеличения долговечности асфальтобетонных покрытий.

Материалы и методы

В ходе анализа была проведена тщательная оценка большого количества современных публикаций, охватывающих период с 2015 по 2025 годы, а также изучены ключевые источники, датируемые более ранними годами – с 1988 по 2005 гг., что позволило оценить современные тенденции и достижения в данной области, а также получить глубокое и всестороннее понимание исследуемой темы. Материал, представленный в данном обзоре, основан на исследовании научных трудов, включенных преимущественно в международные базы данных Scopus и Web of Science, а также из отечественного списка научных изданий из перечня Комитета по обеспечению качества в сфере науки и высшего образования Республики Казахстан. Поиск и отбор источников осуществлялся с использованием официальных научных платформ, таких как ResearchGate и Google Scholar, Elibrary, а также других авторитетных цифровых библиотек и репозиториев. Особое внимание уделялось рецензируемым статьям, монографиям и материалам конференций, имеющим высокую научную значимость и практическую ценность.

Результаты

Динамика потребления битума в мире

Мировые ресурсы тяжелой нефти и природных битумов оцениваются более чем в 810 млрд. т. [6]. Глобальный размер мирового рынка битума оценивается в 84,6 миллиардов долларов США с потенциалом роста до 116,2 млрд долларов к 2027 году. Общий объем производства битума оценивается примерно в 113 млн. тонн в год. Причем, самый большой объем нефтяных битумов производит США – почти 40 миллион тонн в год [6]. США импортируют битум из Канады, а крупнейшим потребителем в Азии является Китай, который при доле 9,64% в мировом производстве закупает свыше 3 млн тонн в год. Европа экспортирует битум, но некоторые страны покрывают дефицит за счет поставок соседних государств [7].

В России на долю производства нефтяных битумов приходится более 9% мировых мощностей [7, 8]. Начиная с 2015 года в России наблюдается активный рост производства битумов – в среднем на 7% в год. Ежегодный объем выпуска составляет порядка 6,5 миллионов тонн, а основными производителями и продавцами битума в РФ являются компании ПАО «НК «Роснефть» (в лице ООО «РН-Битум»), ПАО «Газпром нефть» (ООО «Газпромнефть – Битумные материалы», «ГНП-БМ»), ПАО «ЛУКОЙЛ» (ООО «ЛЛК-Интернешнл») и др. Основные потребители российской битумной продукции – строительная отрасль и дорожное хозяйство [9].

Спрос на битум растет, в том числе в Казахстане. Но в нашей стране последние годы случается традиционный дефицит этого материала в пиковые сезоны его использования [10]. По мере сокращения запасов легких и средних нефтей все большее внимание уделяется альтернативным источникам углеводородного сырья. Одним из перспективных направлений является использование тяжелых высоковязких нефтей и природных битумов, содержащихся в нефтебитуминозных породах. Казахстан располагает значительными месторождениями таких пород, причем основные промышленные запасы сосредоточены в западных регионах страны [11, 12]. Так, одним из наиболее перспективных месторождений нефтебитумных пород

является Западно-Казахстанское месторождение, на котором открыто более 50 месторождений с запасами 152 миллиона тонн [13].

Также на сегодняшний день в Казахстане действует 4 завода по производству дорожного битума – ТОО «СП «CaspiBitum» г.Актау, ТОО «Павлодарский нефтехимический завод» г.Павлодар, ТОО «Газпромнефть-Битум Казахстан» г.Астана и ТОО «Асфальтбетон 1» г. Алматы, суммарная мощность которых составляет 1,0 млн. тонн в год. 5-летняя динамика производства битумов в РК показаны на рисунке 1 [14].

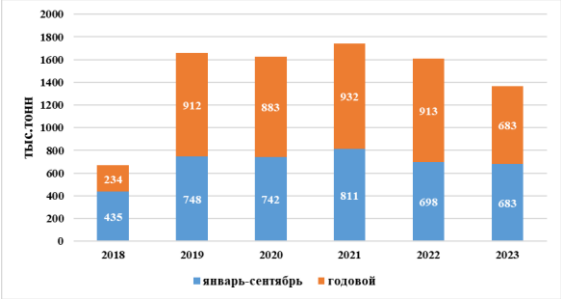


Рисунок 1 – Производство битумов в РК за 2018-2023 гг., тыс.тонн

Комплексная переработка НБП расширяет ресурсы углеводородного сырья при производстве топлив, масел, полупродуктов органического синтеза, строительного и дорожного битума. В этой связи большой интерес представляет разработка эффективного способа извлечения и переработки органической части НБП – природных битумов.

Проблема нефтяных отходов

Нефть – ископаемое топливо, которое образовалось миллионы лет назад глубоко под землей, представляющее собой смесь около тысячи индивидуальных веществ, включая различные алифатические, алициклические и полиароматические углеводороды, некоторые пиреновые кольца, второстепенные элементы и тяжелые металлы [15, 16].

Сырая нефть состоит из четырех основных компонентов: насыщенные углеводороды, включающие алканы и циклопарафины, ароматические соединения, представленные моно- и полиароматическими углеводородами, смолы, содержащие полярные молекулы с гетероатомами, такими как сера, кислород и азот, а также асфальтены – высокомолекулярные соединения с конденсированными ароматическими кольцами. Эта классификация известна как тест SARA (saturates, aromatics, resins, asphaltenes) [17].

Большее количество легкой сырой нефти перерабатывается в бензин, сжиженные нефтяные газов, что дает им более высокую товарную стоимость, тогда как тяжелая сырая нефть дает больше жидких и твердых компонентов, таких как тяжелые парафиновые масла и асфальтовые материалы, что в свою очередь требуют дополнительной очистки, осаждения и других манипуляции для получения чистого материала.

Различные нефтеперерабатывающие предприятия ежегодно производят огромное количество нефтешлама. Например, по оценкам Агентства по охране окружающей среды США, годовой объем производства нефтешлама на каждом НПЗ США составляет 30 000 тонн, а средний объем нефтешлама, образующегося на нефтехимических предприятиях Китая, оценивается примерно в 3 миллиона тонн в год [18]. Также согласно статистическому обзору компании «British Petroleum» каждый год во всем мире производится около 60 млн т нефтешлама и суммарный объем накопленных нефтяных шламов достигает 1 млрд т. [19]. Тогда как в Республике Казахстан согласно данным государственного кадастра отходов производства и потребления, за 2019 год в стране было образовано 129 млн тонн нефтяных отходов [20].

Вторым вопросом соответственно исходя из вышеизложенных материалов является трудозатратные процессы переработки и очистки тяжелой нефти, поскольку большая доля нефтяных шламов образуется из них. Как представлено в работе автора [21] содержание нефти в нефтешламе достигает до 15-50%, которые могут быть извлечены с применением высокотехнологичных наукоемких методов. Но наиболее эффективные способы разрушения нефтешлама отличаются применением оборудования, дорогостоящего в приобретении и обслуживании.

Нефтяные шламы – отходы, образующиеся на всех этапах добычи, транспортировки и переработки нефти – это сложные физико-химические смеси, включающие нефтепродукты, механические примеси (глины, окислы металлов, песок) и воду. Стабилизация смесей достигается присутствием газообразных компонентов, то есть продуктов биологического разрушения органических веществ [22].

Такие отходы накапливаются на складах, донных отложениях РВС (резервуар вертикальный стальной), прудах осаждения НПЗ и являются сложной многокомпонентной смесью высокомолекулярных и окисленных углеводородов (смол, асфальтенов, парафинов), воды, солей, песка, тяжелых металлов и химических реагентов. Нефтегазовая промышленность производит огромное количество нефтешламов – это самый большой по объёму вид её отходов. С одной стороны, в них содержится ценное сырьё, пригодное для переработки. С другой стороны, они представляют собой серьёзную экологическую опасность. В основном, нефтешламы складируются в открытых хранилищах, что приводит к загрязнению атмосферы, почвы и грунтовых вод. Существующая практика хранения наносит значительный ущерб окружающей среде. Некоторые из которых представлены в работах ряда авторов [23-28]. Так, по данным автора [29] основными проблемами, связанными с хранением нефтешламовых отходов, являются:

1. Высокая обводненность нефтяных шламов непосредственно при их образовании. Высокий процент содержания воды в отходах, направляемых на хранение, приводит к тому, что вместе со шламом в амбаре хранится много жидкости.

2. Содержание в смеси $Al_2(SO_4)_3$, $FeCl_3$, $Ca(OH)_2$, полиакриламида.

В работах ряда авторов [30-34] представлены способы, технологии, извлечения из нефтешламов полезных компонентов и минимизировать негативное воздействие на природу.

Также в ряде других исследований [15] представлены другие методы обработки, такие как устойчивый метод утилизации и обработки, включая термическую десорбцию, биоремедиацию и переработку. Эти методы направлены на извлечение ценных компонентов из шлама, одновременно снижая его воздействие на окружающую среду.

Повышение качества битумов

В связи с возросшим вниманием к окружающей среде и исчерпанием невозобновляемых ресурсов устойчивость и принципы круговой экономики приобрели особую значимость. Современные тенденции в проектировании дорожных покрытий направлены на сокращение использования стандартного битума за счет его замены более экологичными и устойчивыми материалами, такими как промышленные отходы и побочные продукты.

В ряде современных отечественных работ, а также ближнего зарубежья [4, 35, 11] повсеместно поднимаются вопросы о качестве нефтепродуктов, в том числе битумов. С учетом постоянного увеличения автопарка, интенсивности движения и грузоподъемности транспортных средств, а также значительного возрастания динамических нагрузок на дорожное покрытие, возрастает потребность в качественных асфальто-бетонных смесях [4]

Долговечность и устойчивость битумов к внешним воздействиям обеспечиваются за счет комплексного подхода, включающего точную настройку технологических параметров, целенаправленную модификацию, активацию исходных компонентов и оптимизацию состава. Грамотное управление этими факторами позволяет регулировать свойства материала и повышать его эксплуатационные характеристики. Так, в одной из отечественных работ [36] приведены результаты экспериментов по использованию шунгитовых пород месторождения Коксу после механохимической активации в качестве модифицирующей добавки для улучшения физико-механических характеристик нефтяного дорожного битума. Оптимальным модификатором оказался образец шунгита карбонатного происхождения в количестве 0,5 мас.% после механохимической активации. Также исследование показало, что модифицированный шунгитом битум имеет относительно низкую глубину проникания и растяжимость, но высокую температуру размягчения и адгезионную способность к щебню.

В подтверждение данных предыдущих исследований отечественные ученые [37] изучают возможность использования сырья казахстанских производителей для повышения качества битума. Как отмечено в работах ряда исследовательских групп, применение местного сырья демонстрирует положительную динамику в улучшении эксплуатационных характеристик дорожного битума, что делает данный подход перспективным и экономически оправданным. Добавление вакуумного газойля способствует увеличению эластичности, улучшению адгезии к минеральной поверхности, а также положительно влияет на

реологические свойства битума. Помимо этого, модификация температурных характеристик материала позволяет снизить энергозатраты в процессе укладки дорожного покрытия, а также повышает его устойчивость к окислению и старению благодаря антиоксидантному эффекту. Использование компонентов, полученных из местного сырья, не только снижает себестоимость технологии за счёт доступности материалов, но и сокращает энергозатраты на логистику и транспортировку. Это, в свою очередь, способствует снижению общего энергопотребления в производственном процессе, делая его более экологичным и ресурсосберегающим.

В исследованиях следующих авторов приведены результаты по использованию различных добавок для повышения эксплуатационных характеристик битума [38, 7, 39, 40, 41, 42]. В представленных источниках рассмотрены вопросы применения блоксополимеров дивинила и стирола (термоэластопластичные полимеры), эластомеров, термопластов, реактопластов для улучшения свойств битума. По результатам анализа данных авторов на сегодняшний день испытаны все известные полимеры. При этом следует отметить, что в промышленности применяются их определенные виды. Их выбор определяется не только эффективностью модификации битума, но и такими факторами, как доступность, стоимость, технологичность и стабильность внедрения характеристик в условиях эксплуатации.

Как указано в другой работе [43], также очень часто на практике применяются резиновые крошки, что также существенно улучшают качество битума. При длительном нагреве битума в присутствии резиновой крошки происходит структурное преобразование материала – увеличивается содержание асфальтенов, а термоокислительная деградация замедляется. Однако показатель растяжимости при 25°C, который традиционно использовался для оценки пластичности битума, в современных исследованиях не считается ключевым параметром, так как не отражает его эксплуатационные свойства в составе асфальтобетонного покрытия.

Наряду с этим значительное количество зарубежных исследований посвящено изучению модификации битума, изменения его качественных характеристик и применения переработанных материалов для улучшения свойств, необходимых в дорожно-строительных работах. Отдельным пластом лежат работы, посвященные рециклингу переработанных нефтепродуктов и бережному отношению к компонентам природы.

Так, в работе коллектива авторов [44] представлены механические и физико-химические свойства нового вида модифицированного битума, где связующими агентами были использованы один из представленных материалов – полимерный эластомер, стирол-бутадиеновый каучук (SBR), полимерный термопластичный полипропилен (PP) и отходы пластика (WPP). Итого битумная система, модифицированная отходами пластика, показывает улучшенные механические характеристики при высоких и низких температурах, что в свою очередь доказывает полезность применения полимера в дорожном строительстве.

В исследованиях следующего коллектива авторов [45] представлены результаты исследования получения инновационно-расширенного битума с использованием переработанных материалов. В качестве модификаторов битума, данная группа авторов использовала порошкообразную резину из отслуживших свой срок шин и остатки повторно очищенного моторного масла (REOB). По мнению авторов использование шин и предварительно отработанных моторных масел для улучшения свойств битума являются многообещающими. Частичная замена стандартного битума на смеси R–REOB может улучшить эксплуатационные характеристики связующих элементов при низкой температуре. Добавка R–REOB, являющаяся смягчающим агентом, приводит к повышению их стойкости к термическому растрескиванию. Расширенные битумы приобрели большую эластичность во всех испытанных условиях, что может быть связано с введением резины.

Также в ряде научных обзоров, оригинальных работ [46-50] представлены результаты исследований по применению теплой асфальтобетонной смеси (WMA), модификатора резиновой крошки (CRM), шлама вакуумной колонны (VTB)) и/или первичных заполнителей (регенерированное асфальтобетонное покрытие (RAP), регенерированной асфальтобетонной черепицы (RAS), отходов строительства и сноса (C и D), стальных и медных шлаков, а также биосвязующих элементов. Биоасфальт, C и D, шлаки, RAP и VTB являются перспективными экологически чистыми материалами, однако, как показывает обзор литературы, их воздействие на экономику и экологию изучено недостаточно. Кроме того, экономический анализ их комбинаций в значительной степени отсутствует. В связи с этим

рекомендуется включить их в будущие исследования для более точной оценки их устойчивости.

Множество работ также посвящено исследованию применения биополимеров для улучшения качества битума [51-61]. Экологические подходы в асфальтовой промышленности были сосредоточены на использовании возобновляемых отходов в качестве модификаторов. Практика использования возобновляемых источников для замены части битумных материалов является эффективным подходом в проектировании дорожных покрытий. Среди различных биомасс, которые признаны возможными источниками, смешиваемыми с битумом, лигнин может представлять собой приемлемый материал. Этот биополимер, являющийся вторым по распространённости в природе, обладает уникальными химическими и физическими свойствами, которые делают его перспективным компонентом для модификации битума. Однако параметры смешивания играют ключевую роль, так как они существенно влияют на характеристики получаемого лигнин-модифицированного битума.

В целом обеспечение термодинамической и коллоидно-химической совместимости лигнина с нефтяными битумами – сложная задача, связанная с отличиями в химической природе компонентов. Лигнин – это полярный ароматический полимер с множеством гидроксильных и фенольных групп, тогда как битум – это смесь неполярных и слабо полярных компонентов, включая мальтены (ароматические и насыщенные углеводороды) и асфальтены (высокомолекулярные полярные соединения). Исследование, опубликованное в журнале Polymers [62] демонстрирует, что катионный крафт-лигнин, модифицированный с использованием тетраэтиленпентамина и формальдегида, эффективно стабилизирует водно-битумные эмульсии с содержанием битума до 60% при низких концентрациях ПАВ (0,25-0,75%). Эти эмульсии обладают устойчивой структурой и подходящими реологическими свойствами для дорожных покрытий. В следующей работе [63] рассматривается применение нативных лигнинов, полученных из процессов производства биоэтанола и щелочной (крафт) варки, в качестве анионных эмульгаторов для битумных эмульсий. Результаты показывают, что такие лигнины могут эффективно стабилизировать эмульсии, особенно при оптимальном pH, что делает их перспективными для применения в дорожном строительстве. Оба исследования подчеркивают важность химической модификации лигнина (например, сульфонации или катионирования) и выбора подходящих поверхностно-активных веществ для улучшения его совместимости с битумом. Такие подходы способствуют созданию стабильных и эффективных битумных композиций с использованием лигнина. Оптимальная технология внедрения битума с лигнином включает локальное использование технического лигнина, предварительно активированного (например, сульфонацией) с минимальными энергозатратами. Лигнин вводится непосредственно на асфальтобетонных заводах (АБЗ) с минимальной адаптацией оборудования. Такая схема снижает углеродный след, стоимость материалов и легко масштабируется в существующую инфраструктуру дорожного строительства.

Результаты исследований группы авторов [64], изучавших лигнин-модифицированные битумы, подчеркивают потенциал сульфатного лигнина как эффективного модификатора битума. Особое внимание уделяется влиянию скорости и механизмов смешивания на характеристики и свойства получаемого материала. В то время как для некоторых добавок достаточно использования механического смесителя, для сульфатного лигнина более стабильные и качественные результаты достигаются при применении смесителя с высокой скоростью сдвига. Полученные данные способствуют развитию экологически безопасных технологий в асфальтовой промышленности, позволяя эффективно использовать отходы в качестве модификаторов.

В ряде работ рассматриваются вопросы применения модифицированного битума в различных климатических поясах. Так в работе [65, 66] авторы изучили модифицированный битум, адаптированный для холодного климата с различным содержанием (0, 10, 20 и 30% от общей массы модифицированного битума) крафт-лигнина, который получен из мягкой древесины для стандартного уровня трафика. По результатам испытаний установлено, что лигнин может частично заменять битум, тогда как порошковый крафт-лигнин является перспективным модификатором, особенно для мягких битумов. Однако для определения оптимального количества добавляемого объема природных биополимеров необходимы дополнительные исследования, учитывающие эксплуатационные характеристики, начальные затраты и анализ жизненного цикла. Группа авторов [67] изучила свойство лигнин-

модифицированных битумов с добавлением в битум рапсового масла для меньшего термического растрескивания. В указанной работе доказано, что применение биомасел значительно улучшает свойства лигнин-модифицированного битума при низких и средних температурах, в частности повышает его усталостную прочность и устойчивость к термическому растрескиванию. При этом улучшенные высокотемпературные характеристики, обеспеченные лигнином, такие как модуль, способность к восстановлению, устойчивость к колееобразованию и температурная стабильность, не были нарушены. Использование биомасла в сочетании с лигнином позволяет значительно увеличить содержание лигнина в битуме без потери механических свойств вяжущего. Это подтверждает возможность частичной замены битума лигнином.

Есть отдельные работы, с новейшими разработками и проверкой их на практике. Например, в работе [68] представлены результаты исследования реологических свойств и микромеханизмов изготовленного модифицированного теплого асфальтобетонного композита Buton Rock (BRA) (BCMWMA). Изготовленные композиты соответствуют требованиям стандартного и интенсивного дорожного движения согласно стандарту AASHTO M332.

Заключение

Таким образом, в настоящее время разработано множество модифицирующих добавок, которые позволяют значительно улучшить как технологические, так и эксплуатационные характеристики битума. Современные методы модификации направлены на повышение долговечности дорожных покрытий, улучшение их устойчивости к механическим нагрузкам и негативным воздействиям окружающей среды.

Дополнительное внимание уделяется нанотехнологиям, в частности применению углеродных нанотрубок и наночастиц металлов, которые способствуют улучшению адгезионных свойств и термоокислительной стабильности битума. Введение вакуумного газойля и других пластифицирующих компонентов помогает оптимизировать вязкость битума, что облегчает его укладку и снижает энергозатраты на технологические процессы.

Одним из ключевых направлений является использование полимерных добавок, которые увеличивают эластичность и прочность битума, снижая риск образования трещин и деформаций. Помимо полимеров, перспективными считаются различные промышленные отходы и вторичные материалы, такие как резиновая крошка, зола-унос и нефтяные дистилляты, позволяющие не только повысить качество вяжущего, но и сократить негативное влияние на окружающую среду.

Кроме того, всё больше исследований посвящено разработке биоасфальтовых технологий, включающих использование лигнина и растительных масел в качестве частичной замены битума. Такой подход делает производство дорожных покрытий более экологичным и менее зависимым от традиционных нефтепродуктов.

Таким образом, современное развитие технологий модификации битума направлено на поиск эффективных, экономически оправданных и экологически безопасных решений, которые обеспечат долговечность и высокое качество дорожных покрытий.

Список литературы

1. Несипбаева Н.Н. Повышение качества дорожных битумов, полученных из тяжелых нефтяных отходов / Н.Н. Несипбаева // Вестник Университета Шакарима. Технические науки. – 2024. – № 4(16). – С. 368-378. https://doi.org/10.53360/2788-7995-2024-4(16)-47.
2. Анализ состояния конкуренции на рынке реализации нефтяного дорожного битума за период 2019, 2020 и январь-май 2021 гг. (Агентство по защите и развитию конкуренции Республики Казахстан). https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=34550797&pos=6;-108#pos=6;-108 (дата обращения: 17.02.2025).
3. ГОСТ 22245-90. Битумы нефтяные дорожные вязкие. Технические условия. – Введ. 1991-01-01. – Межгосударственный стандарт. – 9 с. https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=30039800&pos=3;-48#pos=3;-48 (дата обращения: 17.02.2025).
4. Айнабеков Н.Б. Дисс. на соискание степени доктора философии (PhD). – Регулирование структурных превращений в процессах производства модифицированных битумных материалов из остатков нефтей Казахстанских месторождений, Шымкент, 2024 г.

5. Послание Главы государства К.К. Токаева народу Казахстана «Справедливое государство. Единая нация. Благополучное общество» от 1 сентября 2022 года. https://www.akorda.kz/ru/poslanie-glavy-gosudarstva-kasym-zhomarta-tokaeva-narodu-kazahstana -181130 (дата обращения: 17.02.2025).
6. Каталитическая гидропереработка тяжелого нефтяного сырья / А.Г. Окунев и др. // Успехи химии.– 2015. – Т. 84, № 9. – С. 981-999.
7. Ахмадова Х.Х. Основные способы модификации битумов различными добавками / Х.Х. Ахмадова, Ж.Т. Хадисова, Л.Ш. Махмудова // Вестник ГГНТУ. Технические науки. – 2019. –Т. XV, № 3(17). – С. 42-52. https://doi.org/10.34708/GSTOU. 2019.17.3.006.
8. Problemy proizvodstva neftyanykh bitumov i kompozitsii na ikh osnove. Analiticheskii obzor [Problems of production of oil bitumens and compositions on their basis. State-of-the-art review.] M.: Tsniitenefneftekhim. – 2002. – 185 p.
9. Анализ текущего состояния и тенденции рынка битумов в России / И.В. Пискунов и др. https://ngv.ru/articles/analiz-tekushchego-sostoyaniya-i-tendentsii-rynka-bitumov-v-rossii/. (дата обращения 19.02.2025).
10. Дорожный битум. Как решается проблема дефицита.URL: https://www.kmg.kz/ru/press-center/articles/bitum-def/ (дата обращения 22.02.2025).
11. Эффективная переработка нефтебитуминозных пород в целевые продукты / Е.К. Онгарбаев и др. // Горение и плазмохимия. – 2021. – Т. 19, № 4 – Р. 299-308. https://doi.org/10.18321/cpc467.
12. Надиров Н.К. Высоковязкие нефти и природные битумы. В 5 т. – Алматы: Ғылым, 2001; Нефтебитуминозные породы: достижения и перспективы. Под ред. Н.К. Надирова. – Алма-Ата: Наука, 1988. – 308 с.
13. Исследование процесса производства битума / Г.С. Мамбеталиева и др. // Вестник КазАТК. – 2024. – № 2(131). https://doi.org/10.52167/1609-1817-2024-131-2-24-33.
14. Компания «ОМТ-Консалт». URL: www.omt-consult.ru. (дата обращения: 22.02.2025).
15. Abdel-raouf Petroleum sludge formation and its treatment methodologies: a review / M.A. Abdulraheim Hasan et al // Environmental Science and Pollution Research. – 2024. – № 31. – P. 8369-8386. https://doi.org/10.1007/s11356-023-31674-3.
16. Рахимова З.Ж. Примеси сырой нефти, влияющие на процессы нефтепереработки / З.Ж. Рахимова, К.Х. Жапаргазинова // Вестник Торайгыров университета. Сер.хим-биол. – 2021. – № 2. – С. 6-18. https://doi.org/10.48081/YGTD3586.
17. The Structure of Bitumen: Conceptual Models and Experimental Evidences / M. Porto et al // Materials. – 2022. – Vol. 15. – P. 905. https://doi.org/10.3390/ma15030905.
18. Petroleum sludge formation and its treatment methodologies: a review / AMA Hasan et al // Environ Sci Pollut Res Int. – 2024. – Feb. 31(6). – P. 8369-8386. https://doi.org/10.1007/s11356-023-31674-3.
19. BP Statistical Review of World Energy June – 2012. – London. 2012. – p. 16.
20. Ишекенова Б. Как в Казахстане разбираются с нефтяными отходами. – 2020. https://lsm.kz/kak-v-kazahstane-razbirayutsya-s-neftyanymi-othodami (дата обращения: 20.02.2025).
21. Enhancing the biodegradation of total petroleum hydrocarbons in oily sludge by a modified bioaugmentation strategy / R.A. Tahhan et al // International Biodeterioration & Biodegradation. – 2011. – № 65. – P. 130-134.
22. Глум Т.П. Анализ существующих технологий переработки нефтяных шламов в полимерные добавки для асфальтобетона / Т.П. Глум, С.О. Меньшиков, Ю.Д. Смирнов // Актуальные проблемы нефти и газа. – 2021. – № 4(35). – С. 68-77. https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2021-35.art6.
23. Кунаков К.О. Анализ нефтяных шламов с применением амперометрических ионоселективных электродов / К.О. Кунаков, М.В. Крючков // Записки Горного института. – 2008. – Т.174. – С. 215-216.
24. Коршунова Т.Ю. Нефтешламы: состояние проблемы в Российской Федерации и методы снижения их воздействия на окружающую среду / Т.Ю. Коршунова, О.Н. Логинов // Экобиотех. – 2019. – Т. 2, № 1. – С. 75-85. https://doi.org/10.31163/2618-964X-2019-2-1-75-85.
25. Стриженок А.В. Экологическая оценка хранилищ нефтяного шлама как источника воздействия на приземную атмосферу / А.В. Стриженок // Наука XXI века: новый подход:

Материалы XXV молодежной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Санкт-Петербург, Россия, Моррисвилль: Лулу Пресс, 2020. – С. 48-52.
26. Thermal desorption treatment of petroleum hydrocarbon-contaminated soils of tundra, taiga, and forest steppe landscapes / M.V. Bykova et al // Environmental Geochemistry and Health. – 2021. – Vol. 43, № 6. – P. 2331-2346. https://doi.org/10.1007/s10653-020-00802-0.
27. Пат. RU 2193578 C2. Способ переработки нефтесодержащих шламов / Решетов В.А., Павлов В.Т., Павлов А.Т. и др.; № 2000122265/04; Заявл. 24.08.2000; Опубл. 27.11.2002. Изобретения. Полез. модели. – 2002. – Бюл. № 33. http://www.fips1.ru.
28. Афанасьев С.В. Нефтешламы как вторичное сырье / С.В. Афанасьев, М.А. Паис, Н.С. Носарев // Деловой журнал Neftegaz.RU. – 2020. – № 3,5(99.5). – С.86-90.
29. Проблема образования, переработки и утилизации нефтешламов / В.А. Гронь и др. // Успехи современного естествознания. – 2013. – № 9. – С.159-162.
30. Байгазиев М.Т., Дисс. на соискание ученой степени доктора философии (PhD).: Повышение нефтеотдачи пласта на поздней стадии разработки месторождений и разрушение нефтешламов гидрореагирующими составами, – Алматы, 2019.
31. Соловьянов А.А. Переработка нефтешламов с использованием химических и биологических методов / А.А. Соловьянов // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2012. – № 5. – С. 30-39.
32. К проблеме обезвреживания нефтяных шламов / Р.Ш. Суфиянов и др. // Известия вузов. Нефть и газ. – 2005. – № 6. – С. 117-120.
33. Пат. RU 2217476 C1. Способ обработки нефтесодержащих шламов / Губайдуллин Ф.Р., Сахабутдинов Р.З., Исмагилов И.Х. и др.; № 2002114896/04; Заявл. 05.06.2002. Опубл. 27.11.2003 // Изобретения. Полез. модели. 2003. Бюл. № 33. http://www.fips1.ru.
34. Пат. на полез. модель RU 69065 U1. Технологический комплекс по переработке нефтесодержащих отходов / Ващук В.И., Меламед Б.Г., Калинин Н.Ф. и др.; № 2007126230/22; Заявл. 09.07.2007; Опубл. 10.12.2007 // Изобретения. Полез. модели. 2007. Бюл. № 34. http://www.fips1.ru.
35. Сатаева С. Жол төсеуге арналған битумдардың негізгі физика-химиялық қасиеттері / С. Сатаева, К. Михайлова // Chemical Journal of Kazakhstan. – 2021. – Vol. 1, № 73. – P. 63-69. https://doi.org/10.51580/2021-1/2710-1185.06.
36. Кенжегалиева А.Р. Модификация нефтяного битума механохимически активированным шунгитом месторождения Коксу / А.Р. Кенжегалиева, Д.Б. Абдихан, Е.К. Онгарбаев // Горение и плазмохимия. – 2022. – Т. 20, № 2. – С. 133-141. https://doi.org/10.18321/cpc537.
37. Энергосберегающие технологии производства полимер-модифицированного битума / Г. Сейтенова и др. // Вестник Торайгыров университет. Серия энергетическая. – 2024. – № 3. – С. 280-294. https://doi.org/10.48081/YYWW4503.
38. Тарамов Ю.Х. Влияние состава битума на эксплуатационные свойства. / Ю.Х. Тарамов, П.С. Цамаева, А.А. Эльмурзаев // Вестник ГГНТУ. Технические науки. – 2022. – Т. XVIII, № 1 (27). https://doi.org/10.34708/GSTOU. 2022.72.32.007.
39. Polijetilengudronovye vjazhushhie – innovacionnyj material dlja dorozhnogo stroitel'stva / A.A. Gureev et al // [Polyethylene binding materials – innovative material for road construction] World of petroleum products. – 2014. – № 12. – P. 33-35.
40. Gohmann L.M. Vlijanie vjazkosti bitumov na svojstva polimernobitumnyh vjazhushhih / L.M. Gohmann, K.I. Davydova // [Influence of viscosity of bitumens on properties polymeric and bituminous knitting] Tr. Soyuzdorniya. 1977. – M the Issue 100. – 250 p.
41. Balabanov V.B. Primenenie organomineral'nyh smesej na osnove kationnyh bitumnyh jemul'sij i jemul'sij na osnove modificirovannyh bitumov / V.B. Balabanov, D.A. Militsyn // [Application the organomineralnykh of mixes on the basis of cationic bituminous emulsions and emulsions on the basis of the modified bitumens] Gerald of Irkutsk state technical university. – 2011. – T. 52, № 5. – P.78-83.
42. Kompaundirovannye dorozhnye bitumy uluchshennogo kachestva / I.B. Grudkov et al // [Compacted road bitums of improved quality] Oil refining and petrochemicals. – 2001. – № 4. – P. 34-36.
43. Долинская Р.М. Влияние резиновой крошки на свойства нефтяного битума / Р.М. Долинская, Н.Р. Прокопчук // Труды БГТУ. 2021. Сер.2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. – 2021. – № 1(241). – С. 172-175.

44. Analysis of Mechanical Performance of Bitumen Modified with Waste Plastic and Rubber Additives by Rheology and Self Diffusion NMR Experiments / Giulia Tarsi et al // Eurasian Chemico-Technological Journal. – 2019. – № 21. – P. 235. https://doi.org/10.18321/ectj864.
45. A Study of Rubber-REOB Extender to Produce Sustainable Modified Bitumens / Giulia Tarsi et al // Applied Sciences. – 2020. – № 10. – P. 1204. https://doi.org/10.3390/app10041204.
46. Sustainability Assessment of Green Asphalt Mixtures: A Review / Pouranian et al // Environments 2019, 6(6), 73https://doi.org/10.3390/environments6060073.
47. Low-Temperature Performance of Toner-Modified Asphalt Binder / M.A. Notani et al // J. Transp. Eng. Part B Pavements. – 2019. – № 145. – 04019022. https://doi.org/10.1061/JPEODX.0000123.
48. Properties of Foamed Asphalt for Warm Mix Asphalt Applications / D.E. Newcomb et al // Transportation Research Board: Washington, DC, USA, – 2015. – № Project 09-53.
49. Use of a warm mix asphalt additive to reduce the production temperatures and to improve the performance of asphalt rubber mixtures / J.R.M. Oliveira et al // J.Clean.Prod.41 – 2013. – P.15-22. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.09.047.
50. Xiao F. E ects of non-foaming WMA additives on asphalt binders at high performance temperatures / F. Xiao, V.S. Punith, S.N. Amirkhanian, // Fuel – 2012. – 94 – P.144-155. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.09.017.
51. Valorization of Biomass: Deriving More Value From Waste / C.O. Tuck et al // Science. – 2012. – № 337. – P.695-699. https://doi.org/10.1126/science.1218930.
52. The Use of Lignin for Sustainable Asphalt Pavements: A Literature Review. Constr / E. Gaudenzi et al // Build. Mater. – 2023. – 362. – 129773. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129773.
53. Jamal M. Chemo-rheological Investigation on Waste Rubber-Modified Bitumen Response to Various Blending Factors / M. Jamal, F. Giustozzi // Int. J. Pavement Res. Technol. – 2022. – № 15. – P. 395-414. https://doi.org/10.1007/s42947-021-00045-x.
54. Estimation of low-temperature performance of recycled asphalt mixtures through relaxation modulus analysis / A. Stimilli et al // Cold Regions Science and Technology. – 2017. – Vol. 133. – P. 36-45. https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2016.10.013.
55. Renewable materials in bituminous binders and mixtures: Speculative pretext or reliable opportunity? / Lorenzo Paolo Ingrassia et al // Resources, Conservation and Recycling. – 2019. – Vol. 144. – Pages 209-222, ISSN 0921-3449, https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.01.034.
56. Full-scale validation of bio-recycled asphalt mixtures for road pavements / J. Blanc et al // Journal of Cleaner Production. – 2019. – Vol. 227. – P. 1068-1078. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.273.
57. Shih-Hsien Yang. Rheological behavior of Japanese cedar-based biobinder as partial replacement for bituminous binder / Shih-Hsien Yang, Try Suciptan // Construction and Building Materials. – 2016. – Vol. 114. –P. 127-133. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.100.
58. Evaluation of optimized bio-asphalt containing high content waste cooking oil residues / Daquan Sun et al // Fuel. – 2017. – Vol. 202. – P. 529-540. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.04.069.
59. Extraction and characterization of lignin from different biomass resources / D. Watkins et al // Journal of Materials Research and Technology. – 2015. – Vol. 4. – P. 26-32. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2014.10.009.
60. Effect of Lignin Modifier on Engineering Performance of Bituminous Binder and Mixture. / Xu, Chi et al // Polymers. – 2021. – № 13. – P. 1083. https://doi.org/10.3390/polym13071083.
61. Long-Term Monitoring of the Behavior of Modified Bitumens of RC Type / M. Varaus et al // Applied Sciences. – 2024. – № 14. – 11794. https://doi.org/10.3390/app142411794.
62. Emulsion Stabilization by Cationic Lignin Surfactants Derived from Bioethanol Production and Kraft Pulping Processes / A. Yuliestyan et al // Polymers (Basel). – 2022. – № 14(14). – P. 2879. https://doi.org/10.3390/polym14142879.
63. Bioethanol Production and Alkali Pulp Processes as Sources of Anionic Lignin Surfactants / R. Álvarez-Barajas et al // Polymers (Basel). – 2021. – № 13(16). – 2703. https://doi.org/10.3390/polym13162703.
64. Laboratory Study on Influence of Blending Conditions on Chemo-Thermal Characteristics of Lignin-Modified Bitumen / R. Gohari et al // Applied Sciences. – 2023. – № 13. – 7766. https://doi.org/10.3390/app13137766.
65. Effects of Kraft Lignin on the Performance Grade of Two Bitumens Used for Cold Climate / Al-falahat Wesam et al // International Journal of Pavement Research and Technology. – 2023. – № 17. https://doi.org/10.1007/s42947-023-00302-1.

66. Investigation of the Characteristic Properties of Lignin-Modified Bitumen / S. Kalampokis et al // CivilEng. – 2022. – № 3. P. 734-747. https://doi.org/10.3390/civileng3030042.
67. Effect of Bio-oil on Rheology and Chemistry of Organosolv Lignin-Modified Bitumen / Zh. Yi et al // Journal of Materials in Civil Engineering. – 2022. – № 34. – P. 1-16. https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004140.
68. Investigation on Rheological Properties and Microscopic Mechanisms of Sasobit / Liu Wei et al // Buton Rock Asphalt Modified Asphalt. Sustainability. – 2023. – № 15. – 10224. https://doi.org/10.3390/su151310224.

References

1. Nesipbaeva N.N. Povyshenie kachestva dorozhnykh bitumov, poluchennykh iz tyazhelykh neftyanykh otkhodov / N.N. Nesipbaeva // Vestnik universiteta Shakarima. Tekhnicheskie nauki. – 2024. – № 4(16). – S. 368-378. https://doi.org/10.53360/2788-7995-2024-4(16)-47. (In Russian).
2. Analiz sostoyaniya konkurentsii na rynke realizatsii neftyanogo dorozhnogo bituma za period 2019, 2020 i yanvar'-mai 2021 gg. (Agentstvo po zashchite i razvitiyu konkurentsii Respubliki Kazakhstan). https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=34550797&pos=6;-108#pos=6;-108 (data obrashcheniya: 17.02.2025). (In Russian).
3. GOST 22245-90. Bitumy neftyanye dorozhnye vyazkie. Tekhnicheskie usloviya. – Vved. 1991-01-01. – Mezhgosudarstvennyi standart. – 9 s. https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=30039800&pos=3;-48#pos=3;-48 (data obrashcheniya: 17.02.2025). (In Russian).
4. Ainabekov N.B. Diss. na soiskanie stepeni doktora filosofii (PhD). – Regulirovanie strukturnykh prevrashchenii v protsessakh proizvodstva modifitsirovannykh bitumnykh materialov iz ostatkov neftei Kazakhstanskikh mestorozhdenii, Shymkent, 2024 g. (In Russian).
5. Poslanie Glavy gosudarstva K.K. Tokaeva narodu Kazakhstana «Spravedlivoe gosudarstvo. Edinaya natsiya. Blagopoluchnoe obshchestvO» ot 1 sentyabrya 2022 goda. https://www.akorda.kz/ru/poslanie-glavy-gosudarstva-kasym-zhomarta-tokaeva-narodu-kazahstana -181130 (data obrashcheniya: 17.02.2025). (In Russian).
6. Kataliticheskaya gidropererabotka tyazhelogo neftyanogo syr'ya / A.G. Okunev i dr. // Uspekhi khimii.– 2015. – T. 84, № 9. – S. 981-999. (In Russian).
7. Akhmadova KH.KH. Osnovnye sposoby modifikatsii bitumov razlichnymi dobavkami / KH.KH. Akhmadova, ZH.T. Khadisova, L.SH. Makhmudova // Vestnik GGNTU. Tekhnicheskie nauki. – 2019. –T. XV, № 3(17). – S. 42-52. https://doi.org/10.34708/GSTOU. 2019.17.3.006. (In Russian).
8. Problemy proizvodstva neftyanykh bitumov i kompozitsii na ikh osnove. Analiticheskii obzor [Problems of production of oil bitumens and compositions on their basis. State-of-the-art review.] M.: Tsniitenefneftekhim. – 2002. – 185 p. (In English).
9. Analiz tekushchego sostoyaniya i tendentsii rynka bitumov v Rossii / I.V. Piskunov i dr. https://ngv.ru/articles/analiz-tekushchego-sostoyaniya-i-tendentsii-rynka-bitumov-v-rossii/. (data obrashcheniya 19.02.2025). (In Russian).
10. Dorozhnyi bitum. Kak reshaetsya problema defitsita.URL: https://www.kmg.kz/ru/press-center/articles/bitum-def/ (data obrashcheniya 22.02.2025). (In Russian).
11. Ehffektivnaya pererabotka neftebituminoznykh porod v tselevye produkty / E.K. Ongarbaev i dr. // Gorenie i plazmokhimiya. – 2021. – T. 19, № 4 – R. 299-308. https://doi.org/10.18321/cpc467. (In Russian).
12. Nadirov N.K. Vysokovyazkie nefti i prirodnye bitumy. V 5 t. – Almaty: Ғylym, 2001; Neftebituminoznye porody: dostizheniya i perspektivy. Pod red. N.K. Nadirova. – Alma-Ata: Nauka, 1988. – 308 s. (In Russian).
13. Issledovanie protsessa proizvodstva bituma / G.S. Mambetalieva i dr. // Vestnik KaZATK. – 2024. – № 2(131). https://doi.org/10.52167/1609-1817-2024-131-2-24-33. (In Russian).
14. Kompaniya «OMT-KonsalT». URL: www.omt-consult.ru. (data obrashcheniya: 22.02.2025). (In Russian).
15. Abdel raouf Petroleum sludge formation and its treatment methodologies: a review / M.A. Abdulraheim Hasan et al // Environmental Science and Pollution Research. – 2024. – № 31. – R. 8369-8386. https://doi.org/10.1007/s11356-023-31674-3. (In English).
16. Rakhimova Z.ZH. Primesi syroi nefti, vliyayushchie na protsessy neftepererabotki / Z.ZH. Rakhimova, K.KH. Zhapargazinova // Vestnik Toraigyrov universiteta. Ser.khim-biol. – 2021. – № 2. – S. 6-18. https://doi.org/10.48081/YGTD3586. (In Russian).

17. The Structure of Bitumen: Conceptual Models and Experimental Evidences / M. Porto et al // Materials. – 2022. – Vol. 15. – P. 905. https://doi.org/10.3390/ma15030905. (In English).
18. Petroleum sludge formation and its treatment methodologies: a review / AMA Hasan et al // Environ Sci Pollut Res Int. – 2024. – Feb. 31(6). – R. 8369-8386. https://doi.org/10.1007/s11356-023-31674-3. (In English).
19. BP Statistical Review of World Energy June – 2012. – London. 2012. – p. 16. (In English).
20. Ishekenova B. Kak v Kazakhstane razbirayutsya s neftyanymi otkhodami. – 2020. https://lsm.kz/kak-v-kazahstane-razbirayutsya-s-neftyanymi-othodami (data obrashcheniya: 20.02.2025). (In Russian).
21. Enhancing the biodegradation of total petroleum hydrocarbons in oily sludge by a modified bioaugmentation strategy / R.A. Tahhan et al // International Biodeterioration & Biodegradation. – 2011. – № 65. – P. 130-134. (In English).
22. Glum T.P. Analiz sushchestvuyushchikh tekhnologii pererabotki neftyanykh shlamov v polimernye dobavki dlya asfal'tobetona / T.P. Glum, S.O. Men'shikov, YU.D. Smirnov // Aktual'nye problemy nefti i gaza. – 2021. – № 4(35). – S. 68-77. https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2021-35.art6. (In Russian).
23. Kunakov K.O. Analiz neftyanykh shlamov s primeneniem amperometricheskikh ionoselektivnykh ehlektrodov / K.O. Kunakov, M.V. Kryuchkov // Zapiski Gornogo instituta. – 2008. – T.174. – S. 215-216. (In Russian).
24. Korshunova T.YU. Nefteshlamy: sostoyanie problemy v Rossiiskoi Federatsii i metody snizheniya ikh vozdeistviya na okruzhayushchuyu sredu / T.YU. Korshunova, O.N. Loginov // Ehkobiotekh. – 2019. – T. 2, № 1. – S. 75-85. https://doi.org/10.31163/2618-964X-2019-2-1-75-85. (In Russian).
25. Strizhenok A.V. Ehkologicheskaya otsenka khranilishch neftyanogo shlama kak istochnika vozdeistviya na prizemnuyu atmosferu / A.V. Strizhenok // Nauka XXI veka: novyi podkhod: Materialy XXV molodezhnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh, g. Sankt-Peterburg, Rossiya, Morrisvill': Lulu Press, 2020. – S. 48-52. (In Russian).
26. Thermal desorption treatment of petroleum hydrocarbon-contaminated soils of tundra, taiga, and forest steppe landscapes / M.V. Bykova et al // Environmental Geochemistry and Health. – 2021. – Vol. 43, № 6. – P. 2331-2346. https://doi.org/10.1007/s10653-020-00802-0. (In English).
27. Pat. RU 2193578 C2. Sposob pererabotki neftesoderzhashchikh shlamov / Reshetov V.A., Pavlov V.T., Pavlov A.T. i dr.; № 2000122265/04; Zayavl. 24.08.2000; Opubl. 27.11.2002. Izobreteniya. Polez. modeli. – 2002. – Byul. № 33. http://www.fips1.ru. (In Russian).
28. Afanas'ev S.V. Nefteshlamy kak vtorichnoe syr'e / S.V. Afanas'ev, M.A. Pais, N.S. Nosarev // Delovoi zhurnal Neftegaz.RU. – 2020. – № 3,5(99.5). – S.86-90. (In Russian).
29. Problema obrazovaniya, pererabotki i utilizatsii nefteshlamov / V.A. Gron' i dr. // Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya. – 2013. – № 9. – S.159-162. (In Russian).
30. Baigaziev M.T., Diss. na soiskanie uchenoi stepeni doktora filosofii (PhD).: Povyshenie nefteotdachi plasta na pozdnei stadii razrabotki mestorozhdenii i razrushenie nefteshlamov gidroreagiruyushchimi sostavami, – Almaty, 2019. (In Russian).
31. Solov'yanov A.A. Pererabotka nefteshlamov s ispol'zovaniem khimicheskikh i biologicheskikh metodov / A.A. Solov'yanov // Zashchita okruzhayushchei sredy v neftegazovom komplekse. – 2012. – № 5. – S. 30-39. (In Russian).
32. K probleme obezvrezhivaniya neftyanykh shlamov / R.SH. Sufiyanov i dr. // Izvestiya vuzov. Neft' i gaz. – 2005. – № 6. – S. 117-120. (In Russian).
33. Pat. RU 2217476 C1. Sposob obrabotki neftesoderzhashchikh shlamov / Gubaidullin F.R., Sakhabutdinov R.Z., Ismagilov I.KH. i dr.; № 2002114896/04; Zayavl. 05.06.2002. Opubl. 27.11.2003 // Izobreteniya. Polez. modeli. 2003. Byul. № 33. http://www.fips1.ru. (In Russian).
34. Pat. na polez. model' RU 69065 U1. Tekhnologicheskii kompleks po pererabotke neftesoderzhashchikh otkhodov / Vashchuk V.I., Melamed B.G., Kalinin N.F. i dr.; № 2007126230/22; Zayavl. 09.07.2007; Opubl. 10.12.2007 // Izobreteniya. Polez. modeli. 2007. Byul. № 34. http://www.fips1.ru. (In Russian).
35. Sataeva S. Zhol tөseuge arnalғan bitumdardyң negizgi fizika-khimiyalyқ қasietteri / S. Sataeva, K. Mikhailova // Chemical Journal of Kazakhstan. – 2021. – Vol. 1, № 73. – R. 63-69. https://doi.org/10.51580/2021-1/2710-1185.06. (In Russian).

36. Kenzhegalieva A.R. Modifikatsiya neftyanogo bituma mekhanokhimicheski aktivirovannym shungitom mestorozhdeniya Koksu / A.R. Kenzhegalieva, D.B. Abdikhan, E.K. Ongarbaev // Gorenie i plazmokhimiya. – 2022. – T. 20, № 2. – S. 133-141. https://doi.org/10.18321/cpc537. (In Russian).
37. Ehnergosberegayushchie tekhnologii proizvodstva polimer-modifitsirovannogo bituma / G. Seitenova i dr. // Vestnik Toraigyrov universitet. Seriya ehnergeticheskaya. – 2024. – № 3. – S. 280-294. https://doi.org/10.48081/YYWW4503. (In Russian).
38. Taramov YU.KH. Vliyanie sostava bituma na ehkspluatatsionnye svoistva. / YU.KH. Taramov, P.S. Tsamaeva, A.A. Ehl'murzaev // Vestnik GGNTU. Tekhnicheskie nauki. – 2022. – T. XVIII, № 1 (27). https://doi.org/10.34708/GSTOU. 2022.72.32.007. (In Russian).
39. Polijetilengudronovye vjazhushhie – innovacionnyj material dlja dorozhnogo stroitel'stva / A.A. Gureev et al // [Polyethylene binding materials – innovative material for road construction] World of petroleum products. – 2014. – № 12. – P. 33-35. (In English).
40. Gohmann L.M. Vlijanie vjazkosti bitumov na svojstva polimernobitumnyh vjazhushhih / L.M. Gohmann, K.I. Davydova // [Influence of viscosity of bitumens on properties polymeric and bituminous knitting] Tr. Soyuzdorniya. 1977. – M the Issue 100. – 250 p. (In English).
41. Balabanov V.B. Primenenie organomineral'nyh smesej na osnove kationnyh bitumnyh jemul'sij i jemul'sij na osnove modificirovannyh bitumov / V.B. Balabanov, D.A. Militsyn // [Application the organomineralnykh of mixes on the basis of cationic bituminous emulsions and emulsions on the basis of the modified bitumens] Gerald of Irkutsk state technical university. – 2011. – T. 52, № 5. – P.78-83. (In English).
42. Kompaundirovannye dorozhnye bitumy uluchshennogo kachestva / I.B. Grudkov et al // [Compacted road bitums of improved quality] Oil refining and petrochemicals. – 2001. – № 4. – P. 34-36. (In English).
43. Dolinskaya R.M. Vliyanie rezinovoi kroshki na svoistva neftyanogo bituma / R.M. Dolinskaya, N.R. Prokopchuk // Trudy BGTU. 2021. Ser.2, Khimicheskie tekhnologii, biotekhnologii, geoehkologiya. – 2021. – № 1(241). – S. 172-175. (In Russian).
44. Analysis of Mechanical Performance of Bitumen Modified with Waste Plastic and Rubber Additives by Rheology and Self Diffusion NMR Experiments / Giulia Tarsi et al // Eurasian Chemico-Technological Journal. – 2019. – № 21. – R. 235. https://doi.org/10.18321/ectj864. (In English).
45. A Study of Rubber-REOB Extender to Produce Sustainable Modified Bitumens / Giulia Tarsi et al // Applied Sciences. – 2020. – № 10. – R. 1204. https://doi.org/10.3390/app10041204. (In English).
46. Sustainability Assessment of Green Asphalt Mixtures: A Review / Pouranian et al // Environments 2019, 6(6), 73https://doi.org/10.3390/environments6060073. (In English).
47. Low-Temperature Performance of Toner-Modified Asphalt Binder / M.A. Notani et al // J. Transp. Eng. Part B Pavements. – 2019. – № 145. – 04019022. https://doi.org/10.1061/JPEODX.0000123. (In English).
48. Properties of Foamed Asphalt for Warm Mix Asphalt Applications / D.E. Newcomb et al // Transportation Research Board: Washington, DC, USA, – 2015. – № Project 09-53. (In English).
49. Use of a warm mix asphalt additive to reduce the production temperatures and to improve the performance of asphalt rubber mixtures / J.R.M. Oliveira et al // J.Clean.Prod.41 – 2013. – R.15-22. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.09.047. (In English).
50. Xiao F. E ects of non-foaming WMA additives on asphalt binders at high performance temperatures / F. Xiao, V.S. Punith, S.N. Amirkhanian, // Fuel – 2012. – 94 – R.144-155. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.09.017. (In English).
51. Valorization of Biomass: Deriving More Value From Waste / C.O. Tuck et al // Science. – 2012. – № 337. – R.695-699. https://doi.org/10.1126/science.1218930. (In English).
52. The Use of Lignin for Sustainable Asphalt Pavements: A Literature Review. Constr / E. Gaudenzi et al // Build. Mater. – 2023. – 362. – 129773. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129773. (In English).
53. Jamal M. Chemo-rheological Investigation on Waste Rubber-Modified Bitumen Response to Various Blending Factors / M. Jamal, F. Giustozzi // Int. J. Pavement Res. Technol. – 2022. – № 15. – R. 395-414. https://doi.org/10.1007/s42947-021-00045-x. (In English).
54. Estimation of low-temperature performance of recycled asphalt mixtures through relaxation modulus analysis / A. Stimilli et al // Cold Regions Science and Technology. – 2017. – Vol. 133. – P. 36-45. https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2016.10.013. (In English).
55. Renewable materials in bituminous binders and mixtures: Speculative pretext or reliable opportunity? / Lorenzo Paolo Ingrassia et al // Resources, Conservation and Recycling. – 2019. –

Vol. 144. – Pages 209-222, ISSN 0921-3449, https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.01.034. (In English).
56. Full-scale validation of bio-recycled asphalt mixtures for road pavements / J. Blanc et al // Journal of Cleaner Production. – 2019. – Vol. 227. – P. 1068-1078. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.273. (In English).
57. Shih-Hsien Yang. Rheological behavior of Japanese cedar-based biobinder as partial replacement for bituminous binder / Shih-Hsien Yang, Try Suciptan // Construction and Building Materials. – 2016. – Vol. 114. – P. 127-133. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.100. (In English).
58. Evaluation of optimized bio-asphalt containing high content waste cooking oil residues / Daquan Sun et al // Fuel. – 2017. – Vol. 202. – P. 529-540. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.04.069. (In English).
59. Extraction and characterization of lignin from different biomass resources / D. Watkins et al // Journal of Materials Research and Technology. – 2015. – Vol. 4. – R. 26-32. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2014.10.009. (In English).
60. Effect of Lignin Modifier on Engineering Performance of Bituminous Binder and Mixture. / Xu, Chi et al // Polymers. – 2021. – № 13. – R. 1083. https://doi.org/10.3390/polym13071083. (In English).
61. Long-Term Monitoring of the Behavior of Modified Bitumens of RC Type / M. Varaus et al // Applied Sciences. – 2024. – № 14. – 11794. https://doi.org/10.3390/app142411794. (In English).
62. Emulsion Stabilization by Cationic Lignin Surfactants Derived from Bioethanol Production and Kraft Pulping Processes / A. Yuliestyan et al // Polymers (Basel). – 2022. – № 14(14). – R. 2879. https://doi.org/10.3390/polym14142879. (In English).
63. Bioethanol Production and Alkali Pulp Processes as Sources of Anionic Lignin Surfactants / R. Álvarez-Barajas et al // Polymers (Basel). – 2021. – № 13(16). – 2703. https://doi.org/10.3390/polym13162703. (In English).
64. Laboratory Study on Influence of Blending Conditions on Chemo-Thermal Characteristics of Lignin-Modified Bitumen / R. Gohari et al // Applied Sciences. – 2023. – № 13. – 7766. https://doi.org/10.3390/app13137766. (In English).
65. Effects of Kraft Lignin on the Performance Grade of Two Bitumens Used for Cold Climate / Al-falahat Wesam et al // International Journal of Pavement Research and Technology. – 2023. – № 17. https://doi.org/10.1007/s42947-023-00302-1. (In English).
66. Investigation of the Characteristic Properties of Lignin-Modified Bitumen / S. Kalampokis et al // CivilEng. – 2022. – № 3. R. 734-747. https://doi.org/10.3390/civileng3030042. (In English).
67. Effect of Bio-oil on Rheology and Chemistry of Organosolv Lignin-Modified Bitumen / Zh. Yi et al // Journal of Materials in Civil Engineering. – 2022. – № 34. – R. 1-16. https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004140. (In English).
68. Investigation on Rheological Properties and Microscopic Mechanisms of Sasobit / Liu Wei et al // Buton Rock Asphalt Modified Asphalt. Sustainability. – 2023. – № 15. – 10224. https://doi.org/10.3390/su151310224. (In English).

Финансирование: *Работа выполнена 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*, Ж.Ш. Шәріпхан, Б.Б. Баяхметова, Б.С. Гайсина, Ж.К. Кабышева
Шәкәрім университеті,
071412, Қазақстан, Семей қаласы, Глинки к-сі, 20 А,
*e-mail: alfa-1983@mail.ru

ЖОҒАРЫ САПАЛЫ БИТУМДЫ АЛУ ТЕХНОЛОГИЯСЫНА ШОЛУ: МӘСЕЛЕЛЕР МЕН ПЕРСПЕКТИВАЛАРЫ

Мақалада мұнай өндіру мен қайта өңдеудің жанама өнімдерінен жоғары сапалы битум алудың инновациялық технологияларын әзірлеу мақсатын іске асыру бойынша қойылған міндеттер негізінде отандық және шетелдік әдеби көздерге сараптамалық талдамалық шолу жүргізілді.

Қазіргі ғылыми жұмыстар полимерлі, минералды және биологиялық компоненттерді, сондай-ақ битумды байланыстырғыштардың беріктігі мен тұрақтылығын арттыру үшін қайталама материалдарды қолданудың тиімділігін көрсетеді. SBS (стирол-бутадиен-стирол) сияқты полимерлі модификаторларға ерекше назар аударылады, олар битумның икемділігі мен беріктігін арттырады, крекинг пен деформация ықтималдығын азайтады. Қайта өңделген материалдарды, соның ішінде резеңке чиптерді, вакуумдық газойльді және күл-қоқысты пайдалану битумның қасиеттерін жақсартып қана қоймайды, сонымен қатар қоршаған ортаға теріс әсерді азайтады. Перспективалық бағыт-биомодификаторларды қолдану, олардың арасында лигнин ерекше рөл атқарады-жоғары химиялық және термиялық тұрақтылыққа ие табиғи полимер. Зерттеулер көрсеткендей, битумға лигнинді енгізу оның реологиялық қасиеттерін жақсартады, тотығуға төзімділікті арттырады, сонымен қатар жабынның қаттылығы мен беріктігін арттырады. Лигнин толтырғыш немесе битумды ішінара ауыстыру ретінде әрекет ете алады, бұл оны экологиялық және экономикалық тұрғыдан тиімді компонент етеді.

Полимерлерді, өнеркәсіптік қалдықтарды және биокомпоненттерді қоса алғанда, әртүрлі модификациялаушы қоспаларды қолдану битумның сапасын жақсартуға, оны өндіруге кететін шығындарды азайтуға, технологиялық процестердің энергия тиімділігін арттыруға және жол төсемдерінің қызмет ету мерзімін ұзартуға ықпал етеді. Асфальтбетон қоспасын өндіру және төсеу процесінде битум қасиеттерінің өзгеруін бағалау да маңызды.

Түйін сөздер: *мұнай жол битумы, мұнай өндіру және өңдеу, модификацияланған битум, лигнин, биологиялық компоненттер.*

A. Sabitova*, A. Zh. Sharipkhan, B. Bayakhmetova, B. Gaisina, Zh. Kabysheva
Shakarim University,
071412, Kazakhstan, Semey city, Glinka St., 20A,
e-mail: alfa-1983@mail.ru

REVIEW OF HIGH-QUALITY BITUMEN PRODUCTION TECHNOLOGY: PROBLEMS, PROSPECTS

The article provides an expert analytical review of domestic and foreign literary sources based on the tasks set to achieve the goal of developing innovative technologies for producing high-quality bitumen from by-products of oil production and processing.

Modern scientific work demonstrates the effectiveness of using polymer, mineral and biological components, as well as recycled materials to increase the durability and stability of bitumen binders. Particular attention is paid to polymer modifiers such as SBS (styrene-butadiene-styrene), which increase the elasticity and strength of bitumen, reducing the likelihood of cracking and deformation. The use of recycled materials, including rubber chips, vacuum gas oil and fly ash, not only improves the properties of bitumen, but also reduces the negative impact on the environment. A promising area is the use of biomodifiers, among which lignin, a natural polymer with high chemical and thermal stability, plays a special role. Studies have shown that the introduction of lignin into bitumen improves its rheological properties, increases resistance to aging and oxidation, and increases the rigidity and strength of the coating. Lignin can act as a filler or partial replacement for bitumen, which makes it an environmentally and economically beneficial component.

The use of various modifying additives, including polymers, industrial waste and biocomponents, contributes to improving the quality of bitumen, reducing production costs, increasing the energy efficiency of technological processes and extending the service life of road surfaces. It is also important to evaluate the change in bitumen properties during the production and laying of asphalt concrete mix.

Key words: *petroleum road bitumen, oil extraction and refining, modified bitumen, lignin, biological components.*

Сведения об авторах

Альфира Нуржановна Сабитова* – PhD, ассоциированный профессор кафедры «Химия и экология» Шәкәрім университета, Республика Казахстан; e-mail: alfa-1983@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3360-7998.

Жанна Шәріпханқызы Шәріпхан – преподаватель кафедры «Химия и экология» Шәкәрім университета, Республика Казахстан; e-mail: zhanka_81@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2484-7287.

Булбул Баяхметовна Баяхметова – кандидат химических наук, ассоциированный профессор кафедры «Химия и экология» Шәкәрім университета, Республика Казахстан; e-mail: bulbul.bayahmetova@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/ 0000-0002-5663-5107.

Балжан Сайлауовна Гайсина – старший преподаватель кафедры «Химия и экология» Шәкәрім университета, Республика Казахстан; e-mail: balzhan-1982@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8468-2744.

Жанар Кобегеновна Кабышева – старший преподователь кафедры «Химия и экология», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: K_ghan_k78@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9999-816X.

Авторлар туралы мәліметтер

Альфира Нуржановна Сабитова* – PhD, «Химия және экология» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Шәкәрім университеті, Қазақстан; e-mail: alfa-1983@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3360-7998.

Жанна Шәріпханқызы Шәріпхан – магистр, «Химия және экология» кафедрасының оқытушысы, Шәкәрім университеті, Қазақстан; e-mail: zhanka_81@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2484-7287.

Булбул Баяхметовна Баяхметова – химия ғылымдарының кандидаты, «Химия және экология» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Шәкәрім университеті, Қазақстан; e-mail: bulbul.bayahmetova@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/ 0000-0002-5663-5107.

Балжан Сайлауовна Гайсина – магистр, «Химия және экология» кафедрасының аға оқытушысы, Шәкәрім университеті, Қазақстан; e-mail: balzhan-1982@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8468-2744.

Жанар Кобегеновна Кабышева – «Химия және экология» кафедрасының аға оқытушысы Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: K_ghan_k78@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9999-816X.

Information about the authors

Alfira Sabitova* – PhD, Associate Professor of the Department of Chemistry and Ecology, Shakarim University, Kazakhstan; e-mail: alfa-1983@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3360-7998.

Zhanna Sharipkhan – Lecturer of the Department of Chemistry and Ecology, Shakarim University, Kazakhstan; e-mail: zhanka_81@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2484-7287.

Bulbul Bayakhmetova – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of Chemistry and Ecology, Shakarim University, Kazakhstan; e-mail: bulbul.bayahmetova@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/ 0000-0002-5663-5107.

Balzhan Gaisina – Senior Lecturer of the Department of Chemistry and Ecology, Shakarim University, Kazakhstan; e-mail: balzhan-1982@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8468-2744.

Zhanar Kabysheva – Assistant Professor of the Department of Chemistry and Ecology», Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: K_ghan_k78@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9999-816X.

Поступила в редакцию 03.04.2025
Поступила после доработки 26.05.2025
Принята к публикации 27.05.2025

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-69

ҒТАХР: 61.33.31

CC BY 4.0
Check for updates

А.М. Рахметова, Г.К. Алшынбекова*, Э.А. Кульмагамбетова, Н.Т. Сагиндикова, А.Т. Шилменова

Қазақстан Республикасы Еңбек және халықты әлеуметтік қорғау министрлігінің Еңбекті қорғау жөніндегі республикалық ғылыми-зерттеу институты ШМҚ РМК
Z00K8X5, Қазақстан Республикасы, Астана қ., Кравцов к-сі 18
*e-mail: alshynbekovagulnaziya@gmail.com

ӨҢДЕУ ӨНЕРКӘСІБІ ЖҰМЫСКЕРЛЕРІНІҢ ДЕНСАУЛЫҚ ЖАҒДАЙЫНА ӨНДІРІСТІК ОРТАДАҒЫ ХИМИЯЛЫҚ ФАКТОРЛАРДЫҢ ӘСЕРІ

Аңдатпа: *Мақалада химиялық профилі өңдеу өнеркәсібі кәсіпорнының технологиялық және химиялық ортасын және оның жұмыскерлердің денсаулығына әсерін талдау ұсынылған. Зерттеудің мақсаты технологиялық ортаның ерекшеліктерін ескере отырып, технологиялық циклдің негізгі кезеңдеріндегі еңбек жағдайларын гигиеналық бағалау және зиянды химиялық факторлардың әсері мен қызметкерлердің аурушаңдығы арасындағы байланысты анықтау болды. Технологиялық процестер қарқынды шаңның пайда болуымен және уытты химиялық заттардың бөлінуімен қатар жүретіні анықталды, олардың концентрациясы кейбір жағдайларда рұқсат етілген шекті деңгейден*

©А.М. Рахметова, Г.К. Алшынбекова*, Э.А. Кульмагамбетова, Н.Т. Сагиндикова, А.Т. Шилменова

асып түсті. Зиянды факторлардың құрылымында бейорганикалық шаң, оның ішінде кварцы бар компоненттер, минералды тыңайтқыштардың шаңы, әлсіз фиброгенді аэрозольдер, бейорганикалық қосылыстардың буы мен газдары басым болды. Корреляциялық талдау аталған факторлардың әсері мен тыныс алу органдары ауруларының, пневмокониоздың және асқазан-ішек жолдарының патологияларының дамуы арасындағы статистикалық маңызды байланысты анықтады. Алынған нәтижелер кәсіпорынның технологиялық ортасының жұмыскерлердің денсаулығына қолайсыз әсерін растайды және еңбек жағдайларын жақсартуға, персоналдың қауіпсіздігін арттыруға және "жасыл" технологияларды енгізуге бағытталған кешенді алдын алу шараларын әзірлеу және енгізу қажеттілігін негіздейді, бұл экологиялық таза процестерге көшуге және жұмысшылардың өмір сүру сапасын арттыруға ықпал етеді.

Түйін сөздер: *өңдеу кәсіпорны, технологиялық процесс, еңбек жағдайлары, химиялық фактор, бейорганикалық шаң, фосфин, әлсіз фиброгендік аэрозольдер, жұмысшылардың денсаулығы*

Кіріспе

Қазіргі таңда жұмыс істейтін халықтың денсаулығын сақтау мәселесі елімізде ең маңызды міндеттердің бірі болып табылады. Бұл мәселе әсіресе еңбек жағдайлары зиянды және қауіпті болып табылатын өнеркәсіп салаларының қызметкерлері үшін ерекше өзектілікке ие [1-3].

Осындай салалардың бірі-Қазақстан Республикасының экономикасында серпінді дамып келе жатқан әрі жүйеқұраушы маңызы бар химия өнеркәсібі. Бүгінгі таңда елімізде химия саласында шамамен 800-ге жуық кәсіпорын жұмыс істейді, ал өндіріс көлемінің негізгі бөлігін 12 ірі зауыт қамтмасыз етеді. Солардың қатарында химиялық өңдеуші зауыттардың қарқынды дамуы,әлемдік тәжірибеде үлкен жетістіктерге жетуде.

Өңдеуші кәсіпорындардағы еңбек жағдайлары зиянды әрі қауіпті өндірістік факторлардың ықпалымен ерекшеленеді. Қазіргі кезеңде еңбек процесі анықтауды, жалпы сипаттауды немесе бағалауы күрделене түсетін көптеген өндірістік факторларды қамтиды. Осыған байланысты еңбек жағдайларын бағалау барысында зиянды және (немесе) қауіпті өндірістік факторларды жан-жақты зерттеуге, сондай-ақ кәсіптік ауруларды тудыратын қауіпті барынша төмендетуге ерекше назар аударылып отыр [4-6].

Көптеген авторлардың пікірінше [7-9] өндірістік ортада жұмыс істейтін жұмыскерлер әртүрлі кәсіптік зиянды факторлардың кешенді әсеріне ұшырайды, олардың қатарына химиялық заттар, қоспалар, өндірістік шаң, қолайсыз микроклиматтық жағдайлар, жоғары шу мен діріл деңгейі, ал кейбір өндірістерде иондаушы сәулелену мен ультрадыбыстық әсерлер жатады. Ал осы факторлар жұмыскерлердің денсаулығына жағымсыз әсер ететіндігі және олардың еңбек жағдайларын гигиеналық тұрғыдан бағалау кезінде жан-жақты ескеруді талап етеді. Өндірістік ортаның көпқырлылығына қарамастан, өндіру өнеркәсібінде зиянды химиялық факторлар еңбек жағдайларын бағалауда жетекші орын алады, бұл өз кезегінде өндірістік қауіпсіздікті күшейту мен профилактикалық шараларды жетілдірудің маңыздылығын көрсетеді.

Зерттеудің мақсаты: өңдеу өнеркәсібі жұмыскерлерінің денсаулық жағдайына өндірістік ортадағы химиялық факторлардың әсерін бағалау.

Материалдар мен әдістер. Зерттеудің мақсаты-кәсіпорындарда басым зиянды химиялық факторлардың әсерін анықтау.

Ғылыми зерттеу жұмыстары еліміздің 2 пилоттық өңдеу кәсіпорындарында жүргізілді. Ғылыми зерттеу жұмыстары өндірістік орта факторларын өлшеуді, визуалды мониторингті, кәсіпорындардағы кәсіптік тәуекелді бағалау нәтижелерін талдауда еңбек жағдайларының, зиянды және қауіпті факторлардың және олармен байланысты аурулардың санаты туралы талдамалық деректерді жүргізу арқылы жүргізілді. Ғылыми зерттеулер жүргізу үшін шартты түрде белгіленген өңдеу өнеркәсібінің «пилоттық» кәсіпорындарына барып ғылыми жұмыстар жүргізу жүзеге асырылды.

1-ші пилоттық кәсіпорын фосфорлы химиялық өнімдерді өңдеу бойынша қызметті жүзеге асырады, агломерация және шикізат дайындау, электр пештеріндегі жоғары температурадағы редукция, газды тазарту мен фильтрация жасау, фосфордың туыстық өнімдерін өңдеп алумен және тасымалдаумен байланысты.

1-ші кәсіпорынның құрылымы 23 бөлімшеден тұрады, жұмыскерлер саны 2783 адам, оның ішінде әйелдер – 510, оның ішінде еңбек жағдайлары зиянды жұмыс орындарында: барлығы – 2260 (81,2%), оның ішінде әйелдер – 325 (14,4%).

2-ші пилоттық кәсіпорын фосфоритті күкірт қышқылымен өңдейді, мұнда минералды тыңайтқыштар мен экстрациялық фосфор қышқылын, контактлы күкірт қышқылын, жөндеу-құрылыстарын, фторсызданған жемдік фосфатты өндіреді.

2-ші кәсіпорынның құрылымы 6 бөлімшеден тұрады, жұмыскерлер саны 1626 адам, оның ішінде әйелдер – 515, оның ішінде еңбек жағдайлары зиянды жұмыс орындарында: барлығы – 1478 (90,9%), оның ішінде әйелдер – 415 (28%).

Химиялық өндіріс жұмыскерлерінің еңбек жағдайларын өндірістік ортадағы химиялық факторлардың әсерін талдау кезінде қолданылған гигиеналық зерттеулер мен бағалаулар қолданыстағы нормативтік құжаттарға сәйкес орындалды. [10, 11].

Жұмыс орындарында зиянды өндірістік факторлардың болуы туралы ақпарат еңбек жағдайлары бойынша жұмыс орындарын аттестаттау материалдарынан, сондай-ақ кәсіпорында 2024 жылы жүргізілген кәсіптік тәуекелдерді бағалау туралы есептерден алынды. Зиянды және қауіпті өндірістік факторларды талдау өндірістік объектілердің еңбек жағдайларын бағалау нәтижелері бойынша жүргізілді.

Пирсон коэффициентін анықтау үшін химиялық факторлар мен жұмыскерлердің тіркелген аурушаңдық көрсеткіштерінің арасындағы байланысты анықтау үшін корреляциялық талдау жүргізілді. Біз регрессия коэффициенттерін (R) есептей отырып, регрессиялық талдау жасадық. Статистикалық маңыздылық деңгейі $p<0,05$, $p<0,01$ және детерминация коэффициенті (R_2) жоғары модельдер салынған. Қалдықтардың қалыпты таралуы гистограмма бойынша анықталды.

Нәтижелер мен талқылаулар

Зерттеу барысында химия өнеркәсібінің өңдеу саласындағы кәсіпорындардың технологиялық үрдісі мынандай:

1-ші кәсіпорынның технологиялық қызметі: сары фосфор өндірісі; құрамында фосфор бар химия өндірісі; агломерат, сары фосфор, техникалық термиялық ортофосфор қышқылы, техникалық натрий триполифосфаты, техникалық натрий гексаметафосфаты, түйіршікті термофосфор қожы, феррофосфор, техникалық түйіршікті натрий триполифосфаты, Тағамдық химия өндірісі ортофосфор қышқылы, тағамдық триполифосфат натрийді өңдеу болып табылады. Ғылыми зерттеулер кәсіпорынның бес негізгі цехтарында жүргізілді. Олар: «Ұнтақтау және кептіру» цехы шикізатты дайындауға арналған, «Агломерация» және «Сары фосфор өндірісі» цехтарында ойық таспалы конвейерлер сияқты негізгі технологиялық жабдық қолданылады. «Сары фосфорды пысықтау» цехында тауарлық фосфор алу жүзеге асырылады. «Азот-оттегі өндірісі» цехы сары фосфор өндірісінің технологиялық схемасының құрамына кіреді және зауытқа азот газын өндіру және жеткізу үшін пайдаланылады.

2-ші кәсіпорынның қызметінің негізгі түрлері: геологиялық барлау жұмыстарын жүргізу, фосфорит кенін өндіру және өңдеу, фосфорлы минералды тыңайтқыштар мен жемшөп фосфаттарын өндіру болып табылады. Ғылыми зерттеулер алты негізгі цехта: Аммофос1, Аммофос №2, экстракциялық фосфор қышқылы цехы, түйіспе күкірт қышқылы цехы, жөндеу – құрылыс цехы, азықтық фосфорсыздандырылған фосфат өндіру цехында жүргізілді.

Зиянды және қауіпті өндірістік факторларды талдау өндірістік объектілердің еңбек жағдайларын бағалау нәтижелері бойынша, кәсіпорындардың минералды шикізат қосылған құны жоғары өнімді өңдеу кезінде, технологиялық циклы шикізатты дайындаудан басталатын, оған ұсақтау, жіктеу және берілген параметрлерге дейін кептіру, пеш агрегаттарында шикізатты жоғары температурада өңдеу, алынған өнімдерді салқындату, тазарту және одан әрі өңдеу кезеңдерінде ауаның шаңдануы және оның құрамындағы химиялық зиянды факторлардың артуы, жұмыскерлердің денсаулығына қатты ықпал ететіндігі анықталды.

Пилоттық кәсіпорындардың цехтарын зерттеу барысында зиянды және қауіпті өндірістік факторлардың, оның ішінде химиялық факторлардың рұқсат етілген шекті шамалары (РЕШШ) мен рұқсат етілген шекті деңгейлерінің (РЕШД) (ары қарай-РЕШШ/РЕШД) мөлшерінің шамадан тыс артып кеткені байқалады.

Өндірістердің қарастырылған технологиялық сипаттамалары, қолданылатын шикізат және өндірістік процестердің ерекшеліктері жұмыс ортасының химиялық факторларының қалыптасуын анықтайды. Осы технологиялық ерекшеліктерді ескере отырып, кәсіпорын жұмысшыларының еңбек жағдайында зиянды химиялық заттардың рұқсат етілген шекті концентрациясының артуына талдау жасалады.

1-кестеден көріп отырғанымыздай, зиянды және қауіпті өндірістік факторларды талдау өндірістік объектілердің еңбек жағдайларын бағалау нәтижелері бойынша орындалды. Талдау

барысында химиялық фактор бойынша шекті рұқсат етілген концентрациялардың (бұдан әрі-РЕШШ) асып кетуі анықталды.

Кесте 1 – Кәсіпорын қызметкерлерінің еңбек жағдайында зиянды химиялық заттардың рұқсат етілген шекті шамадан концентрациясының асып кету

Зиянды химиялық заттар	РЕШШ/РЕШД көрсеткіштері
1-ші кәсіпорын	
Бейорганикалық шаң (кокс, фосфорит, гипс)	18 мг/м^3
Бейорганикалық шаң (кварцит)	2,94мг/м^3
Фосфин PH_3	0,33 мг/м^3
Фосфор оксиді	2,0 мг/м^3
Бейорганикалық шаң (агломерат, шихта)	27,9 мг/м^3
Бейорганикалық шаң (ақ фосфор)	0,34 мг/м^3
Бейорганикалық шаң (кальцийленген тұз)	2,09 мг/м^3
2-ші кәсіпорын	
Әлсіз фиброгенді аэрозольдер (аммофос шаңы, фосфор ангидриді және азот)	16,8 мг/м^3
Темір үш оксиді	8,5 мг/м^3
Аммиак	21,3 мг/м^3
Марганец оксиді	2,0 мг/м^3
Фторгаз	1,52 мг/м^3
Күкірт қышқылының буы	0,62 мг/м^3
Күкіртті ангидрид	9,56 мг/м^3

Бірінші кәсіпорында кокс, фосфорит және гипстен тұратын бейорганикалық шаң концентрациясының 18,0 мг/м^3 көрсетті, бұл белгіленген РЕШШ-дан (6,0 мг/м^3 нормада) 3 есе асады. Бейорганикалық шаңның рұқсат етілген шекті шамадан асып кетуі созылмалы шаң бронхиті, пневмокониоз, фосфор флюорозы сияқты кәсіби аурулардың дамуына әкелуі мүмкін. Сондай – ақ кварцит шаңының – 2,94 мг/м^3 (РЕШШ-дан 1,0 мг/м^3 кезінде) және бейорганикалық шаңның (агломерат, шихта) – 27,9 мг/м^3 (РЕШШ-дан 4,0 мг/м^3 кезінде) елеулі асып кетуі анықталды.

Ақ фосфордың 0,34 мг/м^3 (РЕШШ-дан 0,03 мг/м^3 кезінде), концентрацияда болуы, оның жоғары уыттылығы мен жедел уланудың қаупін ескере отырып, қосымша қауіп факторы болып табылады. Фосфин концентрациясы РЕШШ-дан 0,33 мг/м^3-тен асады, бұл ерекше назар аударуды қажет етеді, өйткені бұл газ айқын уытты әсерге ие және тыныс алу органдарының ауруларын, орталық жүйке жүйесінің (бұдан әрі-ОЖЖ), жүрек-қантамыр жүйесінің (бұдан әрі-ЖҚЖ), бауыр мен бүйректің зақымдануын, сондай-ақ тері мен көздің зақымдануын тудыруы мүмкін.

Зиянды химиялық факторлардың әсерін талдау нәтижелері бойынша 2-ші кәсіпорында бірқатар химиялық заттар бойынша шекті рұқсат етілген концентрациялардың айтарлықтай асып кетуі анықталды.

Әлсіз фиброгендік аэрозольдердің концентрациясы 8,8-16,8 мг/м^3 құрайды, бұл нормативтік мәндерден асып түседі және пневмокониоз, созылмалы бронхит, созылмалы обструктивті өкпе ауруы және аллергиялық реакцияларды қоса алғанда, кәсіби аурулардың дамуына ықпал етуі мүмкін.

Құрамында 52% P_2O_5 және 12% азот бар аммофос шаңы айқын тітіркендіргіш әсерге ие, ол тыныс алу органдарының ауруларын, аллергиялық реакцияларды, асқазан-ішек жолдарының зақымдануын, сондай-ақ созылмалы бронхитті тудыруы мүмкін.

Темір триоксидінің концентрациясы 8,5 мг/м^3, аммиак 21,3 мг/м^3 көрсетуі, бұл жұмысшылардың денсаулығына үлкен қауіп төндіреді. Бұл заттардың әсер етуі респираторлық аурулардың (темір үш оксиді) дамуына, көру мүшелерінің зақымдалуына, терінің күйіп қалуына және тыныс алу жолдарының созылмалы ауруларына (аммиак) әкелуі мүмкін. Фосфор қышқылы аэрозольдерінің (1,2 мг/м^3) және құрамында фтор бар газдардың (1,52 мг/м^3) болуы қосымша тіркелді, бұл өндірістік ортаның химиялық ластануының жоғары деңгейін көрсетеді. Бұл заттар тыныс алу органдарының ауруларын, көздің шырышты қабығының тітіркенуін, терінің күйіп қалуын, сондай-ақ неврологиялық белгілерді тудыруы мүмкін. Әлсіз фиброгенді аэрозольдер концентрациясының артуы (5,39-10,7 мг/м^3) және 0,34-

0,62 мг/м^3 диапазонында күкірт қышқылы буларының болуы тыныс алу жолдарының тітіркенуін, көру органдарының зақымдануын, терінің күйіп қалуын және асқазан-ішек жолдарының ауруларын қоса алғанда, өткір және созылмалы аурулардың дамуына әкелетін қауіпті химиялық факторлардың әсерін көрсетеді [8, 12].

Сонымен қатар, екі өңдеу кәсіпорнында зиянды химиялық заттардың шамадан тыс бөлінуі, ал 1-ші кәсіпорында бейорганикалық шаңның жоғары деңгейі жұмысшылардың денсаулығына кері әсер етіп, тыныс алу органдарының ауруларына (силикоз, пневмокониоз, созылмалы бронхит), аллергиялық ауруларға және байланыс дерматитіне әкелуі мүмкін. Ақ фосфордың ауадағы мөлшерінің шектен тыс артуы жедел улану мен созылмалы аурулардың қаупін арттырады. Сонымен қатар, 2-ші кәсіпорында жүргізілген зерттеулер барысында аммиак пен әлсіз фиброгенді аэрозольдердің жоғары концентрациялары анықталып, қауіпті химиялық заттардың алуан түрлілігі байқалды, бұл жұмыскерлердің денсаулығына (пневмокониоз, созылмалы бронхит, аллергиялық реакциялар) қосымша қауіп төндіреді. Күкірт қышқылының буы мен күкірт ангидриді сияқты заттардың болуы ауыр аурулардың дамуына және жұмыскерлер денсаулығының нашарлауына әкелуі мүмкін. Жалпы алғанда, екі кәсіпорын да жоғары химиялық тәуекелдерге тап болып отыр: 1-ші кәсіпорын бейорганикалық шаңның жоғары деңгейінің әсеріне ұшыраса, ал 2-ші кәсіпорын қауіпті химиялық заттардың кең спектрінің әсеріне ұшырайды. Бұл жағдай еңбек қауіпсіздігін қамтамасыз етуге бағытталған кешенді шараларды әзірлеу мен енгізу қажеттігін көрсетеді.

Жоғарыда келтірілген өңдеу өнеркәсібінің мәліметтері бойынша өндірістік ортада химиялық факторлардың рұқсат етілген деңгейден асуы және олардың жұмыскерлер денсаулығына қауіп тудыратындығы анықталды. Осыған байланысты химиялық заттардың концентрациясы мен жұмыскерлердің тіркелген аурушаңдық көрсеткіштерінің арасындағы өзара байланысты анықтау қажеттігі туындайды. Осы факторлардың өзара байланысын бағалау үшін Пирсон корреляция коэффициенті негізінде корреляциялық анализ жүргізілді**.**

Жүргізілген деректерді талдау барысында 1-ші кәсіпорындағы бейорганикалық шаңның ластану деңгейі бойынша жұмыскерлер арасында әртүрлі шаң түрлерінің концентрациясы мен аурулардың жиілігі арасындағы статистикалық маңызды оң корреляциялық байланыстың бар екендігін көрсетті (2 кесте). Атап айтқанда, бейорганикалық шаңның (кварцит) концентрациясы мен жоғарғы тыныс жолдары ауруларының жиілігі арасында статистикалық тұрғыдан маңызды күшті оң корреляциялық байланыс анықталды (r=0,97, p<0,01). Сонымен қатар, бейорганикалық шаңның (кокс, фосфорит, гипс) деңгейі мен жоғарғы тыныс жолдары ауруларының жиілігі арасында да күшті оң корреляция байқалды (r = 0,84, p <0,01). Ал фосфин шаңының деңгейі мен жоғарғы тыныс жолдары ауруларының жиілігі арасында статистикалық тұрғыдан маңызды орташа оң корреляция анықталды (r = 0,34, p <0,01). Бұған қоса, фосфин шаңының деңгейі мен асқазан-ішек жолдары ауруларының жиілігі арасында да орташа оң корреляциялық байланыс тіркелді (r = 0,38, p <0,01).

Кесте 2 – 1-ші кәсіпорындағы химиялық заттардың концентрациясы мен жұмыскерлердің тіркелген аурушаңдық көрсеткіштерінің арасындағы корреляциялық өзара байланысы

Зиянды химиялық заттар	Пирсон корреляциясы	Жоғарғы тыныс жолдары аурулары	Асқазан-ішек жолдарының аурулары
Бейорганикалық шаң (кварцит)	Пирсон Корреляциясы	0,971(**)	-
	екі жақты маңыздылығы	0,000	-
Бейорганикалық шаң (кокс, фосфорит, гипс)	Пирсон Корреляциясы	0,844(**)	-
	екі жақты маңыздылығы	0,000	-
Бейорганикалық шаң (фосфин)	Пирсон Корреляциясы	-	0,387(**)
	екі жақты маңыздылығы	-	0,000
Фосфин (PH_3) мг/м^3	Пирсон Корреляциясы	0,567(**)	0,280(*)
	екі жақты маңыздылығы	0,000	0,033
Азот диоксиді	Пирсон Корреляциясы	0,408(*)	
	екі жақты маңыздылығы	0,012	

*Ескерту: * p <0,05 (екі жақты маңыздылығы); ** p <0,01 (екі жақты маңыздылығы).*

Фосфин деңгейі (PH_3) мен жоғарғы тыныс жолдарының ауруларының жиілігі (r = 0,56, p < 0,01) арасындағы орташа оң корреляция анықталды. Фосфин деңгейі (PH_3) мен асқазан-ішек жолдарының ауруларының жиілігі (r = 0,28, p<0,05) арасында оң корреляция да анықталды.

Талдауды зерттеу барысында 1-ші кәсіпорынның «Фосфорды қайта өңдеу, бейтараптандыру және жағу» цехында да фосфин деңгейі (PH_3) мен жоғарғы тыныс жолдарының ауруларының жиілігі (r=0,56, p<0,01) арасындағы орташа оң корреляция анықталғаны анықталды, бұл осы параметрлер арасында орташа тәуелділіктің болуын көрсетеді. Сондай-ақ, фосфин деңгейі мен асқазан-ішек жолдарының ауруларының жиілігі (r = 0,28, p<0,05) арасында оң корреляция анықталды, бұл жұмыс ортасындағы фосфин концентрациясы мен жұмыскерлердің жиілігі арасындағы әлсіз, бірақ статистикалық маңызды байланысты көрсетеді. Нәтижелер фосфиннің жұмыскерлердің денсаулығына, әсіресе жоғарғы тыныс жолдарының аурулары тұрғысынан әсер етуінің ықтимал қаупін көрсетеді.

«Азот-оттегі өндірісі» цехының еңбек жағдайларын талдау нәтижесінде жұмыс ортасындағы азот диоксидінің концентрациясы мен жұмыскерлер арасындағы жоғарғы тыныс алу жолдарының ауруларының жиілігі (r=0,40, p<0,05) арасындағы орташа оң корреляцияны көрсетті, бұл осы химиялық агенттің тыныс алу денсаулығына ықтимал теріс әсерін көрсетеді.

Сонымен, 1-ші кәсіпорын бойынша: жұмыс аймақтарының ауасында: бейорганикалық шаң (кокс, фосфорит, агломерат, шихта), фосфин (PH_3), ақ фосфор (P), фосфор оксиді (P_2O_5) кездесетіні анықталды. Ал шикізатты дайындау және агломерат өндіру цехтарында ең көп шаңдану байқалды.

Өңдеуші 2-ші пилоттық кәсіпорында жұмыс орындарындағы химиялық факторлардың әсері аммофос шаңының (құрамында 52% P_2O_5 фосфор ангидриді және 12% азот), темір триоксидінің, аммиактың болуымен сипатталады. Ауаның шаңдануы № 1 және № 2 цехтарда, дайын шикізатты алып шығу, фосфордың сығындысын алу учаскелерінде байқалды. № 3 цехта жұмыс аймағы ауасында өлшенген заттар (фосфогипс шаңы), фосфор қышқылының аэрозольдері, фторгаздар, аммиак, темір III оксиді, марганец оксиді анықталды. Ал № 4 және № 5 цехтарда күкірт қышқылының булары, әлсіз фиброгенді аэрозольдер (құрамындағы фосфогипс шаңында әдетте шамамен 12-16% фосфор P_2O_5 және 20-30% гипс ($CaSO_4$ $2H_2O$), күкірт ангидриді, темір III оксиді бар – күкірт қышқылының буы,фтор газы HF (фтор сутегі), аммиак, марганец және оның қосылыстары, дизель отыны, марганец оксиді, темір III оксиді болуы тіркелген.

2-ші пилоттық кәсіпорында зиянды химиялық факторлардың әсеріне байланысты бірқатар химиялық заттар бойынша рұқсат етілген шекті нормалардың едәуір асып кетуі анықталды. Әлсіз фиброгенді аэрозольдердің концентрациясының шектен тыс жоғарылауы пневмокониоздардың, созылмалы бронхиттің, өкпенің созылмалы обструктивті ауруының және аллергиялық реакциялардың дау қаупін арттырады. Сонымен қатар, темір III оксидінің концентрациясы (8,5 мг/м^3) мен аммиактың деңгейі (21,3 мг/м^3) жұмыскерлердің денсаулығына елеулі қауіп төндіріп, тыныс алу жүйесі ауруларының дамуына (темір III оксиді), сондай-ақ көздің зақымдануына, терінің химиялық күйіктеріне және тыныс алу жолдарының созылмалы ауруларына (аммиак) әкелуі мүмкін.

Зерттеу нәтижелері күкіртті ангидридтің деңгейі мен жоғарғы тыныс жолдары ауруларының жиілігі арасында статистикалық тұрғыдан маңызды күшті оң корреляциялық байланыстың бар екенін көрсетті (r =0,93, p<0,01). Сол сияқты, күкірт қышқылы буының концентрациясы мен жоғарғы тыныс жолдары ауруларының жиілігі арасында да күшті оң корреляция анықталды (r = 0,93, p<0,01). Сонымен қатар, фосфогипс шаңының деңгейі мен жоғарғы тыныс жолдары ауруларының жиілігі арасында статистикалық тұрғыдан күшті оң корреляциялық байланыс тіркелді (r =0,78, p<0,01) (3 кесте).

Фторгаз деңгейі мен жоғарғы тыныс жолдарының ауруларының жиілігі арасындағы орташа оң корреляция анықталды (r = 0,54, p <0,01). Фторгаз деңгейі мен орталық жүйке жүйесінің ауруларының жиілігі арасында орташа (r = 0,34, p < 0,01) оң корреляцияда анықталды, бұл құрамында фтор бар қосылыстардың тыныс алу органдарына тітіркендіргіш және уытты әсерін көрсетеді. Сондай-ақ, фторгаз деңгейі мен орталық жүйке жүйесі ауруларының жиілігі (R =0,34, p <0,01) арасындағы статистикалық маңызды орташа оң корреляция анықталды, бұл ұзақ уақыт әсер еткенде фторгаздың нейротоксикалық әсерін көрсетуі мүмкін.

Қорытындылай келе, жүргізілген зерттеу нәтижелері өндірістік ортада әртүрлі химиялық құрамдағы шаңның әсері жұмыскерлердің денсаулығына жоғары кәсіптік қауіп төндіретінін көрсетті. Әлсіз фиброгенді аэрозольдер жетекші зиянды факторлар ретінде айқындалды. Ұсақ дисперсті бөлшектердің өкпенің альвеолярлық аймақтарына терең енуі және альвеолярлық

макрофагтармен фагоциттелуі қабыну процестерінің дамуына, нәтижесінде тыныс алу жүйесінің созылмалы ауруларының қалыптасуына ықпал етеді. Зиянды факторлардың әсер ету деңгейі мен аурушаңдық көрсеткіштері арасында анықталған статистикалық тұрғыдан сенімді корреляциялық байланыстар олардың кәсіптік тәуекелдердің қалыптасуындағы шешуші рөлін дәлелдейді.

Кесте 3 – 2-ші өндірістік ортаның зиянды факторларының әсерінен ағза жүйелері бойынша аурулардың корреляция коэффициенттері

Зиянды химиялық заттар	Пирсон корреляциясы	Жоғарғы тыныс жолдары аурулары	Жоғарғы тыныс жолдары аурулары	Күкіртті ангидрид (мг/м^3)	Күкірт қышқылының буы, мг/м^3	Әлсіз фиброгенді аэрозольдер (фосфогипс шаңы) (мг/м^3)	HF қайта есептегенде фторгаздар
Жоғарғы тыныс жолдары аурулары	Пирсон Корреляциясы	-	-	0,933(**)	0,931(**)	0,788(**)	0,540(**)
	екі жақты маңыздылығы		-	0,000	0,000	0,000	0,000
Асқазан-ішек жолдарының аурулары	Пирсон Корреляциясы	-	-	0,882(**)	0,886(**)	0,779(**)	
	екі жақты маңыздылығы	-		0,000	0,000	0,000	
Күкіртті ангидрид (мг/м^3)	Пирсон Корреляциясы	0,933(**)	0,882(**)	-	-	-	
	екі жақты маңыздылығы	0,000	0,000		-	-	
Күкірт қышқылының буы, мг/м^3	Пирсон Корреляциясы	0,931(**)	0,886(**)	-	-	-	
	екі жақты маңыздылығы	0,000	0,000	-		-	
Әлсіз фиброгенді аэрозольдер (фофогипс шаңы) (мг/м^3)	Пирсон Корреляциясы	0,788(**)	0,779(**)	-	-	-	
	екі жақты маңыздылығы	0,000	0,000	-	-	-	
HF қайта есептегенде фторгаздар	Пирсон Корреляциясы	0,540(**)					
	екі жақты маңыздылығы	0,000					

*Ескерту: * p <0,05 (екі жақты маңыздылығы); ** p <0,01 (екі жақты маңыздылығы).*

Қорытынды

Осылайша, зерттеу нәтижелері өндірістік ортаның химиялық факторлары, соның ішінде фосфор қосылыстары, шаң және газ тәрізді заттар өңдеу өнеркәсібі қызметкерлерінің денсаулығына айтарлықтай әсер ететінін көрсетеді.

Өңдеу кәсіпорындарында шаң мен фосфиннің басым болуы тыныс алу, тері және жүйелік аурулардың, соның ішінде пневмокониоз және фосфор флюорозының қаупімен байланысты. Сонымен қатар, химиялық ластанудың жоғары деңгейі аммофос шаңы, фосфор қышқылы аэрозольдері және газдары (HF, NH_3) бар цехтармен сипатталады, бұл тыныс алу, асқазан-ішек, аллергиялық және сенсорлық бұзылулардың дамуына ықпал етеді.

Химиялық факторлардың концентрациясы мен аурулардың жиілігі арасындағы статистикалық маңызды корреляциялар химиялық заттардың жұмыскерлердің денсаулығына әсер етуінің себеп-салдарлық байланысын растайды.

Әдебиеттер тізімі

1. Михайлуц А.П. Влияние на состояние здоровья работников химических производств профессиональных и экологических нагрузок вредными веществами/ А.П. Михайлуц, А.Н. Першин, С.А. Максимов // Бюллетень ВСНЦ СО РАМН. – 2005. – № 8(46). – С. 141-144.
2. Безрукова Г.А. Современное состояние условий труда и здоровья работников предприятия химического оргсинтеза / Г.А. Безрукова, Т.А. Новикова // Мед. труда и пром. экол. – 2021. – № 61(6). – С. 408-414. https://doi.org/10.31089/1026-9428-2021-61-6-408-414.
3. Recycling phosphorus from waste in China: Recycling methods and their environmental and resource consequences / X. Liu et al // Resources, Conservation and Recycling. – 2023. – P. 188. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106669.

4. Phosphorus recovery from municipal wastewater: an ntegrated comparative technological, environmental and economic assessment of P recovery technologies / L. Egle et al // Science of The Total Environment. – 2016. – P. 522-542. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.019.
5. Radiological Assessment in the Premises of the Phosphate Fertilizer Plant of the Industrial Complex «Trepça» / H. Fadil et al // Pol. J. Environ. Stud. – 2025. – Vol. 34, № 2. – P. 1555-1564. https://doi.org/10.15244/pjoes/188033.
6. Investigation of Possible Negative Consequences of Environmental Pollution by Phosphorite Production Wastes / D. Aliaskarov et al // ES Energy & Environment. – 2025. – № 27. – P.1-14. https://dx.doi.org/10.30919/ee1402.
7. Aly Shimaa E. Occupational hazards and quality of life among fertilizer factory workers in Assiut City / E. Aly Shimaa, M. Mohammed Fayza // Egyptian Nursing Journal. – 2018. – № 15(1). – P. 1-8. https://dx.doi.org/10.4103/ENJ.ENJ_31_17.
8. Ментальное здоровье работников химического производства: факторы риска его нарушения / С.В. Кузьмина и др. // Социальная гигиена и организация здравоохранения. Казанский медицинский журнал. – 2020. – том 101, № 4. – С. 550-560.
9. Корпоративная социальная ответственность предприятий химической промышленности / О.Б. Зильберштейн и др. – М.: Креативная экономика; 2020. – 326 с. https://doi.org/10.18334/9785912923012.
10. Методические рекомендации «Гигиенические критерии оценки и классификация условий труда по показателям вредности и опасности факторов производственной среды, тяжести и напряженности трудового процесса». Приказ Председателя Комитета санитарно-эпидемиологического контроля Министерства здравоохранения Республики Казахстан от 31 декабря 2020 года № 24. https://zan.kz/en/Document/DetailById?documentId=671d24ba-97cd-46be-9b09-69251a77c35e.
11. «Об утверждении Гигиенических нормативов к атмосферному воздуху в городских и сельских населенных пунктах, на территориях промышленных организаций». Приказ Министра здравоохранения Республики Казахстан от 02 августа 2022 года № ҚР ДСМ-70.
12. Wahyu Retnadi. Chemical Exposure and Liver Health Among Workers in the Chemical Industry / Mariana, et al // Journal of Environmental and Occupational Health Safety. – 2025. – vol. 01, № 01.

References

1. Mikhailuts A.P. Vliyanie na sostoyanie zdorov'ya rabotnikov khimicheskikh proizvodstv professional'nykh i ehkologicheskikh nagruzok vrednymi veshchestvami/ A.P. Mikhailuts, A.N. Pershin, S.A. Maksimov // Byulleten' VSNTS SO RAMN. – 2005. – № 8(46). – S. 141-144. (In Russian).
2. Bezrukova G.A. Sovremennoe sostoyanie uslovii truda i zdorov'ya rabotnikov predpriyatiya khimicheskogo orgsinteza / G.A. Bezrukova, T.A. Novikova // Med. truda i prom. ehkol. – 2021. – № 61(6). – S. 408-414. https://doi.org/10.31089/1026-9428-2021-61-6-408-414. (In Russian).
3. Recycling phosphorus from waste in China: Recycling methods and their environmental and resource consequences / X. Liu et al // Resources, Conservation and Recycling. – 2023. – R. 188. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106669. (In English).
4. Phosphorus recovery from municipal wastewater: an ntegrated comparative technological, environmental and economic assessment of P recovery technologies / L. Egle et al // Science of The Total Environment. – 2016. – R. 522-542. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.019. (In English).
5. Radiological Assessment in the Premises of the Phosphate Fertilizer Plant of the Industrial Complex «Trepça» / N. Fadil et al // Pol. J. Environ. Stud. – 2025. – Vol. 34, № 2. – R. 1555-1564. https://doi.org/10.15244/pjoes/188033. (In English).
6. Investigation of Possible Negative Consequences of Environmental Pollution by Phosphorite Production Wastes / D. Aliaskarov et al // ES Energy & Environment. – 2025. – № 27. – R.1-14. https://dx.doi.org/10.30919/ee1402. (In English).
7. Aly Shimaa E. Occupational hazards and quality of life among fertilizer factory workers in Assiut City / E. Aly Shimaa, M. Mohammed Fayza // Egyptian Nursing Journal. – 2018. – № 15(1). – R. 1-8. https://dx.doi.org/10.4103/ENJ.ENJ_31_17. (In English).

8. Mental'noe zdorov'e rabotnikov khimicheskogo proizvodstva: faktory riska ego narusheniya / S.V. Kuz'mina i dr. // Sotsial'naya gigiena i organizatsiya zdravookhraneniya. Kazanskii meditsinskii zhurnal. – 2020. – tom 101, № 4. – S. 550-560. (In Russian).
9. Korporativnaya sotsial'naya otvetstvennost' predpriyatii khimicheskoi promyshlennosti / O.B. Zil'bershtein i dr. – M.: Kreativnaya ehkonomika; 2020. – 326 s. https://doi.org/10.18334/9785912923012. (In Russian).
10. Metodicheskie rekomendatsii «Gigienicheskie kriterii otsenki i klassifikatsiya uslovii truda po pokazatelyam vrednosti i opasnosti faktorov proizvodstvennoi sredy, tyazhesti i napryazhennosti trudovogo protsessA». Prikaz Predsedatelya Komiteta sanitarno-ehpidemiologicheskogo kontrolya Ministerstva zdravookhraneniya Respubliki Kazakhstan ot 31 dekabrya 2020 goda № 24. https://zan.kz/en/Document/DetailById?documentId=671d24ba-97cd-46be-9b09-69251a77c35e. (In Russian).
11. «Ob utverzhdenii Gigienicheskikh normativov k atmosfernomu vozdukhu v gorodskikh i sel'skikh naselennykh punktakh, na territoriyakh promyshlennykh organizatsiI». Prikaz Ministra zdravookhraneniya Respubliki Kazakhstan ot 02 avgusta 2022 goda № ҚR DSM-70. (In Russian).
12. Wahyu Retnadi. Chemical Exposure and Liver Health Among Workers in the Chemical Industry / Mariana, et al // Journal of Environmental and Occupational Health Safety. – 2025. – vol. 01, № 01. (In English).

Қаржыландыру. *Мақалада «Қазақстан Республикасы Еңбек және халықты әлеуметтік қорғау министрлігінің Еңбекті қорғау жөніндегі республикалық ғылыми-зерттеу институты» ШЖҚ РМК-ның ғылыми-зерттеу жұмыстарын бағдарламалық - нысаналы қаржыландыру шеңберінде «Еңбек жағдайлары және кәсіптік тәуекелдер: «жасыл экономикаға» көшу шеңберінде топтастырудың жіктелуі, санаттары мен өлшемшарттары» (ЖТН BR 22182667) тақырыбы бойынша ғылыми-техникалық бағдарламаны іске асыру барысында алынған ғылыми зерттеулердің нәтижелері ұсынылған.*

А.М. Рахметова, Г.К. Алшынбекова*, Э.А. Кульмагамбетова, Н.Т. Сагиндикова , А.Т. Шилменова
РГП на ПХВ «Республиканский научно-исследовательский институт по охране труда»
Министерства труда и социальной защите населения Республики Казахстан
Z00K8X5, Республика Казахстан, г. Астана, ул. Кравцова, 18
*e-mail: alshynbekovagulnaziya@gmail.com

ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СРЕДЫ НА СОСТОЯНИЕ ЗДОРОВЬЯ РАБОТНИКОВ ОБРАБАТЫВАЮЩЕЙ ОТРАСЛИ

В статье представлен анализ технологической и химической среды предприятия обрабатывающей отрасли химического профиля и ее влияния на состояние здоровья работников. Целью исследования являлась гигиеническая оценка условий труда на основных этапах технологического цикла с учетом особенностей технологической среды и выявление связи между воздействием вредных химических факторов и заболеваемостью персонала. Установлено, что технологические процессы сопровождаются интенсивным пылеобразованием и выделением токсических химических веществ, в концентрации которых в ряде случаев превышали предельно допустимые уровни. В структуре вредных факторов преобладали неорганическая пыль, включая кварцсодержащие компоненты, пыль минеральных удобрений, слабофиброгенные аэрозоли, а также пары и газы неорганических соединений. Корреляционный анализ выявил статистически значимую связь между воздействием указанных факторов и развитием заболеваний органов дыхания, пневмокониоза и патологий желудочно-кишечного тракта. Полученные результаты подтверждают неблагоприятное влияние технологической среды предприятия на здоровье работников и обосновывает необходимость разработки и внедрения комплексных профилактических мероприятий, направленных на улучшение условий труда, повышение безопасности персонала и внедрение «зеленых» технологий, что способствует переходу к экологически чистым процессам и повышению качества жизни работников.

Ключевые слова: *перерабатывающее предприятие, технологический процесс, условия труда, химический фактор, неорганическая пыль, фосфин, слабые фиброгенные аэрозоли, здоровье работников.*

A.M. Rakhmetova, G.K. Alshynbekova*, E.A. Kulmagambetova, N.T. Sagindikova, A.T. Shilmenova
RSE at the National Research Institute for Occupational Safety of the Ministry of Labor and Social Protection of the Population of the Republic of Kazakhstan
Z00K8X5, Republic of Kazakhstan, Astana, Kravtsova st., 18
*e-mail: alshynbekovagulnaziya@gmail.com

THE INFLUENCE OF CHEMICAL FACTORS OF THE PRODUCTION ENVIRONMENT ON THE HEALTH OF WORKERS IN THE MANUFACTURING INDUSTRY

The article presents an analysis of the technological and chemical environment of the chemical processing industry and its impact on the health of workers. The purpose of the study was a hygienic assessment of working conditions at the main stages of the technological cycle, taking into account the characteristics of the technological environment and identifying the relationship between exposure to harmful chemical factors and staff morbidity. It has been established that technological processes are accompanied by intense dust formation and the release of toxic chemicals, the concentrations of which in some cases exceeded the maximum permissible levels. The structure of harmful factors was dominated by inorganic dust, including quartz-containing components, mineral fertilizer dust, slightly fibrogenic aerosols, as well as vapors and gases of inorganic compounds. Correlation analysis revealed a statistically significant relationship between the effects of these factors and the development of respiratory diseases, pneumoconiosis, and gastrointestinal pathologies. The results obtained confirm the adverse impact of the technological environment of the enterprise on the health of employees and substantiate the need to develop and implement comprehensive preventive measures aimed at improving working conditions, improving staff safety and introducing «green» technologies, which contributes to the transition to environmentally friendly processes and improving the quality of life of employees.

Key words: *processing plant, technological process, working conditions, chemical factor, inorganic dust, phosphine, weak fibrogenic aerosols, workers' health.*

Авторлар туралы мәліметтер

Анар Муратовна Рахметова – медицина ғылымдарының кандидаты, доцент, ғылыми зерттеулер орталығының бөлім басшысының орынбасары Қазақстан Республикасы Еңбек және халықты әлеуметтік қорғау министрлігінің Еңбекті қорғау жөніндегі республикалық ғылыми-зерттеу институты, Астана қ.; e-mail: ra_anar@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0008-4887.

Гульназия Канагатовна Алшынбекова* – биология ғылымдарының кандидаты, ғылыми зерттеулер орталығының жетекші ғылыми қызметкері Қазақстан Республикасы Еңбек және халықты әлеуметтік қорғау министрлігінің Еңбекті қорғау жөніндегі республикалық ғылыми-зерттеу институты, Астана қ.; e-mail: alshynbekovagulnaziya@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5143-2338.

Эльмира Амангельдиевна Кульмагамбетова – химия ғылымдарының кандидаты, ғылыми зерттеулер орталығының жетекші ғылыми қызметкері, Қазақстан Республикасы Еңбек және халықты әлеуметтік қорғау министрлігінің Еңбекті қорғау жөніндегі республикалық ғылыми-зерттеу институты, Астана қ.; e-mail: elya_kulmagambet@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7799-3974.

Нургул Тулегеновна Сагиндикова – техника және технология ғылымдарының магистрі, ғылыми зерттеулер орталығының аға ғылыми қызметкері, Қазақстан Республикасы Еңбек және халықты әлеуметтік қорғау министрлігінің Еңбекті қорғау жөніндегі республикалық ғылыми-зерттеу институты, Астана қ.; e-mail: nursag79@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-6420-2783.

Айгуль Турдалиевна Шилменова – экономика ғылымдарының магистрі, ғылыми зерттеулер орталығының жетекші ғылыми қызметкері, Қазақстан Республикасы Еңбек және халықты әлеуметтік қорғау министрлігінің Еңбекті қорғау жөніндегі республикалық ғылыми-зерттеу институты, Астана қ., Казахстан; e-mail: aigul.shilmenova@gmail.com. https://orcid.org/0000-0001-6540-6261.

Сведения об авторах

Анар Муратовна Рахметова – кандидат медицинских наук, доцент, заместитель руководителя отдела центра научных исследований, Республиканский научно-исследовательский институт по охране труда Министерства труда и социальной защите населения Республики Казахстан, г. Астана; e-mail: ra_anar@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0008-4887.

Гульназия Канагатовна Алшынбекова*, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник центра научных исследований, Республиканский научно-исследовательский институт по охране труда Министерства труда и социальной защите населения Республики Казахстан, г. Астана; e-mail: alshynbekovagulnaziya@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5143-2338.

Эльмира Амангельдиевна Кульмагамбетова – кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник центра научных исследований, Республиканский научно-исследовательский институт по охране труда Министерства труда и социальной защите населения Республики Казахстан, г. Астана; e-mail: elya_kulmagambet@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7799-3974.

Нургул Тулегеновна Сагиндикова – магистр техники и технологии, старший научный сотрудник центра научных исследований, Республиканский научно-исследовательский институт по охране труда Министерства труда и социальной защите населения Республики Казахстан, г. Астана; e-mail: nursag79@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-6420-2783.

Айгуль Турдалиевна Шилменова – магистр экономических наук, старший научный сотрудник центра научных исследований, Республиканский научно-исследовательский институт по охране труда Министерства труда и социальной защите населения Республики Казахстан, г. Астана, Казахстан; e-mail: aigul.shilmenova@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6540-6261.

Information about the authors

Anar Muratovna Rakhmetova – Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Deputy Head of the Department of the Center for Scientific Research, Republican Scientific Research Institute for Labor Protection of the Ministry of Labor and Social Protection of the Population of the Republic of Kazakhstan, st., Astana; e-mail: ra_anar@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0008-4887.

Gulnaziya Kanagatovna Alshynbekova* – Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher at the Center for Scientific Research, Republican Scientific Research Institute for Labor Protection of the Ministry of Labor and Social Protection of the Population of the Republic of Kazakhstan, st., Astana; e-mail: alshynbekovagulnaziya@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5143-2338.

Elmira Amangeldievna Kulmagambetova – Candidate of Chemical Sciences, Leading Researcher at the Center for Scientific Research, Republican Scientific Research Institute for Labor Protection of the Ministry of Labor and Social Protection of the Population of the Republic of Kazakhstan, st., Astana; e-mail: elya_kulmagambet@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7799-3974.

Nurgul Tulegenovna Sagindikova – Master of Engineering and Technology, Senior Researcher at the Center for Scientific Research, Republican Scientific Research Institute for Labor Protection of the Ministry of Labor and Social Protection of the Population of the Republic of Kazakhstan, st., Astana; e-mail: nursag79@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-6420-2783.

Aigul Turdalievna Shilmenova – Master of Economics, Senior Researcher at the Center for Scientific Research, Republican Scientific Research Institute for Labor Protection of the Ministry of Labor and Social Protection of the Population of the Republic of Kazakhstan, st., Astana; e-mail: aigul.shilmenova@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6540-6261.

Редакцияға енуі 23.01.2026
Өңдеуден кейін түсуі 11.02.2026
Жариялауға қабылданды 12.02.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-70

IRSTI: 61.65.09

CC BY 4.0
Check for updates

D.Yu. Ostrovnaya, A.N. Dyuryagina, Yu.S. Byzova*
M. Kozybayev North Kazakhstan University,
150000, Kazakhstan, Petropavlovsk, Pushkin street, 86
*e-mail: yuliyabyzovva@gmail.com

MODERN APPROACHES TO THE USE OF MODIFIERS IN WATER-ACRYLIC FILM-FORMING SYSTEMS

Abctract: *Acrylic water-dispersion coatings occupy a significant place in the market due to their environmental friendliness, technological flexibility and versatility of application. However, in order to ensure stable performance characteristics such as adhesion, strength, elasticity and resistance to external influences, targeted modification of formulation compositions is necessary. The use of modifiers makes it possible to adapt the properties of compositions to the specific conditions of application and operation, as well as to ensure high-quality paintwork. This article provides an overview of existing approaches to the use of modifiers in water-acrylic film-forming compositions and their effect on the properties of finished coatings. The purpose of the article is to systematize data on the use of modifying additives in acrylic aqueous dispersions, analyze their functional purpose, and evaluate the impact on the technological and operational characteristics of coatings. Conclusion. The review identifies current trends in the development and application of modifiers in acrylic water-dispersion systems, emphasizing the need for further research to optimize formulations, improve component compatibility, and develop new highly effective additives.*

©D.Yu. Ostrovnaya, A.N. Dyuryagina, Yu.S. Byzova, 2026

Key words: *acrylic film-forming agents, modifiers, paint and varnish materials, dispersants, water-dispersion compositions.*

Introduction

Modern water-based paints and varnishes, in particular acrylic water-dispersion coatings, occupy a significant market share due to their environmental friendliness, technological flexibility and a wide range of applications, reducing fire and explosion hazards and physiological risks for consumers [1, 2]. However, along with the advantages such as safety, ease of handling and low toxicity, Water-dispersion coatings have a number of disadvantages. In particular, compared with organo-dilutable analogues, they are inferior in water resistance, adhesion and corrosion resistance [3]. In addition, there is an increasing need to develop universal formulations that would ensure not only environmental friendliness, but also stability of characteristics under different climatic conditions and on different types of substrates. At the same time, the obtained coatings should remain competitive in comparison with alternative options in terms of cost and availability [4, 5]. The introduction of modifying additives makes it possible to purposefully improve the decorative and operational properties of paint and varnish materials [6].

General information about water-acrylic systems

According to world experience [7], aqueous dispersions of acrylic copolymers, acrylic styrene copolymers, homo- and vinyl acetate copolymers predominate in Water-dispersion paint formulations. Water-based acrylic latexes are two-phase systems in which polymer particles are dispersed in a continuous aqueous phase. The widespread use of acrylic latexes is explained by their cost-effectiveness and universal properties, which can be achieved by selecting the composition of the monomer [8]. Acrylic coatings are practically transparent to ultraviolet rays, therefore, the processes of destruction of the film-forming agent in them occur much more slowly, as a result of which they are not prone to yellowing and retain their luster under prolonged atmospheric exposure [9].

Film formation in water-acrylic systems is carried out due to the coalescence of polymer particles occurring during evaporation of the dispersion medium – water (Fig. 1). As water is removed, latex particles approach, compact and begin to deform, which leads to their fusion and the formation of a continuous polymer film [10, 11]. For this process to be effective, it is necessary to exceed the minimum film formation temperature (MFFT), a temperature threshold below which coalescence of latex particles either does not occur at all or leads to a defective coating with a porous or loose structure [12].

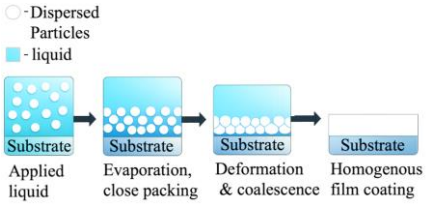


Figure 1 – The process of forming a film of paint and varnish material

MFFT depends on many factors: the chemical nature and T_g (glass transition temperature) of the polymer, the molecular weight, the content of functional and polar groups, the presence and concentration of coalescent additives, as well as the drying conditions – temperature, humidity, ventilation [13, 14]. Unlike organo-dilutable systems, in which film formation occurs due to evaporation of volatile solvents with simultaneous diffusion of polymer chains, in aqueous systems this process has an additional stage of coalescence, sensitive to temperature and mechanical influences [15].

To reduce MFFT and ensure film formation at room temperature, coalescing agents are introduced into the formulations of aqueous coatings – organic compounds capable of temporarily plasticizing the polymer phase, facilitating particle fusion [16]. However, the use of such additives is limited by their volatility, environmental safety, and impact on the final coating properties. In modern research, alternative approaches are actively being considered, including the development of self-film-forming latexes and modification of the surface of polymer particles [17]. Figure 2 shows the origin of the monomers used for the synthesis of acrylic and copolymer latexes used in water-dispersion paints and varnishes [18].

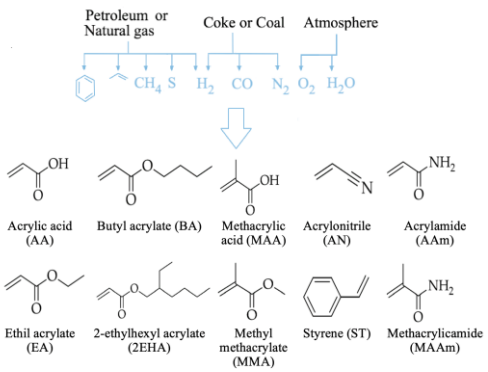


Figure 2 – Chemical structure of acrylic acid

A typical binder is a copolymer of acrylic acids and their derivatives, which forms a stable dispersion in water. The monomers shown in Figure 2 have varying degrees of hydrophobicity, reactivity, and functionality, which makes it possible to obtain polymers with specified properties for specific applications. The use of copolymerization of these monomers makes it possible to control characteristics such as elasticity, adhesion, chemical resistance, water resistance, and glass transition temperature of latexes. The quality of film formation largely depends on the composition of the film-forming agent, the presence of coalescent additives, as well as modifiers. The main properties of coatings, such as elasticity, strength, resistance to UV radiation and water, are determined by the nature and structure of the polymer, the degree of crosslinking, and the interaction of components in the composition [19-21].

Types of modifiers and their mechanisms of action

The choice of modifier governs the service durability of waterborne acrylic coatings because it affects the density of the polymer network, moisture uptake, and resistance to photodegradation. The most pronounced improvement in performance under humid conditions and during wet-dry cycling is typically achieved by crosslinking and post-crosslinking modifiers, such as polyaziridines and carbodiimides, which reduce swelling, increase cohesive film strength, and maintain wet adhesion upon water exposure [22]. Under temperature fluctuations, coalescents and plasticizing agents (e.g., 2,2,4-trimethyl-1,3-pentanediol monoisobutyrate, Texanol) enhance flexibility and crack resistance; however, excessive dosages may impair barrier performance by increasing matrix mobility and water permeability. Long-term atmospheric durability under ultraviolet irradiation critically depends on light stabilizers, including benzotriazole- or benzophenone-type UV absorbers and hindered amine light stabilizers (HALS), which suppress radical photo-oxidation and retard binder degradation; in this context, the appropriate selection of modifiers and accelerated weathering protocols is particularly important for waterborne acrylic systems that are sensitive to moisture and aging conditions [23]. According to the literature on waterborne acrylic binders [24], sustained enhancement of mechanical and protective properties is most effectively achieved by combining post-crosslinking with barrier-reinforcing fillers; platelet-type and nanostructured additives, including cellulose nanocrystals, are especially effective because they create a more tortuous diffusion pathway for water and ions and thereby improve barrier and anticorrosion performance.

Consequently, increased durability of waterborne acrylic coatings is attained not through a single additive but through integrated formulation design, in which multiple functional components jointly determine the required processing and in-service film properties. A typical formulation of water-dispersion paints and varnishes contains from three to five, and in some cases more functional additives, the proportion of which is about 1-3% of the total mass of the composition, reaching in some cases 10% or more. Despite their relatively small mass, these additives can form up to 25% of the cost of raw materials and semi-finished products, which emphasizes their importance both from a technological and economic point of view [25]. According to the generally accepted classification, modifying additives are divided into four main categories, covering more than a dozen functional subgroups (Table 1) [26].

As follows from the analysis of modern literature sources, the formation of coatings with high adhesive strength requires both the choice of the appropriate type of film-forming agent and the use of functional modifiers capable of enhancing interfacial interactions. Effective components in this context are polyester, vinyl ether, bisphenol, and epoxy resins, as well as copolymers with a high content of polar fragments [27].

Table 1 – Functions of additives in water-dispersion coatings

Group	Function of additives
A	Regulation of the conditions of production, packaging and storage of paint and varnish compositions
B	Influence on the process of applying paintwork
C	Control of the film formation process
D	Formation and stabilization of the properties of the finished coating

It has been established that a purposeful increase in the proportion of polar functional groups in the polymer structure, such as hydroxyl (–OH), carboxyl (–COOH), amide ($–CONH_2$) and urethane (–CONH), improves the interfacial interaction with the substrate and, as a result, increases adhesion [28]. The adhesive characteristics are influenced not only by the nature of the additives, but also by their concentration, as well as the combined effect of solvents, pigments, fillers and other functional components of the composition, which requires an integrated approach to prescription optimization [29, 30].

Bioadditives are among the promising modifiers used in water-dispersion acrylic film-forming systems [31, 32]. Biopolymers of natural origin, such as chitosan, lignin, alginates and cellulose derivatives (for example, carboxymethylcellulose), are increasingly used due to their versatility and environmental safety. These compounds can be introduced into the structure of the polymer composition in two fundamentally different ways. During physical implementation, they are distributed in the binder volume as a dispersed phase (for example, in the form of particles, droplets or molecular aggregates), without entering into covalent interaction with the polymer matrix. This approach makes it possible to modify the physico-chemical characteristics of the coating due to phase interaction, sorption, or interfacial orientation. In the case of chemical incorporation, modifiers are incorporated into the polymer structure at the synthesis stage through copolymerization, grafting, or crosslinking reactions, which provides a more stable and controlled effect on the level of intermolecular organization and performance properties of coatings such as adhesion, elasticity, and barrier (against the penetration of water, gases, and ions) [33, 34]. In addition, some biopolymers can act as natural coalescers or stabilizers, reducing the need for volatile organic additives [35, 36].

Inorganic modifiers such as titanium dioxide (TiO_2), silicon dioxide (SiO_2), zinc oxide (ZnO), alumina and hexagonal boron nitride are actively used to improve the performance of acrylic coatings. Their introduction into the polymer matrix contributes to the formation of hybrid systems with increased resistance to ultraviolet radiation, abrasive wear, corrosion and microbiological degradation. [37, 38]. At the same time, nanoparticles can simultaneously act as rheological regulators and reinforcing agents, contributing to an increase in the strength, elasticity and adhesion of the coating. Some of them, like TiO_2 and ZnO, also exhibit photocatalytic activity, providing the film's self-cleaning properties when exposed to sunlight.

The necessary additives in the formulations of water-dispersion paints and varnishes are surfactants [39]. They provide a reduction in free energy at the interface of phases and, as a result, lead to stabilization of the system. All water-based coatings require surfactants to create a thermodynamically stable dispersion due to fine regulation of interfacial interactions. They perform a number of critically important functions: they act as emulsifiers in the synthesis of polymer binders, dispersants of pigment particles, improve the wettability of low-energy substrates, prevent defects associated with surface tension gradients, and regulate foaming processes during application [40, 41].

A special class consists of surface-active polymers, such as associative thickeners (HEUR, HASE, etc.), which are used to fine-tune the rheological characteristics of systems, including thixotropy and resistance to runoff [42]. Along with this, anionic polyelectrolytes (for example, polyphosphates and polyacrylates) are widely used in aqueous dispersions as effective dispersing agents that stabilize the pigment-binding boundary [43].

The complexity of water-dispersion paints formulations is due to the competition between various low- and high-molecular weight components for adsorption on surfaces such as binder particles, pigment, and substrate. Typical systems are dominated by anionic and nonionic amphiphilic surfactants, including sulfates of fatty alcohols, alkylaryl sulfonates and ethoxylates of alcohols, due to their versatility and compatibility with acrylic polymers. Cationic and amphoteric surfactants are used much less frequently due to limited compatibility and the risk of coagulation of latex particles [44].

Some specialized surfactants have found application in narrow areas.: Fluorinated compounds (for example, perfluoroalkyl sulfonates) and silicone surfactants can significantly reduce surface tension, up to 20-25 mN/m, eliminating defects associated with uneven drying and coating distribution [45]. Of particular interest are acetylene glycols, surface-active compounds that do not have a pronounced tendency to micelle formation, but are capable of forming ordered monomolecular layers at the phase boundary, characterized by high stability and significant surface pressure. Due to the presence of short and bulky hydrocarbon substituents near the polar group, these compounds exhibit pronounced adsorption properties and effectively stabilize films without collapsing under mechanical or thermal stress. These surfactants are widely used as anti-foaming additives, especially in formulations sensitive to microbubbles and film defects during curing [46].

Adaptive functional additives capable of modifying coating properties in response to changes in external conditions are of particular interest [47, 48]. Such components ensure the stimuli-sensitive behavior of the material. They respond to changes in temperature, humidity, and pH, and may also be sensitive to light or an electric field. The introduction of such additives makes it possible to create coatings with adjustable properties, and in some cases, with the ability to independently restore the structure after damage, such as microcracks or scratches. This is especially important for use in conditions of variable temperatures, high humidity or mechanical stress, where the integrity of the coating may be compromised. Thus, the introduction of thermosensitive copolymers can allow the film to change its permeability at certain temperatures, and pH-sensitive groups can provide controlled adhesion or swelling depending on the acidity of the medium [49].

Methods of introducing modifiers

The methods of introducing modifiers into water-dispersion film-forming compositions significantly affect the distribution of functional components in the polymer matrix, the efficiency of interaction and the stability of the system. In general, two approaches are distinguished: in situ modification, in which additives are introduced at the stage of dispersion synthesis, and post-synthetic modification, when modifiers are added to an already formed system [50].

The in situ method is implemented by co-polymerization of the main monomer and the functional additive in the same reaction medium. This approach ensures a homogeneous distribution of the modifier, increased coating stability, and stronger interfacial bonds between the components. In addition, under certain conditions, the modifier can be covalently integrated into a macromolecular chain, forming a copolymer structure [51].

In the post-synthetic approach, modifiers are introduced after the synthesis of the main binder. This method is convenient from a technological point of view, as it allows you to quickly adjust the properties of the finished composition (viscosity, thixotropy, wettability, UV resistance) without changing the polymer structure. However, if there is insufficient compatibility or high viscosity, additive aggregation or phase separation may occur [52].

Alternative methods for obtaining dispersions include the phase inversion method, in which a pre-synthesized polymer is dissolved in an organic solvent and then converted to an aqueous phase to form latex [53-56].

Mini-emulsion polymerization provides a narrower particle distribution and increased inclusion of hydrophobic additives. In Pickering dispersion, latex particles are stabilized not by traditional surfactants, but by inorganic solid particles (silicon dioxide or titanium oxide), which is especially important for creating coatings with increased thermal and mechanical resistance [57-60].

Comparative characteristics of various types of modifiers in terms of adhesive activity, environmental safety, economic accessibility and functional orientation are presented in Table 2.

The choice of modification method is determined by the purpose of the coating, the compatibility of the components, the required stability of the system, as well as the scale of production. In conditions of large-scale synthesis, the in situ approach is often preferred due to its integration into the technological chain. In laboratory and applied conditions, on the contrary, post-synthetic modification gives more flexibility in the selection of formulations.

Conclusion

Modern approaches to the modification of water-dispersion coatings make it possible to create a new generation of coatings with improved properties. The development of surface engineering, modeling, and biomodification technologies opens up broad prospects for sustainable development in the paint and varnish industry. At the same time, further fundamental study of the mechanisms of interaction of the components is required, as well as a systematic approach to standardization, toxicological and environmental assessment of new formulations.

Table 2 – Comparative analysis of the types of water-dispersion paint modifiers

Modifier Type	Adhesion	Environmental Friendliness	Cost	Effects
Surfactants (anionic, nonionic)	Significant, especially for metals	Average – depends on the nature of the surfactant	Low / Average	Stabilization, foam resistance, application comfort
Biopolymers (chitosan, lignin)	Moderate, depends on the substrate	Very high	Average / High	Antimicrobial, biodegradable
Nanoparticles (TiO_2, SiO_2, ZnO, MgO)	Indirect improvement through morphology	Average /High	Average / High	UV protection, mechanical strength
Functional polymers, composites	Targeted increase in adhesion	Average	Average	Adjustable rheology, heat resistance
Complex additives («smart»)	The synergistic effect	From medium to high	Average	Multifunctional, adaptive behavior

References

1. Weiss K.D. Paint and coatings: A mature industry in transition / K.D. Weiss //Progress in Polymer Science. – 1997. – № 22. – P. 203-245. https://doi.org/10.1016/S0079-6700(96)00019-1.
2. Emulsifiers with high chemical resistance: a key to high performance waterborne coatings / V. Duecoffre et al // Progress in Organic Coatings. – 1998. – № 34. – P. 200-205. https://doi.org/10.1016/S0300-9440(98)00015-4.
3. Wegmann A. Chemical resistance of waterborne epoxy/amine coatings / A. Wegmann // Progress in Organic Coatings. – 1997. – № 32. – P. 231-239. https://doi.org/10.1016/S0300-9440(97)00011-1.
4. Volatile Chemical Products Emerging as Largest Petrochemical Source of Urban Organic Emissions / B.C. McDonald et al // Science. – 2018. – № 359. – P. 760-764. https://doi.org/10.1126/science.aaq0524.
5. Update on Volatile Organic Compound (VOC) Source Profiles and Ozone Formation Potential in Synthetic Resins Industry in China / Y. Ma et al // Environmental Pollution. – 2021. – № 291. – 118253. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118253.
6. Mukhamedgaliev B.A. Tekhnologiya sinteza polimernykh modifikatorov dlya lakokrasochnykh materialov / B.A. Mukhamedgaliev // Khimicheskaya promyshlennost'. – 2005. – № 3. – P. 41-43.
7. A multi–functional coating based on acrylic copolymer modified with PDMS through copolymerization / J. Sha et al // Progress in Organic Coatings. – 2021. – № 156. – 106254. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2021.106254.
8. Advances in Waterborne Acrylic Resins: Synthesis Principle, Modification Strategies, and Their Applications / C. Jiao et al // ACS Omega. – 2021. – № 6. – P. 2443-2449. https://doi.org/10.1021/acsomega.0c05277.
9. Recent Advances in Combining Waterborne Acrylic Dispersions with Biopolymers / J. Solera-Sendra et al // Polymers. – 2025. – № 17. – P. 1027. https://doi.org/10.3390/polym17081027.
10. Winnik M.A. Film Formation from Latex / M.A. Winnik // Advances in Colloid and Interface Science. – 1997. https://doi.org/10.1016/S0001-8686(96)00307-5.
11. Zarras P. Handbook of Waterborne Coatings / P. Zarras, M.D. Soucek, A. Tiwari // Elsevier Science. – 2020. – 356 p.
12. Tracton A.A. Coatings Technology Handbook / A.A. Tracton // CRC Press. – 2006, 936 p.
13. Minimum Film Formation Temperature: Measurement and Significance / B. Meurer et al // Progress in Organic Coatings, 2001. https://doi.org/10.1016/S0300-9440(00)00139-7.
14. Routh A.F. Drying of thin colloidal films / A.F. Routh // Reports on Progress in Physics. – 2013. – № 76. – P. 046603. https://doi.org/10.1088/0034-4885/76/4/046603.
15. Koleske J.V. Paint and Coating Testing Manual (15th Ed.) / J.V. Koleske // ASTM International. – 2012, 880 p.
16. Influence of coalescing agents on waterborne acrylic films / T. Azais et al // Journal of Coatings Technology and Research. – 2015. – № 12(2). – P. 265-273. https://doi.org/10.1007/s11998-014-9637-2.

17. Self-film-forming waterborne polymers: recent developments / Y. Xiang et al // Progress in Organic Coatings. – 2022. – № 163. – P. 106654. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2021.106654.
18. Crosslinked Polymer Coatings of Poly (Acrylic Acid-co-acrylamide)/Polyethyleneimine (P(AA-co-AAm)/PEI) on Titanium Alloy with Excellent Lubrication Performance for Artificial Joints / Y. Deng et al // Coatings. – 2024. – № 14(1). – 28. https://doi.org/10.3390/coatings14010028.
19. Mooney Controlling Mechanical and Swelling Properties of Alginate Hydrogels Independently by Cross-Linker Type and Cross-Linking Density / Kuen Yong Lee et al // Macromolecules. – 2000. – № 33(11). – P. 4291-4294. https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ma9921347?ref=recommended.
20. Smart Polymer Nanoparticles for High-Performance Water-Borne Coatings / S. Piçarra et al // Langmuir. – 2014. – № 30(41). – P. 12345-12353. https://doi.org/10.1021/la502826r.
21. Molecular design and copolymerization to enhance the anti–corrosion performance of waterborne acrylic coatings / J. Sha et al // Progress in Organic Coatings. – 2021. – № 153. – P. 106140. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2021.106140.
22. Feasible estimation of weathering stability for free film acrylic coatings via dynamic mechanical analysis as the sole characterization method / F. Steinberger et al // Journal of Coatings Technology and Research. – 2025. – Vol. 22. – P. 839-848. https://doi.org/10.1007/s11998-024-01013-3.
23. Artificial Weathering Test Methods of Waterborne Acrylic Coatings for Steel Structure Corrosion Protection / Ł. Ładosz et al // Materials (Basel). – 2024. – № 17(8). – P. 1857. https://doi.org/10.3390/ma17081857.
24. Advances in Waterborne Acrylic Resins: Synthesis Principle, Modification Strategies, and Their Applications / C. Jiao et al // ACS Omega. – 2021. https://doi.org/10.1021/acsomega.0c05593.
25. Enhancement of the properties of acrylic wood coatings by modifying them with biopolymers / P. Hochmańska-Kaniewska et al // Progress in Organic Coatings. – 2022.
26. Corrosion protective properties of cellulose nanocrystals reinforced waterborne acrylate-based coating / Y. He et al // Corrosion Science. – 2019.
27. Mazurin O.V. Khimiya i tekhnologiya lakokrasochnykh materialov / O.V. Mazurin, A.I. Ivanov. – Khimiya, Moscow, 2009, 368 p. (In Russian).
28. Kuznetsov I.F. Dobavki i napolniteli v lakokrasochnykh materialakh / I.F. Kuznetsov. – Profi, Saint Petersburg, 2013. – 312 p. (In Russian).
29. Tracton A.A. Coatings Technology Handbook / A.A. Tracton. – 3rd ed. CRC Press, 2005. – 936 p.
30. Wicks Z.W. Organic Coatings: Science and Technology / Z.W. Wicks, F.N. Jones, S.P. Pappas. – 3rd ed. Wiley-Interscience, 2007. – 500 p.
31. Meuler A.J. Block polymers: Past, present, and future / A.J. Meuler, M.A. Hillmyer, F.S. Bates // Macromolecules. – 2009. – № 42(19). – P. 7221-7250. https://doi.org/10.1021/ma901138u.
32. Alegre R. Incorporation of biopolymers into waterborne acrylic latexes: synthetic strategies and material properties / R. Alegre, C. Prieto, T. Vicent // Polymers. – 2023. – № 17(8). – P. 1027. https://doi.org/10.3390/polym17081027.
33. Application of chitosan–lignosulfonate composite coating film in food packaging: Improved water, oil and stain resistance / N. Zhang et al // Coatings. – 2022. – № 12(4). – P. 494. https://doi.org/10.3390/coatings12040494.
34. Mittal K.L. (Ed.). Polymer Surface Modification: Relevance to Adhesion / K.L. Mittal. – CRC Press, 2009. – 408 p.
35. Yurasov S.Yu. Fiziko-khimicheskie osnovy adgezii i stsepleniya pokrytiy. Politekhnika / S.Yu. Yurasov, A.Yu. Blinov // Saint Petersburg, 2011. – 244 p. (In Russian).
36. A bio-based coalescent for improving latex film quality and paint performance / S. Pereira et al // Paint & Coatings Industry. – 2023. P. 40-43. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2006.01.006.
37. Waterborne acrylic/casein hybrid latexes with high solids content and reduced coalescent requirement / X. Guo et al // Journal of Coatings Science and Technology. – 2015. – № 35(10). – P. 1234-1242. https://doi.org/10.1520/MNL6-2015-1010.
38. Saini S. Recent advances in the use of cellulose and its derivatives for sustainable coatings / S. Saini, M.N. Belgacem // Progress in Organic Coatings. – 2020. – № 142. – 105557. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.105557.
39. Rinaudo M. Chitin and chitosan: Properties and applications / M.Rinaudo // Progress in Polymer Science. – 2006. – № 31. – P. 603-632. https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2006.06.001.

40. Polymer nanocomposites as efficient materials for coatings: A review / C. Vasile et al // Coatings. – 2020. – № 10(3). – P. 223. https://doi.org/10.3390/coatings10030223.
41. Photocatalytic coatings based on TiO_2 for self-cleaning applications / H. Zhang et al // Surface & Coatings Technology. – 2016. – № 291. – P. 64-74. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.02.107.
42. Functional coatings with ZnO nanoparticles: Antibacterial and UV-blocking properties / D. Dutta et al // Journal of Coatings Technology and Research. – 2018. – № 15. – P. 987-997. https://doi.org/10.1007/s11998-018-0073-2.
43. Khaylen V. Dobavki dlya vodorastvorimykh LKM / V. Khaylen, 2011. – 176 p. (In Russian).
44. An overview of polymer latex film formation and properties / D. Scott et al // Progress in Organic Coatings. – 1999. – № 35(2-3). – P. 89-99. https://doi.org/10.1016/S0300-9440(99)00037-8.
45. Glass J.E. Surfactant-Modified, Water-Soluble Polymers / J.E. Glass // Journal of Coatings Technology. – 2001. – № 73(922). – P. 79-89. https://doi.org/10.1007/BF02698218.
46. Miniemulsion polymerization and polymer nanoparticles / F.J. Schork et al //Journal of Controlled Release. – 2005. – № 100(1). – № 1–14. https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2004.08.011.
47. De Bruyn P.L. Polymer heterogeneity in waterborne coatings: relationships between morphology and performance / P.L. De Bruyn, A.E. Smith // Journal of Coatings Technology and Research. – № 2009. – № 6(3). – P. 299-312. https://doi.org/10.1007/s11998-009-9201-5.
48. Croll S.G. Heat and mass transfer in latex paints during drying / S.G. Croll // Journal of Coatings Technology. – 1987. – № 59(751). – P. 81-92. http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=7449955.
49. Borden M.V. Self-warning and self-repairing mechanisms in functional coatings / M.V Borden, S. Goswami, D. Rankowski // Advanced Materials. – 2024. – № 36. – P. 2400466. https://doi.org/10.1002/EXP.20240066.
50. Smith J.R. Nanomaterial-advanced smart coatings: emerging trends shaping the field / J.R. Smith, D.H. Lee // Materials Today Advances. – 2024. – № 15. – 100345. https://doi.org/10.1016/j.mtadv.2024.100345.
51. Surface-active silicone materials in coatings applications / T. Brixner et al // Progress in Organic Coatings. – 2020. – № 142. – P. 105568. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.105568.
52. Pickering Emulsion and Derived Materials / T.N. Ngai, S. Fujii (eds.). – Springer. – 2017. – 152 p. https://doi.org/10.3390/books978-3-03842-353-9.
53. Stimuli-responsive polymer coatings: recent developments, challenges, and future perspectives / Y. Liu et al // Chemical Society Reviews. – 2021. – № 50. – P. 12183-12214. https://doi.org/10.1039/D0CS00786J.
54. Stimuli-responsive polymer coatings for controlled-release and sensor applications / L.M. Geever et al // Progress in Organic Coatings. – 2012. – № 74(1). – P. 91-101. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2011.11.007.
55. Lakshmi S. A review on phase-inversion technique-based polymer microsphere fabrication / S. Lakshmi, R. Castro-Muñoz, A. Figoli // Colloids and Interface Science Communications. – 2020. – № 39. – P. 100329. https://doi.org/10.1016/j.colcom.2020.100329.
56. Kranz W.B. The mechanism of phase inversion membrane formation / W.B. Kranz, A.R. Greenberg // Desalination. – 1977. – № 22. – P. 245-262.
57. Miniemulsion polymerization and polymer nanoparticles / F.J. Schork et al // Journal of Controlled Release. – 2005. – № 100(1). – P. 1*14. https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2004.08.011.
58. Urban D. Polymer Dispersions and Their Industrial Applications / D. Urban, K. Takamura // Wiley-VCH, 2002. – 378 p.
59. Latex film formation: Scientific principles and their application / M.A. Winnik et al // Progress in Organic Coatings. – 2006. – № 55. – P. 161-168. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2006.01.006.
60. Landfester K. Miniemulsion polymerization and the structure of polymer and hybrid nanoparticles / K. Landfester // Angewandte Chemie International Edition. – 2009. – № 48(25). – P. 4488-4507. https://doi.org/10.1002/anie.200805719.
61. Binks B.P. Colloidal Particles at Liquid Interfaces / B.P. Binks, T.S. Horozov // Cambridge University Press, 2006. – 536 p.
62. Keddie J.L. Film formation of latex / J.L. Keddie // Materials Science and Engineering: R: Reports. – 1997. – № 21(3). – P. 101*170. https://doi.org/10.1016/S0927-796X(97)00009-8.

Д.Ю. Островная, А.Н. Дюрягина, Ю.С. Бызова*
Манаш Қозыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университеті,
150000, Қазақстан, Петропавл, Пушкин к-сі, 86
*e-mail: yuliyabyzovva@gmail.com

СУ-АКРИЛ ПЛЕНКАЛАРЫН ҚАЛЫПТАСТЫРУ ЖҮЙЕЛЕРІНДЕ МОДИФИКАТОРЛАРДЫ ҚОЛДАНУДЫҢ ЗАМАНАУИ ТӘСІЛДЕРІ

Акрилді су-дисперсиялық жабындар экологиялық таза, технологиялық икемділігі және қолданудың әмбебаптығы арқасында нарықта айтарлықтай орын алады. Дегенмен, адгезия, беріктік, Серпімділік және сыртқы әсерлерге төзімділік сияқты тұрақты өнімділікті қамтамасыз ету үшін рецепт композицияларын мақсатты түрде өзгерту қажет. Модификаторларды қолдану композициялардың қасиеттерін қолдану мен пайдаланудың нақты жағдайларына бейімдеуге, сондай-ақ бояудың жоғары сапасын қамтамасыз етуге мүмкіндік береді. Осы мақалада су-акрил пленкаларын құрайтын композициялар құрамында модификаторларды қолданудың қолданыстағы тәсілдеріне шолу және олардың дайын жабындардың қасиеттеріне әсері ұсынылады. Мақаланың мақсаты акрилді су дисперсияларында модификациялық қоспаларды қолдану туралы деректерді жүйелеу, олардың функционалдық мақсатын талдау, сондай-ақ жабындардың технологиялық және пайдалану сипаттамаларына әсерін бағалау болып табылады. Қорытынды. Шолу акрил су дисперсиялық жүйелерінде модификаторларды әзірлеу мен қолданудың өзекті бағыттарын анықтайды, бұл рецепттерді оңтайландыру, компоненттердің үйлесімділігін арттыру және жаңа жоғары тиімді қоспаларды әзірлеу бойынша қосымша зерттеулер жүргізу қажеттілігін көрсетеді.

Түйін сөздер: *акрил пленкасы, модификаторлар, бояу материалдары, диспергаторлар, су-дисперсиялық композициялар.*

Д.Ю. Островная, А.Н. Дюрягина, Ю.С. Бызова*
Северо-Казахстанский университет им. М. Козыбаева”
150000, Казахстан, Петропавловск, ул. Пушкина, 86
*e-mail: yuliyabyzovva@gmail.com

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ МОДИФИКАТОРОВ В ВОДНО-АКРИЛОВЫХ ПЛЕНКООБРАЗУЮЩИХ СИСТЕМАХ

Акриловые водно-дисперсионные покрытия, занимают значительное место на рынке благодаря своей экологичности, технологической гибкости и универсальности применения. Однако для обеспечения стабильных эксплуатационных характеристик, таких как адгезия, прочность, эластичность и устойчивость к внешним воздействиям, необходима целенаправленная модификация рецептурных композиций. Использование модификаторов позволяет адаптировать свойства композиций под специфические условия нанесения и эксплуатации, а также обеспечить высокое качество лакокрасочного покрытия. Настоящая статья представляет обзор существующих подходов к применению модификаторов в составе водно-акриловых пленкообразующих композиций и их влияние на свойства готовых покрытий. Целью статьи является систематизация данных о применении модифицирующих добавок в акриловых водных дисперсиях, анализ их функционального назначения, а также оценка влияния на технологические и эксплуатационные характеристики покрытий. Заключение. Обзор выявляет актуальные направления в области разработки и применения модификаторов в акриловых водно-дисперсионных системах, подчёркивая необходимость дальнейших исследований по оптимизации рецептур, повышению совместимости компонентов и разработке новых высокоэффективных добавок.

Ключевые слова: *акриловое пленкообразующее, модификаторы, лакокрасочные материалы, диспергаторы, водно-дисперсионные композиции.*

Information about the authors

Darya Yurievna Ostrovnaya – doctoral student, M. Kozybayev North Kazakhstan University, Petropavlovsk, Kazakhstan; e-mail: darya_ostrovnaya@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2843-472X.

Antonina Nikolayevna Dyuryagina – Candidate of chemical sciences, Professor, M. Kozybayev North Kazakhstan University, Petropavlovsk, Kazakhstan; e-mail: adyuryagina@inbox.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9109-8159.

Yuliya Sergeevna Byzova* – PhD, M. Kozybayev North Kazakhstan University, Petropavlovsk, Kazakhstan; e-mail: yuliyabyzovva@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2072-0238.

Авторлар туралы мәліметтер

Дарья Юрьевна Островная – докторант, Манаш Қозыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университеті, Петропавл, Қазақстан; e-mail: darya_ostrovnaya@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2843-472X.

Антонина Николаевна Дюрягина – химия ғылымдарының кандидаты, профессор, Манаш Қозыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университеті, Петропавл, Қазақстан; e-mail: adyuryagina@inbox.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9109-8159.

Юлия Сергеевна Бызова* – PhD, доцент, Манаш Қозыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университеті, Петропавл, Қазақстан; e-mail: yuliyabyzovva@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2072-0238.

Сведения об авторах

Дарья Юрьевна Островная – докторант, Северо-Казахстанский университет им. М. Козыбаева, Петропавловск, Казахстан; e-mail: darya_ostrovnaya@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2843-472X.

Антонина Николаевна Дюрягина – кандидат химических наук, профессор, Северо-Казахстанский университет им. М. Козыбаева, Петропавловск, Казахстан; e-mail: adyuryagina@inbox.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9109-8159.

Юлия Сергеевна Бызова* – PhD, доцент, Северо-Казахстанский университет им.М.Козыбаева, Петропавловск, Казахстан; e-mail: yuliyabyzovva@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2072-0238.

Received 25.09.2025
Revised 02.02.2026
Accepted 02.02.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-71

IRSTI: 31.25.15

CC BY 4.0
Check for updates

S.N. Sagatova*, Kh.S. Rafikova
Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satbayev,
050013, Republic of Kazakhstan, Almaty, Satbayeva Street, 22
*e-mail: samira.sagatova9@gmail.com

PREPARATION AND ANALYSIS OF A BIODEGRADABLE POLYMER COMPOSITION BASED ON THERMOPLASTIC STARCH REINFORCED WITH STEARIC ACID-MODIFIED MICROCRYSTALLINE CELLULOSE

Abstract: *Plastic waste pollution is a global environmental problem. Therefore, the transition to environmentally friendly, biodegradable polymer materials is an urgent challenge for humanity. Thermoplastic starch is one of the most promising alternatives to synthetic polymers due to its availability, biodegradability, and elasticity. However, its limited mechanical strength and poor barrier properties restrict its application in packaging. To address these limitations, cellulose – a rigid and renewable biopolymer – was used as a reinforcing agent and modified with stearic acid to improve hydrophobicity and barrier performance. A TPS/M-MCC composite was prepared via melt mixing and analyzed using tensile testing, water absorption, biodegradability, and dynamic mechanical analysis (DMA). Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy confirmed the successful surface modification of cellulose. Compared with neat TPS, the composite demonstrated significantly enhanced mechanical strength, reduced water absorption and retained biodegradability. These findings suggest that TPS reinforced with stearic acid-modified cellulose is a promising environmentally friendly alternative to conventional synthetic polymers for packaging applications.*

Key words: *thermoplastic starch, cellulose, stearic acid, polymer composite, packaging materials.*

Introduction

Thermoplastic starch is one of the most widely used alternatives among modern biopolymers. Thermoplastic starch is produced by intensive mixing and heating of starch in the presence of plasticizers. It is biodegradable, non-toxic, cost-effective, and exhibits excellent properties compared to many other natural biodegradable polymers. At present, it is applied in the production of packaging

©S.N. Sagatova, Kh.S. Rafikova, 2026

materials, containers and tableware, as well as in pharmaceutical and the food industries, replacing many synthetic polymers [1].

The transition towards environmentally friendly, biodegradable and cost-effective natural materials has become a defining trend of the current generation. This shift is primarily driven by the growing concern over global plastic pollution and its associated toxicity. Every year, hundreds of thousands of tons of plastic waste enter and contaminate the environment worldwide [2]. For example, in Almaty, a major metropolis of Kazakhstan, the total amount of municipal household waste generated annually is estimated at approximately 1000-1200 thousand tons, of which about 23% consists of plastic waste. The morphological composition of household waste for the considered year is illustrated in Fig.1 [3].

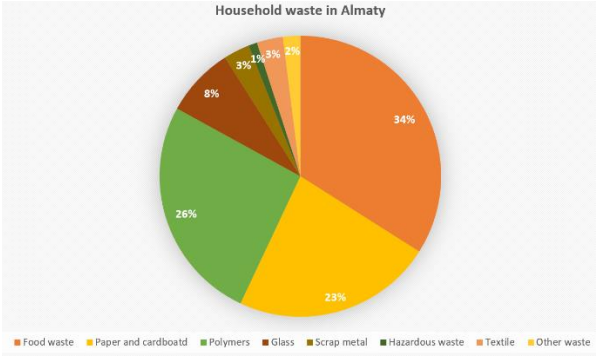


Figure 1 – Diagram of the morphological composition of household waste in Almaty for 2023 year

As evidenced by the date presented in the diagram, polymer waste ranks second after food waste. However, unlike food waste, polymer waste does not decompose or disappear naturally. On average, residents, including infants, generate approximately 42 kg/day of plastic waste capita per year. The major portion of plastic waste consists of packaging materials, primarily containers, bottles, and plastic bags, which are mainly produced from polymers such as polypropylene, polyethylene, polyethylene terephthalate, polystyrene, and polyurethane. These polymeric materials either do not degrade at all or require an extremely long period to decompose under natural conditions. Moreover, most of them are neither recycled nor reused, which makes them one of the largest contributions to environmental pollution [4].

Consider these factors; the transition to more environmentally friendly and biodegradable biopolymers has become an urgent necessity of present time. Among them, thermoplastic starch is regarded as one of the most promising materials for the production of eco-friendly packaging products [5].

The main drawback of thermoplastic starch lies in its relatively poor mechanical properties. To enhance its strength, various reinforcing agents are employed, including metal oxides, natural biomasses such as wood shavings, agricultural and food industry residues, clays, as well as biopolymers such as cellulose, chitosan and chitin. Below, studies conducted in this field and polymer composites developed based on thermoplastic starch are presented (Table 1).

Table 1 – Effect of different fillers on the properties of thermoplastic starch

Polymer composition	Preparation method	Influence of the filler on the matrix	Reference
TPS/ZnO	Solvent casting	The mechanical strength increased, and antimicrobial activity was also observed	[6]
TPS/eucalyptus nanofibrils	Extrusion	An increase in strength was observed with the incorporation of eucalyptus nanofibrils (ENF), with the optimal concentration determined to be 4%. Moreover, the composite demonstrated faster and more efficient biodegradation compared to neat thermoplastic starch (TPS)	[7]
TPS/Poly (butylene succinate) / citric acid	Thermal compression	The incorporation of fillers enhances the processability of cassava starch	[8]
TPS/nanocellulose	Solvent casting	Improvement in strength and resistance to mechanical stress	[9]

As can be seen, fillers used in thermoplastic starch generally improve its mechanical properties, thereby increasing the strength of the final product. However, most fillers primarily enhance the mechanical performance of the polymer composition, while the issue of barrier properties remains unresolved. Therefore, in the present work, both the barrier and mechanical properties of the resulting polymer composition were investigated [10].

The aim of this study was to develop a biodegradable polymer material based on thermoplastic starch with improved barrier and mechanical properties. For this purpose, cellulose was selected as the filler, as it possesses excellent mechanical properties and, according to literature data, significantly enhances the strength of thermoplastic starch. However, objectives of this study were not limited to improving mechanical performance; they also included enhancing the barrier properties of the material. In this context, barrier properties refer to the resistance of a material to water vapor and gases [11].

Since both cellulose and thermoplastic starch exhibit relatively low barrier properties, stearic acid was introduced to enhance moisture resistance. Stearic acid is a non-toxic and readily available hydrophobic component capable of improving the water resistance of the material [12]. To achieve better dispersion of stearic acid and to improve the homogeneity of the resulting polymer composite, a filler modification approach was employed, specifically the modification of cellulose.

In conclusion, this study resulted in the development of a cost-effective, environmentally friendly, and biodegradable polymer composite material suitable for use in the production of packaging products.

Materials and methods

Modification of cellulose with stearic acid

Microcrystalline cellulose (MCC) was mixed with 95% ethanol in a 1:3 ratio in a two-neck round-bottom flask. The mixture was thoroughly stirred for 30 minutes using a magnetic stirrer. Stearic acid, in an amount equivalent to that of cellulose, was then added to the mixture. The resulting mixture was continuously stirred with heating for 8 hours at 80℃. To prevent ethanol evaporation, a reflux condenser was attached to one neck of the flask, while a thermometer was placed in the other neck to monitor the temperature. The obtained modified MCC was filtered and dried in a drying oven at 50℃ for 6 hours, followed by 12 hours at room temperature. The success of the modification was confirmed using FTIR spectroscopy (fig. 2).

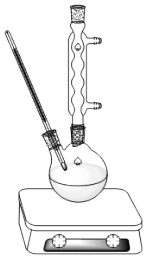


Figure 2 – Laboratory setup for cellulose modification

Preparation of TPS/M-MCC composite material

Corn starch was dissolved in distilled water at a 1:19 mass ratio and heated at 70℃ for 10-15 minutes until the thermoplastic starch (TPS) reached a viscous consistency. Subsequently, modified MCC (M-MCC), pre-dissolved in ethanol at a 1:3 volume ratio, and 2 mL of glycerol were added. The resulting suspension contained 20 wt. % of M-MCC relative to TPS. The mixture was stirred for 20 minutes, after which it was poured into a Petri dishes to form films. The films were dried at room temperature for 24 hours.

In total, two types of films were prepared: one neat TPS film and one TPS/M-MCC composite film with 20 wt. % M-MCC. Initially, the films were cast as circular sheets. For further characterization and testing, specimens were cut from these films into standardized dumbbell-shaped samples for mechanical and barrier property measurements.

Methods for Sample Analysis

FTIR spectrometry

Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy was performed to confirm the modification of microcrystalline cellulose with steraicic acid. Samples of unmodified and modified microrystalline

cellulose (0.3-0.5 mg) were thoroughly mixed with potassium bromide (0.5 g) and pressed into pellets with a diameter 13 mm. The FTIR spectra were collected in the range of 4000-400 cm^{-1} with a resolution of 4 cm^{-1} using an IR Fourier spectrometer.

Dynamic Mechanical Analysis (DMA)

Dynamic mechanical analysis (DMA) was performed to determine the glass transition temperature (Tg) of polymer samples. In this study, Tg and the loss tangent (tan) of thermoplastic starch (TPS) and TPS/M-MCC composite were measured using a DMA DX04 T analyzer (RM Electronic Measuring Instruments, Lázně Bělohrad, Czech Republic). Thermoplastic starch was used as a reference for comparison.

Rectangular specimens with dimensions of 40× 8× 2 mm, were subjected to sinusoidal three-point bending with a constant force amplitude of 500 mN at a frequency of 1 Hz. Measurements were conducted over a temperature range of -93 to 100 °C with a heating rate of 2 °C/min.

Mechanical properties

The mechanical properties of the samples were evaluated by tensile test. Specimens were prepared in a standardized «dumbbell» shape in accordance with the relevant ISO 527-3 standard. Tensile testing machine (Instron 3365, Instron, Norwood, MA, USA) at a constant crosshead speed of 100 mm/min at room temperature. For each component, five specimens were tested, and the average values were reported.

Barrier properties: Water Absorption

The barrier properties of the samples were evaluated by measuring their water absorption. Dumbbell-shaped specimens were conditioned in two controlled environments with relative humidities of 50% and 90%, respectively, following ASTM E 104. Samples were placed in sealed desiccators at room temperature for 7 days, after which they were weighed. Subsequently, the specimens were dried over silica gel in a desiccator at room temperature until a constant weight was achieved (approximately 14 days).

Water absorption (WA) was calculated using the following equation:

$$WA(\%) = ((W2-W1)/W1) \times 100 \quad (1)$$

where w_2 is the mass of the sample in the moistened state (g), and w_1 is the mass of the sample in the dried state (g).

Biodegradability

The biodegradability of TPS and TPS/M-MCC samples was evaluated in accordance with ASTM D5338. Specimens were placed in polyester mesh bags and buried in containers filled with pre-conditioned compost soil. The containers, equipped with perforated lids for ventilation, were kept in a drying oven at approximately 58° C for 7, 14 and 28 days. These compost moisture content was maintained at ~50% throughout the experiment by regular watering.

After one, two and three weeks, the first, second and third layers of samples was excavated, cleaned, dried to a constant weight, and weighed. The biodegradation (BD, %) was calculated according to the following equation:

$$BD (\%) = ((m0-m1)/m0) \times 100 \quad (2)$$

where m_0 is the mass of the sample before decomposition (g), m_1 is the mass of the sample after composting and drying (g).

Results and discussion

Modification of Microcrystalline Cellulose with Stearic Acid and Comparative FTIR analysis with Unmodified Microcrystalline cellulose

The modification of microcrystalline cellulose (MCC) with stearic acid (SA) is attributed to the formation of hydrogen bonds between the hydroxyl groups of cellulose and the carboxyl groups of stearic acid (fig. 3).

The resulting TPS/M-MCC composite exhibited a slightly different appearance compared to neat TPS, as the presence of small white M-MCC particles led to loss of transparency. Representative images of the TPS and TPS/M-MCC films are shown (fig. 4) below.

FTIR spectroscopy was employed to confirm the modification of MCC with stearic acid. The figure below (fig.5) presents the results of the comparative spectral analysis between unmodified MCC and modified MCC (M-MCC).

According to the FTIR spectroscopy data for MCC, a broad band in the range of 3300-3340 cm^{-1} was observed, corresponding to the stretching vibrations of hydroxyl (-OH) groups. In the spectrum of stearic acid-modified MCC (M-MCC) the intensity of this band decreased and its width

was partially reduced, indicating surface modification of MCC due to the formation of hydrogen bonds and partial interaction of carboxyl groups of stearic acid with the hydroxyl groups of cellulose.

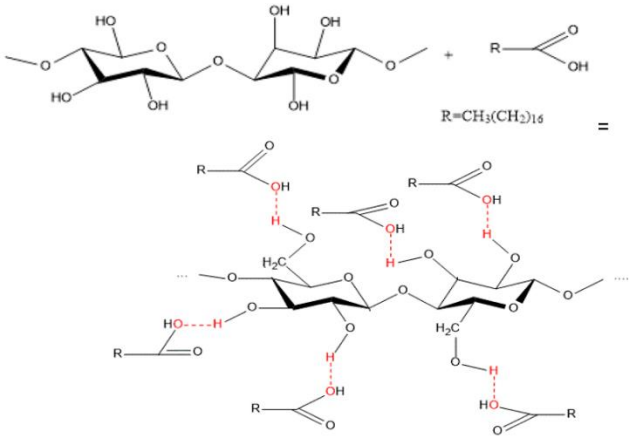


Figure 3 – Modification of MCC and formation of hydrogen bonds between MCC and SA



Figure 4 – Visual appearance of the obtained films: (a) TPS and (b) TPS/M-MCC

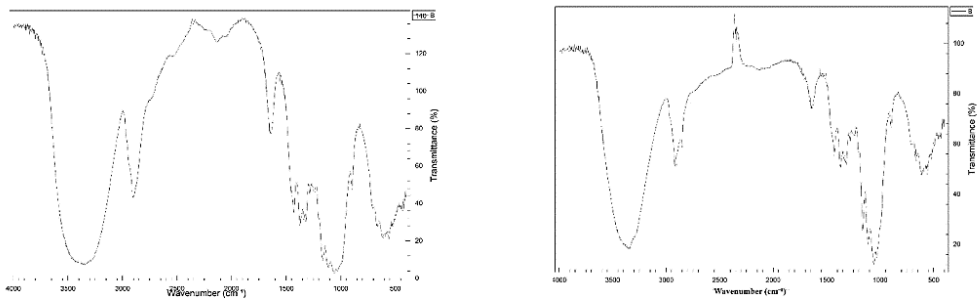


Figure 5 – Results of FTIR spectroscopy for: (a) MCC (b) M-MCC

Additionally, the peaks in the region of 1440-1390 cm^{-1} increased in intensity, which is attributed to the presence of CH stretching vibrations of the long alkyl chain of stearic acid. However, no new peaks where detected between 1745 and 1715 cm^{-1}, which excludes the formation of C=O bonds of esters and confirms that no covalent esterification occurred. This supports through hydrogen bonding rather than deep chemical modification.

At the same time, intense signals were observed in the range of 1050-1150 cm^{-1}, typical for the vibrations of C–O–C glycoside bonds in the cellulose structure, confirming the preservation of the cellulose backbone.

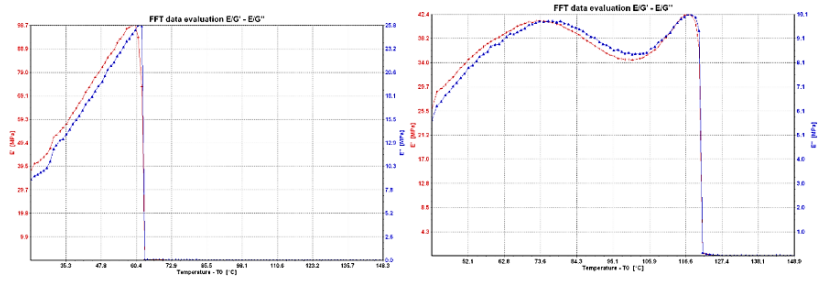
Taken together, these spectral changes confirm the successful surface modification of MCC with stearic acid and the formation of a hydrophobic layer, which is consistent with the observed improvement in filler-matrix compatibility in the composite materials.

Dynamic mechanical analysis

Dynamic Mechanical Analysis (DMA) was conducted to investigate the influence of stearic acid-modified cellulose (M-MCC) on the thermomechanical behavior of thermoplastic starch (TPS). Figure 6 shows the temperature dependences of the storage modulus (E') and loss modulus (E'') for neat TPS and the TPS/M-MCC composite.

The glass transition temperature (Tg) of the samples was determined as the temperature at which the amorphous regions of the polymer transitions from a rigid, glassy state to a soft, rubbery state.

As shown in Figure 6a, neat TPS exhibited a characteristic decrease in E' with increasing temperature, indicating the softening of the starch-plasticizer matrix. The peak E'' and maximum tan δ correspond to the glass transition region (Tg), which was observed at approximately 63°C.



a b

Figure 6 – Results of dynamic mechanical analysis (a) TPS, (b) TPS/M-MCC

In contrast, the TPS/M-MCC composite maintained a higher E' across the entire temperature range, indicating a pronounced reinforcement effect on the filler. The glass transition temperature, determined from the maximum of tan δ, shifted to approximately 120°C – about 57°C higher than that of neat TPS. This significant shift confirms the restricted mobility of the polymer chains, resulting from the interactions with the hydrophobically modified cellulose.

The tan δ peak of the TPS/M-MCC composite was slightly lower and broader compared to that of neat TPS, indicating reduced viscous damping and a more elastic response. Additionally, the appearance of distinct «shoulders» on the E'' suggests the presence of heterogeneous relaxation processes, likely associated with the filler–matrix interface.

Overall, the incorporation of stearic acid-modified cellulose effectively enhanced the rigidity and thermal stability of TPS by improving filler-matrix compatibility and restricting the mobility of the starch chains.

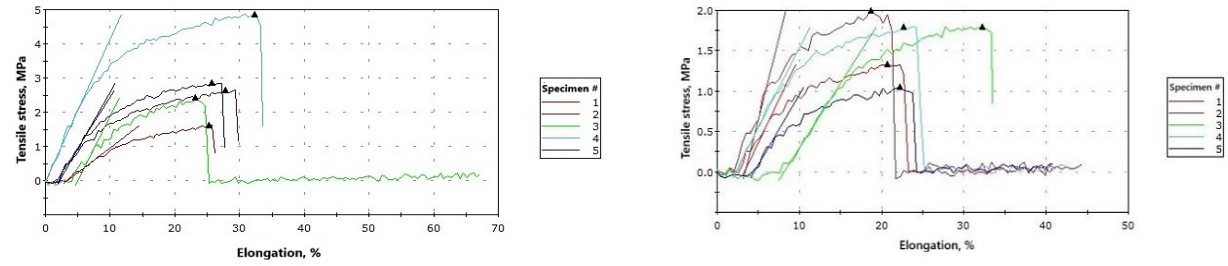
Mechanical properties

The mechanical properties of neat TPS and the TPS/M-MCC composite were evaluated using uniaxial tensile testing. Table 2 summarizes the average values of Young's modulus, maximum tensile strength and elongation at break for the investigated samples.

Table 2 – Results of mechanical testing

Sample	Average value of Young's modulus (MPa)	Average value of maximum tensile strength (MPa)	Average value of elongation at break (%)
TPS	23±2	1,60±0,3	23±3
TPS/M-MCC	31±2	2,89±0,1	27±3

The stress-strain curves obtained from the tensile tests are presented in Figure 7.



a b

Figure 7 – Tensile strength results: (a) TPS (b) TPS/M-MCC

According to the results summarized in Table 2 and stress-strain curves in Figure 7, the incorporation of M-MCC into the TPS matrix significantly enhanced mechanical performance of the

material. The Young's modulus increased from 23 MPa to 31 MPa, indicating improved stiffness and more efficient stress transfer between the matrix and the filler. Furthermore, the maximum tensile strength nearly doubled, confirming the pronounced reinforcing effect of the M-MCC and its ability to improve the load-bearing capacity of the composite. Notably, the elongation at break also increased slightly, suggesting that the composite retained – and even slightly improved – its ductility. Overall, the TPS/M-MCC composite demonstrated excellent mechanical properties, combining increased stiffness with preserved elasticity.

Barrier properties

Barrier properties were evaluated by measuring the water absorption of the materials. Table 3 shows the water adsorption results for neat TPS and the TPS/M-MCC composite at relative humidity of 50% and 90%.

Table 3 – Results of water absorption tests

Samples	WA at 50%, %	WA at 90%, %
TPS	23±2	52±2
TPS/M-MCC	12±1	39±2

According to the data presented, the water absorption of the composite was nearly reduced by half compared to neat TPS. This indicates that the hydrophobicity of the material was significantly improved due to the modification with stearic acid. Enhanced moisture resistance is advantageous for applications in packaging, particularly for products requiring protection from humid environments or for extending the shelf life of dry goods under wet conditions.

Biodegradation

Biodegradation is a critical parameter for evaluating the environmental impact of bio composites, as it reflects their ability to decompose under natural conditions (Fig.8).



Figure 8 – Visual appearance of biodegradation tests

According to the data in the Table 4 and Figure 9, the incorporation of M-MCC slightly enhanced the biodegradability of the material. The degree of biodegradation increased from 54.35±3% for neat TPS to 57.38±3% for the TPS/M-MCC composite.

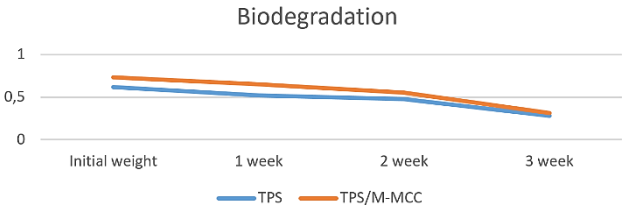


Figure 9 – Biodegradation of polymers as a function of time (weeks)

Table 4 – Results of biodegradation degree of the samples

Material	TPS	TPS/M-MCC
BD, %	54,35±3	57,38±3

In general, the incorporation of the filler did not substantially alter the overall biodegradation behavior of the composite. This is expected, as the filler itself is biodegradable and environmentally benign.

Consequently, the resulting material can be considered environmentally friendly, showing a high degree of biodegradation under composting conditions, and safe for disposal with minimal environmental impact.

Conclusion

In conclusion, the polymer composition based on thermoplastic starch showed excellent performance and fulfilled the intended objectives. Compared with neat thermoplastic starch, the TPS/M-MCC composition exhibited higher strength and toughness. The incorporation of stearic acid-modified cellulose reduced, water adsorption by nearly 50%, significantly improving the barrier properties of the material. The biodegradability of the composite remained comparable to that of neat TPS, confirming its environmental safety and sustainable applications. Overall, the reinforcement with modified cellulose led to a substantial improvement in the mechanical and barrier performance of TPS. Therefore, the TPS/M-MCC composite demonstrates strong potential as an environmental friendly, cost effective and fully biodegradable material for the production of packaging products, contributing to the reduction of plastic pollution.

References

1. Starch-based biodegradable materials: Challenges and opportunities / T. Jiang et al // Advances in Industrial and Engineering Polymer Research. – 2020. – Vol. 3, № 1. – P. 8-18.
2. Kusainova I. Kazahstan zadyhaetsya ot plastika: ne menee 100 tys. tonn othodov v god unichtozhayut prirodu i zdorov'e [The electron. resource]. – 2024. – URL: Казахстан задыхается от пластика: не менее 100 тыс. тонн отходов в год уничтожают природу и здоровье | Inbusiness.kz.
3. Sailaubekova P. Boi plastiku. [The electron. resource]. – 2023. – URL: Бой пластику! | United Nations Development Programme.
4. Tacker M. Life Cycle Assessment of Polyethylene Packaging and Alternatives on the European Market / M. Tacker, T. Hafner-Kuhn, A. Gstöhl // Cleaner Environmental Systems. – 2025. – P. 108404.
5. Improving mechanical and water sorption properties of thermoplastic starch by incorporating chitosan filler / B. Balla et al // Polymer Testing. – 2021. – Vol. 101.
6. Sustainable starch-based biocomposites: Effect of inorganic fillers on the structure and properties / J. Móczó et al // Results in Engineering. – 2025. – Vol. 26, № February.
7. Effect of Silybum marianum-derived nanocellulose as a sustainable functional filler on supramolecular structure of thermoplastic zein / M. D'Auria et al // International Journal of Biological Macromolecules. – 2025. – Vol. 311, № P 3. – P. 143904.
8. Biodegradable thermoplastic cassava starch/poly (butylene succinate) blends with citric acid: Characterization and evaluation of properties / R.F.A. Santos et al // International Journal of Biological Macromolecules. – 2025. – Vol. 322, № August.
9. Kampangkaew S. The synthesis of cellulose nanofibers from Sesbania Javanica for filler in thermoplastic starch / S. Kampangkaew, C. Thongpin, O. Santawtee // Energy Procedia. – 2014. – Vol. 56, № C. – P. 318-325.
10. Peanut shell from agricultural wastes as a sustainable filler for polyamide biocomposites fabrication / O. Oulidi, et al // Journal of King Saud University – Science. – 2022. – Vol. 34, № 6. – P. 102148.
11. Development and characterization of water hyacinth reinforced thermoplastic starch as sustainable biocomposites / D. Behera et al // RSC Sustainability. – 2025. – Vol. 3, № 4. – P. 1807-1818.
12. Nanocellulose reinforced corn starch-based biocomposite films: Composite optimization, characterization and storage studies / S. Patil et al // Food Packaging and Shelf Life. – 2022. – Vol. 33, № April. – P. 100860.

С.Н. Сагатова*, Х.С. Рафикова

Қ.И. Сатпаев атындағы Қазақ Ұлттық зерттеу техникалық университеті,
050013, Қазақстан Республикасы, Алматы қаласы, Сатпаев көшесі, 22
*e-mail: samira.sagatova9@gmail.com

СТЕАРИН ҚЫШҚЫЛЫМЕН МОДИФИЦИРЛЕНГЕН МИКРОКРИСТАЛДЫҚ ЦЕЛЛЮЛОЗАМЕН НЫҒАЙТЫЛҒАН ТЕРМОПЛАСТИКАЛЫҚ КРАХМАЛ НЕГІЗІНДЕГІ БИОЛОГИЯЛЫҚ ЫДЫРАЙТЫН ПОЛИМЕРЛІ КОМПОЗИЦИЯНЫ АЛУ ЖӘНЕ ЗЕРТТЕУ

Қоршаған ортаның пластикалық қалдықтармен ластануы – жаһандық экологиялық проблемалардың бірі болып табылады. Сондықтан экологиялық таза, биологиялық ыдырайтын полимерлі материалдарға көшу бүкіл адамзат үшін өзекті мәселеу. Термопластикалық крахмал

өзінің қол жетімділігіне, экологиялық тазалығы мен зиянсыздығына және эластикалық қасиеттеріне байланысты синтетикалық полимерлерге ең перспективалы баламалардың бірі болып саналады. Дегенмен де, оның берітігің нашарлығы мен әлсіз тосқауылдық қасиеттері қаптама өнімдерін өндіруде қолдану мүмкіндігін шектейді. Осы кемшіліктерді жою үшін термопластикалық крахмал гидрофобтылығы мен тосқауылдық қасиеттерін арттыру мақсатында стеарин қышқылымен модифицирленген, беріктігі жоғары және қолжетімді биополимер – микрокристалды целлюлозамен нығайтылды. ТПК/М-МКЦ композиті балқымада араластыру әдісі арқылы алынып, созылуға беріктігі, су сіңіру қасиеті, биологиялық ыдырау дәрежесі және динамикалық механикалық талдау (DMA) әдістері арқылы зерттелді. Фурье түрлендірулі инфрақызыл спектроскопиясы (FTIR) целлюлозаның беттік модификациясын растады. Таза ТПК-мен салыстырғанда, алынған композит айтарлықтай жоғары механикалық беріктікті, төмен су сіңіруді және жақсы биологиялық ыдырау қабілетін көрсетті. Бұл нәтижелер модификацияланған целлюлозамен нығайтылған ТПК қаптама материалдарын өндіруге арналған дәстүрлі синтетикалық полимерлерге перспективалы экологиялық таза балама екенін көрсетеді.

Түйін сөздер: *термопластикалық крахмал, целлюлоза, стеарин қышқылы, полимерлі композиция, қаптама материалдары.*

С.Н. Сагатова*, Х.С. Рафикова
Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева
050013, Республика Казахстан, Алматы, ул. Сатпаева, 22
*e-mail: samira.sagatova9@gmail.com

ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ БИОРАЗЛАГАЕМОЙ ПОЛИМЕРНОЙ КОМПОЗИЦИИ НА ОСНОВЕ ТЕРМОПЛАСТИЧНОГО КРАХМАЛА, АРМИРОВАННОГО МИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗОЙ МОДИФИЦИРОВАННОЙ СТЕАРИНОВОЙ КИСЛОТОЙ

Загрязнение окружающей среды пластиковыми отходами является глобальной экологической проблемой. Поэтому переход на экологически чистые, биоразлагаемые полимерные материалы является актуальной задачей для всего человечества. Термопластичный крахмал, благодаря своей доступности, биоразлагаемости и эластичности, является одной из наиболее перспективных альтернатив синтетическим полимерам. Однако его низкая прочность и слабые барьерные свойства ограничивают возможности применения в производстве упаковочных изделий. Для устранения этих недостатков, термопластичный крахмал был армирован микрокристаллической целлюлозой – жестким и возобновляемым биополимером, модифицированным стеариновой кислотой для повышения гидрофобности и барьерных характеристик. Композит ТПК/М-МКЦ был получен методом смешивания расплава и исследован с помощью испытаний на растяжение, определения водопоглощения, оценки биоразлагаемости и динамического механического анализа (DMA). Инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье (FTIR) подтвердила успешную модификацию поверхности целлюлозы. По сравнению с чистым ТПК, полученный композит показал значительно высокую механическую прочность, сниженное водопоглощение и сохраненную способность к биологическому разложению. Эти результаты свидетельствуют о том, что ТПК, армированный модифицированной целлюлозой, является перспективной экологически чистой альтернативой традиционным синтетическим полимерам для производства упаковочных материалов.

Ключевые слова: *термопластичный крахмал, целлюлоза, стеариновая кислота, полимерная композиция, упаковочные материалы.*

Information about the authors

Samira Nurbokyzy Sagatova* – PhD student and teacher of Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satbayev, Almaty, Kazakhstan; e-mail: samira.sagatova9@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7078-8938.

Khadichakhan Sabirzhanovna Rafikova – PhD, professor of Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satbayev, Almaty, Kazakhstan; e-mail: kh.rafikova@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8028-2244.

Авторлар туралы мәліметтер

Самира Нурболқызы Сагатова* – Қ.И. Сатпаев атындағы Қазақ Ұлттық Зерттеу Техникалық Университетінің оқытушысы және PhD студенті, Қазақстан Республикасы, Алматы қаласы; e-mail: samira.sagatova9@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7078-8938.

Хадичахан Сабыржановна Рафикова – PhD, Қ.И. Сатпаев атындағы Қазақ Ұлттық Зерттеу Техникалық Университетінің профессоры, Қазақстан Республикасы, Алматы қаласы; e-mail: kh.rafikova@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8028-2244.

Сведения об авторах

Самира Нурболқызы Сагатова* – PhD студент и преподаватель Казахского национального исследовательского технического университета имени К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан; e-mail: samira.sagatova9@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7078-8938.

Хадичахан Сабыржановна Рафикова – PhD, профессор Казахского национального исследовательского технического университета имени К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан; e-mail: kh.rafikova@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8028-2244.

Received 24.09.2025
Revised 08.12.2025
Accepted 09.12.2025

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-72

IRSTI: 616331[74]

B.Sh. Khassankhojayeva[1], G.F. Sagitova[*], G.A. Takibayeva[1], S.Zh. Yegemberdiyeva[2], A.T. Kabylbekova[3]

[1]M. Auezov South Kazakhstan University,
160012, Republic of Kazakhstan, Shymkent, Tauke-khan avenue, 5,
[2]Regional Innovation University,
160000, Republic of Kazakhstan, Shymkent,
Ryskulova Street, 27/2,
[3]Miras University,
160000, Republic of Kazakhstan, Shymkent, Sapak Datka, 2
[*]e-mail: guzalita.f1978@mail.ru

OPTIMIZATION OF RECIPES OF DEVELOPED RUBBER MIXTURES TAKING INTO ACCOUNT THE EVALUATION OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES

Annotation: *Optimization of the composition of rubber compounds is a complex and multifactorial process due to the variety of components used and the complex relationships between them. Conducting a series of experimental studies to select the optimal formulation requires a significant investment of time, raw materials and laboratory resources. In this paper, an approach based on the use of mathematical modeling methods is proposed, which makes it possible to predict the properties of rubber compounds and determine their optimal composition. Special attention is paid to the use of natural zeolite and oil refining waste as modifying additives, which helps to increase the efficiency and environmental friendliness of production. The additives used include the organic fraction of oil sludge and natural zeolite from the Chankanai deposit. Based on a priori information, an experimental design was developed to enable the construction of adequate mathematical models using the least squares method. These models describe the relationships between the component composition and both performance properties and economic criteria. An optimization problem is then formulated based on these models, followed by an analysis of its features and the selection of the most effective solution method. The effectiveness of the proposed approach is demonstrated through an example of optimizing the rubber compound formulation. Modification of rubber compounds makes it possible to obtain composite materials with increased oil resistance, stable elastic and strength properties. This approach helps to reduce production costs by using affordable raw materials and simplifying the technological process. The developed computational model for determining the optimal composition of a rubber compound can be used both in scientific research and in industrial practice in the development of new formulations of elastomeric compositions.*

Key words: *multicomponent mixtures, rubber mixtures for sealing the hydraulic seals, optimization problem, conditional tensile strength, composition – cost.*

Introduction. Modern production of rubber, construction and other industrial products relies on the use of complex multicomponent systems, which include binders, fillers, resins, plasticizers and various chemical additives that provide the required performance characteristics of materials. These materials represent heterogeneous systems composed of particles and grains of varying

©B.Sh. Khassankhojayeva, G.F. Sagitova, G.A. Takibayeva, S.Zh. Yegemberdiyeva, A.T. Kabylbekova, 2026

dimensions. Their formulation can be mathematically described by a set of fractions zi, expressed in mass, volume, or molar terms, meeting the conditions $0 \le z_i \le 1$ and $\sum z_i = 1$. When the performance of such systems is governed exclusively by the ratios between individual components z = (z1, z2, …, zn), and not by the overall quantity, processing methods, or external influences, they are referred to as multicomponent systems [1].

In the production of rubber products, it is often necessary to optimize the composition of multi-component mixtures so that certain properties of these mixtures reach the best values, while taking into account economic aspects. In the case of rubber mixtures, after developing the basic recipe, it is important not only to fix the initial ratios of the components, but also to optimize them in the process of further adjustment. This allows us to accurately determine such concentrations of individual components of the mixture, at which the key performance characteristics of the vulcanizate, determining the quality of the final product, will be expressed to the maximum. It is important that the technological requirements are met, and the material and energy costs for the production of the product remain minimal.

The composition of rubber mixtures is determined by the functional purpose of the product, the expected operating environment, and specific technical requirements. Such compositions are based on natural and synthetic rubbers, which are key products of oil refining [2-4]. Synthetic elastomers are mainly used in industrial production, among which synthetic isoprene rubber (SKI-3) is the most common. Despite the close similarity of its chemical structure to natural rubber, SKI-3 is inferior to its natural counterpart in a number of performance characteristics [3, 5]. In this regard, formulations of rubber compounds, as a rule, contain various modifying additives, and the search for new, more effective components remains one of the key areas for improving the durability and operational properties of finished products [6].

Since rubber compounds are complex multicomponent systems, the experimental determination of their optimal composition requires significant time and material costs associated with a series of laboratory tests. In modern conditions, mathematical modeling methods are increasingly being used to solve this problem. This approach allows not only to significantly reduce the duration of experimental studies, but also to predict the properties of final materials, as well as to use statistical models to assess the structural reliability of polymer composites [7-13]. Thus, mathematical modeling is becoming an important tool for optimizing technological processes and developing new materials in various industries.The present study focuses on modeling an optimal rubber compound formulation that incorporates industrial waste and locally sourced natural mineral components.

Materials and methods

The following were considered as objects of study:

– organic part of oil sludge (OPOS), previously extracted from waste of @PetroKazakhstan Oil Products@ LLP (Shymkent) by extraction method [14, 15];

– natural mineral zeolite of Chankanai deposit, Kazakhstan;

– rubber mixture for manufacturing rubber seals of hydraulic seals [16, 17];

– rubber mixture for manufacturing seals of hydraulic seals based on SKI-3, «ECO Shina» LLP (Table 1).

2. Experimental part

At the previous stage of the research, we developed rubber mixtures based on SKI-3 for the production of seals for hydraulic seals, instead of white carbon black, we used zeolite as a filler, and the organic part of oil sludge as a softener, replacing PN-6Sh oil [16, 17].

2.1 Characteristics of materials

Synthetic cis-isoprene rubber [C5H8]n (poly-2-methyl-1,4-butadiene) grade SKI-3 [18] with a content of cis-1,4 units of at least 96% and a molecular weight of 100 thousand to 1 million g/mol was purchased from Russia (Figure 1).

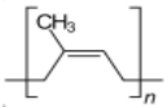


Figure 1 – Poly-2-methyl-1, 4-butadiene

OPOS – from the qualitative and quantitative analysis of oil sludge of «PetroKazakhstan Oil Products» LLP it was established that it contains organic compounds, solid inorganic components and water. Basically, the organic part of the oil sludge is represented by paraffins and asphalt-resinous substances. The presence of organic compounds in the oil sludge allows us to predict the manifestation of the plasticizing effect when introducing oil sludge into the rubber mixture.

Zeolite (TU38.10281-88) is a natural mineral. The general formula of zeolites is Mex/n [AlxSiyO2(x+y)]×zH2O, where Me is a metal, n is its oxidation state, x is the number of aluminum atoms, y is the number of silicon atoms, z is the number of water molecules.

2.2 Analytical control of raw materials

The group chemical composition was studied by liquid adsorption chromatography on a chromatograph with a mass-selective detector on a XEVO TQ-GC/GC-8890 device [14]. The study of functional groups in the organic part of the oil sludge by IR spectroscopy was carried out according to the standard technique on a single-beam IR Fourier spectrometer ShimadzuIRPrestige-21 with an attenuated total internal reflection (ATR) Miracle attachment from PikeTechnologie [14].

The recipe of the reference rubber mixture, as proposed by the authors of Ref. [19], along with the formulations of the studied rubber mixtures intended for the production of hydraulic seal components, is presented in Table 1.

Table 1 – Recipe for rubber mixture for making seals for hydraulic seals

Name of ingredients	Mass parts per 100 mass parts of rubber (*caoutchouc*)					
	Prototype	1	2	3	4	5
SKI-3 of the 1st group	100	100	100	100	100	100
Technical sulfur	4	4	4	4	4	4
Sulfenamide M	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Santogard PVJ	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Zinc white	5	5	5	5	5	5
Stearic acid	2	2	2	2	2	2
Pine rosin	2	2	2	2	2	2
Softener ASMG	3	3	3	3	3	3
PN-6Sh oil	**6**	**4**	**3**	**1**	**0**	**5**
OPOS	**0**	**2**	**3**	**5**	**6**	**1**
Protective microwax 3B-1	1	1	1	1	1	1
Acetonanil R	2	2	2	2	2	2
Diafen FP	2	2	2	2	2	2
Carbon black P – 220	60	60	60	60	60	60
White carbon	**20**	**15**	**10**	**5**	**0**	**17**
Zeolite	**0**	**5**	**10**	**15**	**20**	**3**
TOTAL	**208**	**208**	**208**	**208**	**208**	**208**

Rubber mixtures for manufacturing seals for hydraulic seals were prepared with full and partial replacement of PN-6Sh oil with the organic part isolated from oil sludge of «PetroKazakhstan Oil Products» LLP, as well as with simultaneous replacement of white carbon black with zeolite from the Chankanai field. The obtained mixtures were characterized by a satisfactory set of technological indicators, after which the properties of the vulcanizate were determined. OPOS was introduced into the mixture in a dosage of 1.0-6.0, and zeolite 3.0-20.0 parts by weight per 100 parts by weight of rubber (caoutchouc). Five samples of rubber mixtures were prepared.

2.3 Tensile testing of rubber compound

To assess the practical effectiveness of using alternative fillers and plasticizers instead of traditional components, several SKI-3-based rubber compounds were prepared in the laboratory (Table 1). The tensile properties of the vulcanizates obtained were studied using a universal testing machine in strict accordance with GOST 270-75. This method allows you to obtain reproducible information about key parameters, including: tensile strength, elongation at break, and stress at specified strain levels.

The test equipment provided a high degree of accuracy: the error did not exceed ± 1% of the applied load, starting from 20% of the maximum range. The lengthening of the sample was constantly monitored, and the change in the distance between the control marks was measured using a precision instrument with a scale division of no more than 1 mm, which guaranteed the reliability of the results.

Throughout the stretching process, the load corresponding to the specified elongation levels was fixed. At the moment of fracture, both the breaking force and the final gauge length of the dumbbell-shaped specimens were registered. In order to maintain the validity of the data, results obtained from specimens that failed outside the working (narrowed) zone were discarded, as such fractures could introduce errors into the analysis.

During stretching, the load corresponding to selected elongations was fixed, while at the point of specimen rupture both the breaking force and the final gauge length were registered. Results obtained from fractures occurring outside the working section of the dumbbell-shaped samples were excluded, ensuring the correctness of the statistical analysis.

Vulcanizate tests were carried out according to GOST 270-75. The temperature resistance was determined after accelerated aging at 80 °C for 72 hours. The determination of tensile strength after thermal aging revealed how resistant the obtained materials are to prolonged exposure to high temperatures close to real operating conditions. Thus, the tests carried out not only provided accurate and repeatable results, but also showed that the developed rubber compounds have characteristics suitable for practical industrial applications.

2.4 Study of the vulcanization process

The vulcanization process was studied in order to gain a more detailed understanding of the mechanism and characteristics of the curing reaction of the studied rubber compounds. For this purpose, the main parameters of vulcanization were determined using rheological analysis, which allows us to trace the change in viscoelastic properties of the material over time and evaluate the dynamics of the formation of a spatial grid. This approach makes it possible not only to determine the optimal vulcanization conditions, but also to determine the effect of the mixture composition on the rate and degree of crosslinking of the rubber. The measurements were carried out on a Monsanto Rheometer 100S, which makes it possible to continuously record the torque generated during the cross-linking process and thereby construct rheological curing curves. Such curves show how the viscoelastic properties of the rubber compound change over time, and provide data showing the vulcanization process. The tests were carried out according to GOST 12535-78, which ensures the accuracy and comparability of the results. The samples were kept at 160 °C for 30 minutes (industrial elastomer curing conditions). The analysis of the rheological data obtained made it possible to determine the main parameters of the process, such as the optimal vulcanization time, the start of the reaction and the maximum torque, which in turn reflects the degree of crosslinking of the rubber. The above indicators helped to objectively assess the quality and technological properties of the developed rubber compounds.

3 Mathematical modeling

3.1 Factors under study

Modeling and optimization of the parameters for obtaining rubber compounds with specified properties was performed using a multifactorial probabilistic deterministic method. This methodology makes it possible to account for the combined influence of several variables while simultaneously ensuring statistical reliability of the obtained results.

As variable factors, two types of substitutions were investigated: the incorporation of the organic fraction of oil sludge (OPOS) as a plasticizer in place of the conventional PN-6Sh oil, and the introduction of locally available natural zeolite as a reinforcing filler instead of traditional white carbon. These substitutions were selected due to their dual significance: on the one hand, they contribute to cost reduction and resource efficiency, and on the other hand, they allow the evaluation of the functional viability of alternative raw materials under industrially relevant conditions.

As a result of the research, mathematical models were built that describe the influence of technological factors on the properties of materials. Based on them, optimal conditions for obtaining vulcanizates that meet the specified criteria were determined. The adequacy of the models has been confirmed experimentally. The values of the factors are shown in Table 1.

3.2. Matrix of the six-factor experimental design

Mathematical modeling of the optimal composition of the rubber compound was carried out using a six-factor experimental plan, which made it possible to identify patterns of influence of key technological parameters and their cumulative effect on the properties of the resulting material. This experimental matrix made it possible to study changes in the mechanical properties of rubber compounds depending on the selected composition parameters.

For this purpose, samples with different ratios of components were tested, allowing us to collect a sufficient amount of data and identify statistically significant patterns and relationships between the factors. Based on the results obtained, regression equations were constructed, which became the basis for further optimization of formulations of rubber compositions.

4. Results and discussion

4.1 Checking the optimality of the proposed rubber compound composition

To confirm the correctness of the proposed rubber formulation, a comprehensive assessment of the main indicators of its quality was carried out. The objective of the study was to ensure that the developed mixture meets the established standards and provides an optimal ratio of strength and elasticity. According to GOST 269-66, testing methods and equipment are adapted to the unique behavior of elastomers, which, unlike rigid materials, can undergo significant reversible deformations under relatively low stresses. In addition, their response strongly depends on testing conditions, including the duration of loading and temperature regime.

Another critical aspect is the susceptibility of rubber compounds to external non-mechanical factors. Prolonged exposure to elevated temperatures, ultraviolet light, ozone, oxygen, or other aggressive media can cause substantial degradation of mechanical properties. These features must be taken into account when evaluating the adequacy of the compound's composition, since they directly influence the durability and operational reliability of the finished vulcanizates.

4.2 Tensile testing of rubber

The experiments are carried out according to a pre-selected plan [1]. The experimental data obtained were processed using the least squares method, which allowed us to construct appropriate mathematical models. After checking their adequacy, we proceeded to the formulation and solution of the optimization problem.

To establish the optimal content of the organic part of oil sludge in rubber mixtures intended for the manufacture of hydraulic seals, which achieve the best conventional tensile strength of the vulcanizate, we used mathematical modeling and optimization methods.

The effect of the input parameters was studied: conventional strength (y1), relative elongation at break (y2), tear resistance (y3) and Shore A hardness.

The mathematical formulation of such problems in the general case is as follows:

$$\max\left(\min\right) y_j\left(z_1, z_2, ..., z_n\right),\ j=\overline{1,m};\ \max\left(\min\right) L_k\left(z_1, z_2, ..., z_n\right),\ k=\overline{1,p} \quad (1)$$

when $0 \le z_i \le 1$, $\sum_{i=1}^{n} z_1 = 1$, (2)

here yj (z1, z2 ,..., zn) j=1, m are functions of the properties of a multicomponent mixture, which are Scheffe polynomials constructed on the basis of experimental data conducted according to special plans [1], Lk (z1, z2 ,..., zn), k =1, p are economic criteria.

The solution of the multi-criteria optimization problem (1)-(2) in the general case is associated with serious mathematical difficulties, since usually the properties of the mixture, on the basis of which the selection of the component composition is carried out, are of a contradictory nature.

The choice of the method for solving the multicriterial optimization problem (1)-(2) and overcoming the mathematical difficulties that arise are possible only after developing the property functions yj(z1,z2,…,zn) for j=1, m for a multicomponent mixture, taking into account the specifics of the problem being solved, as well as the features of the economic criteria Lk(z1,z2,…,zn) when k=1,p. These functions yj(z1,z2,…,zn), j=1,m and Lk(z1,z2,…,zn), k=1,p form a mathematical model of the problem aimed at determining the optimal composition-property ratio of multicomponent mixtures. The implementation of this approach can be demonstrated using the example of the problem of selecting the optimal component composition of a rubber mixture used for rubber products (RP).

It is necessary to optimize the component composition of the rubber mixture consisting of PN-6Sh oil (x1), OPOS (x2) and zinc white (x3), zeolite (x4) in order to ensure the satisfaction of its physical and mechanical characteristics: conventional strength (y1), relative elongation at break (y2), tear resistance (y3) and Shore A hardness (y4) in accordance with the requirements of GOSTs or to achieve the maximum (minimum) values of these parameters. At the same time, it is necessary to minimize the cost of the mixture.

In this formulation, the optimization problem is multi-criterial. To solve it, the simplest approach is to use the method of identifying the main criterion, which is the cost of the mixture.

4.3 Classical multi-criteria optimization of rubber compound composition:

4.3.1. Formulation of the optimization problem

We have:

Variables (x) – proportions of mixture components:

- x1: PN-6Sh oil
- x2: OPOS
- x3: White carbon
- x4: Zeolite

Response functions (y) – physical and mechanical properties of the mixture:

- y1(x): Conventional strength (MPa)
- y2(x): Relative elongation at break (%)
- y3(x): Tear resistance (kN/m)
- y4(x): Shore A hardness

Objective function:

- C(x): Cost of the mixture (tenge/kg), which needs to be minimized.

Objective: Find such values of x1, x2, x3, x4 that:

1. Satisfy the requirements of GOST for parameters y1, y2, y3, y4
2. Minimize the cost function C(x)

4.3.2. Build regression models for the properties:

Based on the experimental data, build approximations:

$$\begin{cases} y_1(x) = f_1(x_1, x_2, x_3, x_4) \\ y_2(x) = f_2(x_1, x_2, x_3, x_4) \\ y_3(x) = f_3(x_1, x_2, x_3, x_4) \\ y_4(x) = f_4(x_1, x_2, x_3, x_4) \end{cases}$$

These can be linear or polynomial models of the second order, constructed using the least squares method.

4.3.3. We formulate restrictions:

- $y_1 \geq y_1^{GOST}$
- $y_2 \geq y_2^{GOST}$
- $y_3 \geq y_3^{GOST}$
- $y_4 \in \left[y_4^{\min}, y_4^{\max} \right]$
- $x_1 + x_2 + x_3 + x_4 = 1$
- $x_i \geq 0$

4.3.4. Cost formula:

$$C(x) = c_1 x_1 + c_2 x_2 + c_3 x_3 + c_4 x_4$$

where *ci* is the price of the components.

The results of the physical and mechanical properties of vulcanizates are given in Table 2.

Currently, traditional components – white carbon black and PN-6Sh oil, which are purchased abroad – are used to manufacture rubber seals for hydraulic seals at ECO-Shina LLC (Shymkent). The cost of white carbon black is 1850 tenge per unit, and PN-6Sh oil is 100 tenge per unit (Table 2). The price of one ton of rubber seals is 1.5 million tenge.

Mathematical modeling was performed using the Statistica 10.0 program, designed for statistical analysis and processing of experimental data. The program provides a wide range of tools for regression analysis, variance analysis (ANOVA), correlation analysis, and data visualization. In scientific and engineering research, Statistica is used to identify dependencies between variables, optimize compositions, and assess the influence of factors on output parameters [20]. Figures 3-5 show the results of modeling the «composition – cost» dependence of components, as well as the dependence of the physical and mechanical properties of rubber on the content and cost of the components of the rubber mixture.

Table 2 – Physical and mechanical properties of rubbers

Name of indicators	Standard according to TU 22.19.73-047-46028995-2018	Sample number					
		Proto type	1	2	3	4	5
Content of PN-6SH oil, m.p.		6	4	3	1	0	5
Content of organic part of oil sludge, m.p.		0	2	3	5	6	1
White carbon content, ppm		20	15	10	5	0	17
Zeolite content, ppm		0	5	10	15	20	3
Conditional strength, MPa	not less than 12.0	13,54	13,45	13,37	13,13	13,00	13,47
Relative elongation at break, %	not less than 350	420	420	422	425	425	422
Tear resistance, kN/m, not less than	not less than 40.0	53,96	53,21	52,30	52,06	51,21	53,15
Shore A hardness, conventional units, not less than	62 ± 5	60	60	60	59	59	60
Cost of each component (tenge/kg)	Unit price, tenge white carbon black = 1850 PN-6SH oil = 100 Zeolite = 102.60 OPOS = 15, 694						

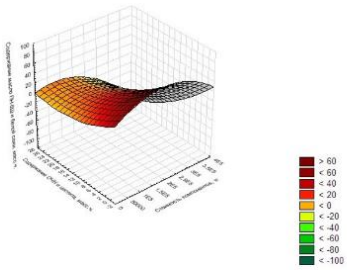


Figure 2 – Modeling the «composition – cost» relationship of rubber compound components

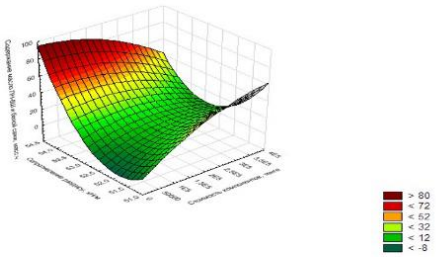


Figure 3 – Mathematical modeling of the dependence of the physical and mechanical properties of rubber on the content and cost of white carbon black and PN-6Sh oil

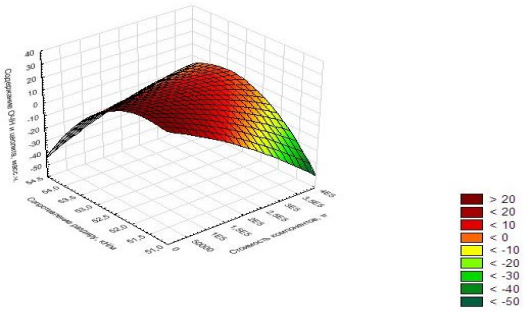
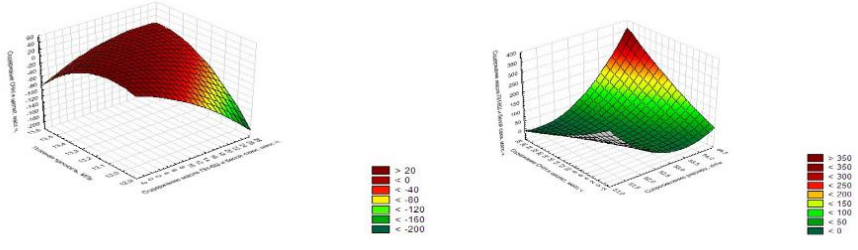


Figure 4 – Mathematical modeling of the dependence of the physical and mechanical properties of rubbers on the content and cost of OPOS and zeolites



a b

Figure 5 – Results of modeling the physical and mechanical properties of rubbers obtained using the 40℃×25 min mode: a – Conditional strength, MPa; b – Tear resistance, kN/m

This paper proposes replacing PN-6Sh oil with an organic component of oil sludge, and white carbon black with natural zeolite from the Chankanai deposit. The cost of the new raw material is 102.60 + 15.694 tenge per unit, while the cost of the traditional formulation is 1850 + 100 tenge per unit. Thus, the proposed formulation is significantly cheaper than the traditionally used one (Figures 2-4).

Figure 5 shows the results of modeling the physical and mechanical properties of rubbers depending on the content of OPOS and zeolite.

Analysis of the data in Figure 5 and Table 2 demonstrates that the performance characteristics of the experimental rubber samples are largely comparable with those of the reference (serial) compound, and in certain cases even surpass them. For instance, the nominal tensile strength (Figure 5a) and tear resistance (Figure 5b) under optimal vulcanization conditions (20 minutes) show values that are nearly equivalent to, or slightly higher than, those of the standard formulation. This effect can be attributed to the fine dispersion of zeolite particles, which, when evenly distributed within the polymer matrix, enhance interfacial interaction and consequently improve the mechanical performance of the compound.

It is noted that the elongation at break (Table 2) of the standard vulcanizate and sample № 1 was about 420%, while the experimental samples (No. 2-5) showed slightly higher values – 422-425%. This indicates that the modified rubber compounds are characterized by increased elasticity and are able to withstand large deformation until destruction. The slight increase in the indicator is probably due to the introduction of OPOS and zeolite from the Changkanai deposit, which improve the flexibility of the material by changing the structure of the polymer matrix.

The best physical and mechanical characteristics of rubbers intended for sealing hydraulic seals were achieved at a content of 6.0 wt. % OPOS and 20.0 wt. % of zeolite per 100 wt. % of rubber.

Thus, even small differences in composition indicate the positive effect of the proposed modifications, which increase the stretchability of the material without significantly reducing other mechanical properties.

Quantitative analysis shows that the incorporation of natural zeolite and oil-refining waste leads to an improvement of 1-3% in elongation at break and up to 2-4% in tensile strength relative to the conventional reference formulation. These changes, although moderate, demonstrate a measurable reinforcing effect attributed to the synergistic interaction between OPOS and the finely dispersed zeolite filler.

Among the evaluated approaches, the most effective was the optimization of composition by varying the content of zeolite and OPOS. The formulation containing 6 wt.% OPOS and 20 wt.% zeolite demonstrated the best balance of strength and elasticity. When transferred to industrial-scale production, this optimization strategy remains applicable and stable because it does not require modification of processing equipment and relies solely on adjusting the proportions of standard raw materials. The technological operations-mixing, molding, and vulcanization-retain their reproducibility, ensuring consistent mechanical properties across large production batches.

Conclusion

Based on the conducted research, a mathematical basis was formed for determining the optimal composition of rubber compounds. Unlike traditional methods, the developed model takes into account the use of non-traditional components: the organic part of oil sludge (OPOS) and natural zeolite of local origin. Their introduction was examined not only as a means of resource utilization, but also as an effective factor in optimizing the course of vulcanization and improving the performance profile of elastomeric materials.

The integration of these additives has demonstrated tangible benefits. Rubber composites obtained under such conditions exhibit superior resistance when exposed to oil-containing environments, maintain stable elasticity and mechanical strength during operation, and show reduced dependency on costly polymer fractions. Also, simplification of the production cycle helps to reduce technological operations, which in turn leads to lower costs.

Thus, the developed mathematical model for selecting the optimal rubber formulation can be considered as a universal tool with practical value for industrial applications. It allows us to simultaneously solve the problems of improving the performance characteristics of materials and reducing the cost of production, and also serves as a methodological basis for further fundamental research in the field of polymer science and elastomer technology.

References

1. Akhmadiev F.G. Mathematical modeling and optimization of «composition-property» of multicomponent mixtures [Matematicheskoye modelirovaniye i optimizatsiya «sostav-svoystvo» mnogokomponentnykh smesey] / F.G. Akhmadiev, R.M. Gilfanov // Izvestiya KSUACE. – 2012. – № 2(20). – P. 289-296.
2. Natural and synthetic rubber/waste – Ethylene-Vinyl Acetate composites for sustainable application in the footwear industry / D. Lopes et al // J Clean Prod. – 2015. – № 92. – P. 230-236. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.12.063.
3. Progress in Rubber Nanocomposites / KS Sisanth et al // Woodhead Publishing, Cambridge, UK. – 2017. – P.1-39.
4. The fabrication and properties of natural rubber-clay nanocomposites / SC George et al // Polym Test. 2016. – Vol. – 51. – P. 165-173. https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2016.03.010.
5. Sushkevich V.L. Synthesis of isoprene from formaldehyde and isobutene over phosphate catalysts / V.L. Sushkevich, V.V. Ordomsky, I.I. Ivanova **//** Appl Catal A-Gen. – 2012. – Vol. 441-442. – P. 21-29. https://doi.org/10.1016/j.apcata.2012.06.034.
6. Modeling the optimal composition of a rubber mixture using industrial waste [Modelirovaniye optimal'nogo sostava rezinovoy smesi s ispol'zovaniyem promyshlennykh otkhodov] / M.B. Abilev et al // Bulletin of KazNU. Chemical series. – 2020. – № 4. – P.12-25. https://doi.org/10.15328/cb1176.
7. Uddin M.S. Multiscale modeling of a natural rubber: Bridging a coarse-grained molecular model to the rubber network theory / M.S. Uddin, J. Ju // Polymer. – 2016. – Vol 101. – P. 34-47. https://doi.org/10.1016/j.polymer.2016.08.037.
8. Alimardani M. Prediction of mechanical and fracture properties of rubber composites by microstructural modeling of polymer-filler interfacial effects / M. Alimardani, M. Razzaghi-Kashani, M.H.R. Ghoreishy // Mater Des. – 2017. – Vol. 115. – P. 348-354. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.11.061.
9. Nguyen Q.T. The modelling of nonlinear rheological behaviour and Mullins effect in High Damping Rubber / Q.T. Nguyen, V. Tinard, C. Fond // Int J Solids Struct. – 2015. – Vol. 75-76. – P. 235-246. https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2015.08.017.
10. Temperature and filler effects on the relaxed response of filled rubbers: Experimental observations on a carbon-filled SBR and constitutive modeling / C. Ovalle Rodas et al // Int J Solids Struct. – 2015. – Vol. 58. – P. 309-321. https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2014.11.001.
11. Experimental investigation and theoretical modelling of induced anisotropy during stress-softening of rubber / G. Marckmann et al // Int J Solids Struct. – 2016. – Vol. 97-98. – P. 554-565. https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2016.06.028.
12. Experiment and modeling of uniaxial tension fatigue performances for filled natural rubbers / W-B Shangguan et al // Mater Des. – 2014. – Vol. 58. – P. 65-73. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.01.035.
13. Mathematical Modeling of the Reliability of Polymer Composite Materials / M.E. Isametova et al // Mathematics. – 2022. – Vol. 10. – P. 3978. https://doi.org/10.3390/math10213978.
14. Khassankhodzhayeva B.Sh. Study of the possibility of using the organic component of oil sludge in the formulation of rubber seals [Issledovaniye vozmozhnosti primeneniya organicheskogo komponenta nefteshlama v retsepture rezinovykh uplotneniy] / B.Sh. Khassankhodzhayeva, G.F. Sagitova, A.N. Tileuberdi // Oil and gas. – 2024. – № 6(144). – P. 267-280.
15. Patent of the Republic of Kazakhstan for utility model № 10461. Method for separating the organic part of oil sludge [Sposob vydeleniya organicheskoy chasti nefteshlama]. Khassankhodjayeva B.Sh., Sagitova G.F. 2025/0234.2 dated 17.02.2025.
16. TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF RUBBER COMPOUNDS FOR HYDRAULIC SEALS (Part 1) / Khassankhodzhayeva B.Sh. et al // Technological properties of rubber compounds for hydraulic seals (part 1). Chem. J. Kaz. – 2025. – № 1(89). – P. 59-68. https://doi.org/10.51580/2025-1.2710-1185.06.
17. Physical and mechanical properties of rubbers for sealing water seals (Part 2) [Fiziko-mekhanicheskiye svoystva rezin dlya uplotneniy gidrozatvorov (Chast' 2)] / B.Sh. Khassankhodzhayeva et al // Bulletin of Shakarim University. Technical sciences. – 2025. – № 2(18). – P. 379-388.
18. Modification of tyre rubber crumb with wastes of plant oil production / G.N. Kalmatayeva et al // Advances in Polymer Technology. – 2023. – Vol. 2023. – P. 1-8. https://doi.org/10.1155/2023/6889286.

19. Modified Bitumen Materials from Kazakhstani Oilfield / G.F. Sagitova et al // Advances in Polymer Technology. – 2024. – Vol. 2024. – P. 1-10. https://doi.org/10.1155/2024/8078021, P.1-10.
20. Mathematical approach to solving the problem of waste-free processing of metallurgical wastes / A. Tileuberdi et al // Polish Journal of Environmental Studies – Olsztyn, Poland. – 2024. – Vol. 33, Issue 4. – P. 5887-5892. https://doi.org/10.15244/pjoes/183431.

Б.Ш. Хасанходжаева[1], Г.Ф. Сагитова[1*], Г.А. Такибаева[1], С.Ж. Егембердиева[2], А.Т. Кабылбекова[3]
[1]М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті,
160012, Казахстан Республикасы, Шымкент қ., Тауке хан даңғылы, 5
[2]Аймақтық инновациялық университет,
160000, Қазақстан Республикасы, Шымкент қ. Рысқұлов көшесі, 27/2,
[3]Мирас университеті,
160000, Қазақстан Республикасы, Шымкент қ., Сапақ Датка, 2

ФИЗИКА-МЕХАНИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН БАҒАЛАУДЫ ЕСКЕРЕ ОТЫРЫП, ӘЗІРЛЕНГЕН РЕЗИНА ҚОСПАЛАРЫНЫҢ РЕЦЕПТІН ОҢТАЙЛАНДЫРУ

Резина қоспаларының құрамын оңтайландыру – бұл қолданылатын компоненттердің әртүрлілігіне және олардың арасындағы күрделі қатынастарға байланысты күрделі және көп факторлы процесс. Оңтайлы рецептті таңдау үшін бірқатар эксперименттік зерттеулер жүргізу уақытты, шикізатты және зертханалық ресурстарды қажет етеді. Бұл жұмыста резина қоспаларының қасиеттерін болжауға және олардың оңтайлы құрамын анықтауға мүмкіндік беретін математикалық модельдеу әдістерін қолдануға негізделген тәсіл ұсынылған. Табиғи цеолит пен мұнай өңдеу қалдықтарын модификациялаушы қоспалар ретінде пайдалануға ерекше назар аударылады. Бұл өндірістің тиімділігі мен экологиялық тазалығын арттыруға ықпал етеді. Қоспалар ретінде мұнай шламының органикалық фракциясы және Шанқанай кен орнының цеолиті пайдаланылды. Бастапқы ақпарат негізінде ең кіші квадраттар әдісімен барабар математикалық модельдер құруға мүмкіндік беретін эксперименттер жоспары жасалды. Бұл модельдер пайдалану қасиеттері мен экономикалық көрсеткіштердің қоспаның компоненттік құрамына тәуелділігін сипаттайды. Алынған модельдер негізінде оңтайландыру міндеті тұжырымдалды. Оның ерекшеліктері зерттелді және шешудің ең тиімді әдісі таңдалды. Ұсынылған тәсілдің тиімділігі резина қоспасының оңтайлы құрамын таңдау мысалында көрсетілген. Резина қоспаларының модификациясы майға төзімділігі жоғары, тұрақты серпімді және беріктік қасиеттері бар композициялық материалдарды алуға мүмкіндік береді. Бұл тәсіл қол жетімді шикізатты пайдалану және технологиялық процесті жеңілдету арқылы өндіріс шығындарын азайтуға көмектеседі. Резина қоспасының оңтайлы құрамын анықтаудың жобаланған есептеу моделін ғылыми зерттеулерде де, өнеркәсіптік тәжірибеде де эластомерлік композициялардың жаңа рецептін жасау кезінде де қолдануға болады.

Түйін сөздер: *көп компонентті қоспалар, гидравликалық тығыздағыштарға арналған резина қоспалары, оңтайландыру міндеті, шартты созылу беріктігі, құрамы-құны.*

Б.Ш. Хасанходжаева[1], Г.Ф. Сагитова[1*], Г.А. Такибаева[1], С.Ж. Егембердиева[2], А.Т. Кабылбекова[3]
[1]Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова,
160012, Республика Казахстан, г.Шымкент, пр.Тауке хана, 5
[2]Региональный инновационный университет,
160000, Республика Казахстан, г. Шымкент, ул. Рыскулова, 27/2,
[3]Университет Мирас,
160000, Республика Казахстан, г. Шымкент, Сапак Датка, 2

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЦЕПТУР РАЗРАБОТАННЫХ РЕЗИНОВЫХ СМЕСЕЙ С УЧЕТОМ ОЦЕНКИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Оптимизация состава резиновых смесей представляет собой сложный и многофакторный процесс, обусловленный разнообразием применяемых компонентов и сложными взаимосвязями между ними. Проведение серии экспериментальных исследований для подбора оптимальной рецептуры требует значительных затрат времени, сырья и лабораторных ресурсов. В данной работе предложен подход, основанный на применении методов математического моделирования, позволяющий прогнозировать свойства резиновых смесей и определить их оптимальный состав. Особое внимание уделено использованию природного цеолита и отходов нефтепереработки в качестве модифицирующих добавок, что способствует повышению эффективности и экологичности производства. В качестве добавок использованы органическая фракция

нефтешлама и цеолит Чанканайского месторождения. На основе априорной информации разработан план экспериментов, позволяющий построить адекватные математические модели методом наименьших квадратов. Эти модели описывают зависимость эксплуатационных свойств и экономических показателей от компонентного состава смеси. На основе полученных моделей сформулирована задача оптимизации, проведено исследование её особенностей и выбран наиболее эффективный метод решения. Эффективность предложенного подхода демонстрируется на примере подбора оптимального состава резиновой смеси. Модификация резиновых смесей позволяет получать композиционные материалы с повышенной маслостойкостью, стабильными эластичными и прочностными свойствами. Такой подход способствует снижению производственных затрат за счет использования доступного сырья и упрощения технологического процесса. Разработанная расчетная модель определения оптимального состава резиновой смеси может быть применена как в научных исследованиях, так и в промышленной практике при разработке новых рецептур эластомерных композиций.

Ключевые слова: *многокомпонентные смеси, резиновые смеси для уплотнений гидрозатворов, задача оптимизации, условную прочность при растяжении, состав – стоимость.*

Information about the authors

Bibi-Mariyam Khassankhojayeva – doctoral student of the department «Technology of inorganic and petrochemical industries» of M. Auezov South Kazakhstan university, Shymkent, Republic of Kazakhstan; e-mail: bibi-mariyam93@mail.ru. https://orcid.org/0000-0002-3568-2043.

Guzaliya Sagitova* – Candidate of technical sciences, associate professor of the department «Ecology» of M. Auezov South Kazakhstan university, Republic of Kazakhstan; e-mail: guzalita.f1978@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7913-7453.

Gulchekhra Abdurakhmanovna Takibayeva – Candidate of technical sciences, Docent at the Department of the Advanced Mathematics and Physics at M. Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Republic of Kazakhstan; e-mail: takibayevagulchekhra@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2663-0281.

Saltanat Yegemberdiyeva – PhD, Senior Lecturer, Regional Innovation University, Kazakhstan, Shymkent; e-mail: saltanat_2207@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7241-9762.

Aisulu Kabylbekova – Master's Degree, Senior Lecturer in the «Natural Sciences, Physical Education and Design» sector, Miras University, Republic of Kazakhstan; e-mail: aika_kabil@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4167-6800.

Авторлар туралы мәліметтер

Биби-Мариям Шераликызы Хасанходжаева – М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университетінің «Бейорганикалық және мұнай-химия өндірістерінің технологиясы» кафедрасының докторанты, Шымкент, Қазақстан Республикасы; e-mail: bibi-mariyam93@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3568-2043.

Гузалия Фаритовна Сагитова* – техника ғылымдарының кандидаты, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университетінің «Экология» кафедрасының профессоры, Шымкент, Қазақстан Республикасы; e-mail: guzalita.f1978@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7913-7453.

Гулчехра Абдурахмановна Такибаева – Техника ғылымдарының кандидаты, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университетінің «Математика және физика» кафедрасының доценті, Шымкент, Қазақстан Республикасы; e-mail: takibayevagulchekhra@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2663-0281.

Салтанат Жұмабековна Егембердиева – PhD, Аймақтық инновациялық университетінің аға оқытушысы Қазақстан, 160000, Шымкент; e-mail: saltanat_2207@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7241-9762.

Айсұлу Тенелханқызы Қабылбекова – магистр, «Жаратылыстану, дене шынықтыру және дизайн» секторының аға оқытушысы, Мирас университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: aika_kabil@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4167-6800.

Сведения об авторах

Биби-Мариям Шераликызы Хасанходжаева – докторант кафедры «Технология неорганических и нефтехимических производств» Южно-Казахстанского университета им. М. Ауэзова, Шымкент, Республика Казахстан; e-mail: bibi-mariyam93@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3568-2043.

Гузалия Фаритовна Сагитова* – кандидат технических наук, профессор кафедры «Экология» Южно-Казахстанского университета им. М. Ауэзова, Шымкент, Республика Казахстан; e-mail: guzalita.f1978@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7913-7453.

Гулчехра Абдурахмановна Такибаева – кандидат технических наук, доцент кафедры «Высшей математики и физики» Южно-Казахстанского университета им. М.Ауэзова, Шымкент, Республика Казахстан; e-mail: takibayevagulchekhra@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2663-0281

Салтанат Жұмабековна Егембердиева – PhD, старший преподаватель Регионального инновационного университета, г. Шымкент; e-mail: saltanat_2207@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7241-9762.

Айсулу Тенелхановна Кабылбекова – магистр, старший преподаватель сектора «Естественные науки, физическая культура и дизайн» Университет Мирас, Республика Казахстан; e-mail: aika_kabil@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4167-6800.

Received 06.10.2025
Revised 09.12.2025
Accepted 10.12.2025

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-73

ҒТАХР: 35.15.19

CC BY 4.0
Check for updates

Ш.Т. Султахан[1]*, Ә. Әбдісаттар[2], Қ. Тажу[2], А. Коробейник[3], С. Азат[1]
[1]Satbayev Univeristy,
050013, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Сатпаев к-сі, 22
[2]Жану проблемалары институтының,
Алматы қ., Бөгенбай батыр к-сі, 172
[3]Орхус тереңдетілген зерттеулер институты, Орхус университеті,
8000 Орхус С, Дания
*e-mail:shynggyskhan.1@gmail.com

ЭНЕРГИЯ САҚТАУ ҚҰРЫЛҒЫЛАРЫНЫҢ СЫЙЫМДЫЛЫҚ ӨНІМДІЛІГІН АРТТЫРУ ҮШІН MXENE МОДИФИКАЦИЯЛАУ ӘДІСТЕРІ

Аңдатпа: *Бұл шолу жұмысында екі өлшемді MXene материалдарын, ең алдымен $Ti_3C_2T_x$ және онымен байланысты қосылыстарды, суперконденсаторлар мен гибридті энергия сақтау құрылғыларында қолдану мақсатында олардың сыйымдылық сипаттамаларын арттыруға бағытталған заманауи модификациялау әдістері жан-жақты талданады және жүйеленеді. MXene материалдарының жоғары электрондық өткізгіштігі, қабатты құрылымы және химиялық белсенді беті оларды энергия жинақтау құрылғылары үшін перспективалы электродтық материалдар ретінде қарастыруға мүмкіндік береді. Алайда олардың практикалық қолданылуы қабаттардың қайта тығыздалуы, белсенді орталықтардың қолжетімділігінің шектелуі және ұзақ циклдік жұмыс барысында құрылымдық тұрақтылықтың төмендеуі сияқты бірқатар шектеулермен сипатталады. Осы шолу аясында MXene материалдарының электрохимиялық қасиеттеріне әсер ететін негізгі модификациялау стратегиялары, соның ішінде интеркаляциялау арқылы қабатаралық қашықтықты реттеу, беткі терминалдық топтардың функционализациясы, көміртекті наноматериалдармен және өтпелі металдардың оксидтерімен композиттер түзу, гетероатомды легирлеу, морфологиялық инженерия және әртүрлі кейінгі өңдеу әдістері қарастырылады. Аталған тәсілдердің иондық және электрондық өткізгіштікке, псевдоконденсация үлесіне және электрод материалдарының циклдік тұрақтылығына әсері салыстырмалы түрде бағаланады. Әдеби деректер негізінде меншікті сыйымдылық пен ұзақ мерзімді циклдік тұрақтылық көрсеткіштері бойынша жалпыланған талдау жүргізіліп, MXene негізіндегі электродтарды оңтайландыруға бағытталған практикалық ұсыныстар мен болашақ зерттеу бағыттары тұжырымдалады.*

Түйін сөздер: *MXene, суперконденсаторлар, энергия сақтау, беттік модификация, интеркаляция, псевдоконденсаторлар.*

1. Кіріспе

MXендер – $M_{n+1}X_nT_x$ жалпы формуласы бар екі өлшемді өтпелі металл карбидтері мен нитридтерінің класы, мұндағы M – ерте өтпелі металл (Ti, V, Nb, Mo және т.б.), X – C және/немесе N, ал Tx – беттік функционалдық топтар, негізінен –O, –OH және –F. MAX фазаларын селективті өңдеу және қабатты MXендерді дайындау бойынша алғашқы

©Ш.Т. Султахан, Ә. Әбдісаттар, Қ. Тажу, А. Коробейник, С. Азат, 2026

зерттеулерден бастап, бұл материалдар металл электр өткізгіштігінің, үлкен меншікті беттік ауданының және жоғары беттік химиялық белсенділіктің үйлесіміне байланысты айтарлықтай назар аударды [1-3]. Кейінгі зерттеулер MXeндердің электрлік қос қабатты және беттік псевдоконденсация механизмдерінің үйлесімі арқылы зарядты тиімді сақтауға қабілетті екенін көрсетті, бұл оларды классикалық көміртекті электрод материалдарынан ерекшелендіреді [4, 5].

Энергия сақтау құрылғылары тұрғысынан MXene-дер белсендірілген көмірлер мен өтпелі металл оксидтеріне перспективалы балама және толықтырушы болып саналады, себебі олар салыстырмалы түрде төмен ішкі кедергісі бар жоғары меншікті және көлемдік сыйымдылықты көрсетеді [2, 6, 8]. Эксперименттік зерттеулер MXene электродтарының массалық жүктеменің артуымен де жоғары жылдамдықты сипаттамаларды сақтай алатынын көрсетті, бұл практикалық суперконденсаторлар мен гибридті энергия сақтау құрылғылары үшін өте маңызды [5, 7]. Дегенмен, түпнұсқа MXene-дер бірқатар шектеулерге ұшырайтыны анықталды, соның ішінде қабатты қайта қабаттау, белсенді орындарға шектеулі қол жетімділік және ұзақ мерзімді цикл кезінде электрохимиялық қасиеттердің нашарлауы [8-10].

Соңғы жылдары осы шектеулерді жеңу үшін MXene-ді мақсатты түрде модификациялауға айтарлықтай жүргізілді. Аса мән беріліп зерттелген тәсілдер – интеркаляция стратегиялары, терминалды беттік топтарын басқару, көміртекті наноматериалдармен, өтпелі металдардың оксидтерімен және гидроксидтерімен композиттерді қалыптастыру, сондай-ақ үш өлшемді архитектуралар мен гибридті құрылымдарды жасау [11-15]. Бұл шолудың мақсаты – MXene негізіндегі электродтардың меншікті сыйымдылығын, жылдамдық сипаттамаларын және циклдік тұрақтылығын арттыру механизмдеріне назар аудара отырып, осы тәсілдерді жүйелеу және сыни талдау, сондай-ақ одан әрі зерттеулер үшін ең перспективалы бағыттарды анықтау.

1. MXene қабатаралық кеңістігін интеркаляция стратегиялары және реттеу

Интеркаляция MXene электрохимиялық өнімділігін жақсартудың ең іргелі және кеңінен қолданылатын тәсілдерінің бірі болып табылады, себебі ол қабаттар аралық кеңістікке, белсенді беттің қолжетімділігіне және ион тасымалдау кинетикасына тікелей әсер етеді [11, 16-18]. Бастапқы күйде MXene қабаттары, атап айтқанда $Ti_3C_2T_x$, күшті ван-дер-Ваальс және электростатикалық өзара әрекеттесулерге байланысты тығыз орналасады, бұл қайта жиналуға және электролитке қолжетімді тиімді беттік ауданның азаюына әкеледі [4, 8].

Алифатты аминдерді, беттік белсенді заттарды және полимер тізбектерін қолдана отырып, органикалық интеркаляциялау MXene қабатаралық кеңістігін кеңейтудің алғашқы әдістерінің бірі болып табылады [9, 19]. Мұндай интеркалянттар кеңістіктік аралық ретінде әрекет етеді, қабаттар арасындағы қашықтықты арттырады және сольватталған иондардың диффузиясын жеңілдетеді. Бірқатар зерттеулер органикалық интеркаляциялау MXene электродтарының меншікті сыйымдылығын өзгертілмеген материалдармен салыстырғанда, әсіресе төмен және орташа ток тығыздығында 30-60%-ға арттыра алатынын көрсетті [9, 19, 29]. Дегенмен, органикалық құрамы жоғары болған кезде электрондық өткізгіштіктің нашарлауы және көлемдік сыйымдылықтың төмендеуі мүмкін, бұл бұл тәсілді массасы жоғары жүктемесі бар электродтарда қолдануды шектейді.

Li^+, Na^+, K^+, Mg^{2+} және Zn^{2+} иондарын енгізуге негізделген бейорганикалық интеркаляция сулы және сусыз электролиттер бар жүйелерде кең таралған (Сурет 1) [11, 16, 18]. Мұндай жүйелерде интеркаляцияланған иондар кеңейтілген қабатаралық кеңістікті тұрақтандырып қана қоймай, сонымен қатар қайтымды беттік және квази-қабатаралық тотығу-тотықсыздану процестеріне қатысады, бұл псевдоконденсацияның үлесін арттырады [5, 18]. Оңтайлы электрохимиялық сипаттамаларға иондардың мөлшері мен сольватация дәрежесін MXene қабатаралық қашықтығымен сәйкестендіру арқылы қол жеткізілетіні, ал құрылымның шамадан тыс кеңеюі электродтың механикалық тұрақтылығының төмендеуіне әкелуі мүмкін екені анықталды [11, 16].



Сурет 1 – MXene қабаттарын интеркаляциялау процессі

MXene қабатаралық кеңістігіне қатты бейорганикалық немесе органикалық-бейорганикалық «тіректер» енгізіліп, кеңейтілген құрылымды бекітетін «тіректер» деп аталатын тәсілдер ерекше қызығушылық тудырады [14, 16]. Мұндай материалдар ұзақ мерзімді цикл және жоғары ток тығыздығы кезінде қайта қабаттастыруға төзімділіктің жоғарылауын және тұрақты электрохимиялық сипаттамаларды көрсетеді. Жалпы, интеркаляция стратегиялары MXene-нің меншікті сыйымдылығы мен жылдамдық сипаттамаларын арттырудың тиімді құралы болып табылады, бірақ ең жақсы нәтижелерге электродтардың өткізгіштігі мен беріктігін бір мезгілде арттыруға мүмкіндік беретін көміртекті композиттер немесе бақыланатын беттік функционализация сияқты басқа модификациялау әдістерімен біріктірілген кезде қол жеткізіледі.

2. MXene терминалдық тобын басқару және беттік химия

MXen беттік терминалдық топтары (–O, –OH, –F және олардың комбинациялары) материалдардың электрохимиялық қасиеттерін қалыптастыруда маңызды рөл атқарады, себебі олар MXen электролитпен әрекеттесу сипатын, Ферми деңгейінің энергетикалық орнын және псевдоконденсацияның заряд жинақталуының жалпы механизміне қосқан үлесін анықтайды [1, 4, 7]. Көміртекті электрод материалдарынан айырмашылығы, MXen-де қайтымды тотығу-тотықсыздану процестері тек бетінде ғана емес, сонымен қатар бетке жақын және қабатаралық аймақтарда да жүреді, бұл терминалдық топтардың химиялық сипатына тікелей байланысты [5, 8].

Көптеген MXendер MAX фазаларын фтор құрамды реагенттермен өңдеу арқылы синтезделеді, нәтижесінде материалдардың беті –F терминалдарымен байытылады [6, 7]. Фтор құрамды топтар MXen қабаттарына құрылымдық тұрақтылықты қамтамасыз еткенімен, көптеген зерттеулер олардың жоғары мөлшері электрон өткізгіштігінің төмендеуіне және беттің электрохимиялық белсенділігінің төмендеуіне әкелетінін көрсетеді [18, 20-25]. Атап айтқанда, –F терминалдарын оттегі құрамды топтармен алмастыру меншікті сыйымдылықтың артуына және электродтардың ішкі кедергісінің төмендеуіне ықпал ететіні көрсетілген. [25].

Жұмсақ термиялық өңдеу, көп сатылы сулы және сілтілі жуулар және химиялық тотықсыздандыру MXene терминалдық құрамын бақылаудың ең көп таралған әдістері болып табылады [6,18]. Бірқатар зерттеулер –O және –OH терминалдарының үлесін арттыру H_2SO_4 және KOH сияқты сулы электролиттерде MXene-нің меншікті сыйымдылығының артуына және циклдік тұрақтылығының жақсаруына әкелетінін көрсетті [5, 18, 26]. Дегенмен, беттік тотығудың шамадан тыс болуы зарядтың берілуіне төзімділіктің артуына және кеңейтілген потенциал терезесімен құрылымның тез бұзылуына әкелуі мүмкін. [21].

MXene бетінің химиясын басқарудың қосымша тәсілі - сульфонат, карбоксил және амин бөліктерін қоса алғанда, органикалық иондық немесе тотығу-тотықсыздану-белсенді топтармен мақсатты функционализациялау [20, 21]. Мұндай модификациялар псевдоконденсация үлесін арттырып, электродтардың электролитпен суланuын жақсарта алады, бірақ функционализация дәрежесін қатаң бақылауды талап етеді. Беттің органикалық топтармен шамадан тыс жабылуы өткізгіш жолдардың экрандалуына және жылдамдық сипаттамаларының төмендеуіне әкеледі, бұл химиялық белсенділік пен электрондық өткізгіштік арасындағы ымыраға келу қажеттілігін көрсетеді.

Осылайша, MXene терминалдық құрамын оңтайландыру сыйымдылық өнімділігін жақсартудың ең тиімді, бірақ нәзік құралдарының бірі болып табылады. Ең перспективалы тәсілдер – терминалдардың –F құрамын азайтуды, MXene жоғары өткізгіштігін сақтауды және ұзақ мерзімді цикл кезінде құрылымдық тұрақтылықты біріктіретін тәсілдер, бұл көптеген эксперименттік зерттеулердің нәтижелерімен расталады [27].

3. MXene-көміртекті композиттер: графен, rGO және көміртекті нанотүтікшелер

Көміртекті наноматериалдармен MXene композиттерін қалыптастыру электродтардың электрохимиялық өнімділігін арттырудың ең тиімді стратегияларының бірі болып саналады, бұл қайта қабаттасу процесін басу, электрон өткізгіштігін жақсарту және цикл кезінде құрылымды тұрақтандыру арқылы жүзеге асырылады [28-31]. Мұндай жүйелерде көміртегі фазасы өткізгіш матрица және кеңістіктік аралық ретінде әрекет етеді, ал MXene псевдоконденсация мен көлемдік сыйымдылықтың жоғары үлесін қамтамасыз етеді [32-34].

MXene/графен және MXene/rGO композиттері көміртегі фазасының жоғары меншікті бетінің ауданы мен MXene тотығу-белсенді бетінің үйлесуіне байланысты айқын синергетикалық әсер көрсетеді [9, 19, 35]. Графенді немесе тотықсыздандырылған графен

оксидін енгізу MXene қабатаралық қашықтығының артуына және үздіксіз перколяция желісінің пайда болуына әкелетіні, бұл зарядтың берілуіне кедергінің төмендеуіне және жылдамдық сипаттамаларының жақсаруына ықпал ететіні көрсетілген [9, 37]. Бірқатар зерттеулерде жоғары циклдік тұрақтылықты сақтай отырып (10 000 циклден кейін >95%), MXene/rGO композиттерінің меншікті сыйымдылығының бастапқы MXene-мен салыстырғанда 40-70%-ға артқаны туралы айтылады [38-40].

Көміртекті нанотүтікшелерді (КНТ) пайдалану MXene парақтары біркелкі таралған және электрлік өзара байланысты үш өлшемді өткізгіш қаңқаларды қалыптастыруға мүмкіндік береді [41]. Жалпақ графен құрылымдарынан айырмашылығы, КНТ нүктелік және сызықтық байланыстарды қамтамасыз етеді, бұл әсіресе массасы жоғары жүктемесі бар көлемді электродтарда тиімді. Тәжірибелік деректер MXene/КНТ композиттерінің таза MXene қабықшаларымен салыстырғанда көлемдік сыйымдылығының артуымен және механикалық тұрақтылығының жақсаруымен сипатталатынын көрсетеді [10, 41].

Көміртекті нанотүтікшелерді (КНТ) пайдалану MXene парақтары біркелкі таралған және электрлік өзара байланысты үш өлшемді өткізгіш қаңқаларды қалыптастыруға мүмкіндік береді [42]. Жалпақ графен құрылымдарынан айырмашылығы, КНТ нүктелік және сызықтық байланыстарды қамтамасыз етеді, бұл әсіресе массасы жоғары жүктемесі бар көлемді электродтарда тиімді. Тәжірибелік деректер MXene/КНТ композиттерінің таза MXene қабықшаларымен салыстырғанда көлемдік сыйымдылығының артуымен және механикалық тұрақтылығының жақсаруымен сипатталатынын көрсетеді [43, 44].

Жалпы алғанда, MXene-көміртекті композиттер технологиялық тұрғыдан жетілген саланы білдіреді, көптеген зерттеулердің нәтижелерімен расталғандай, вакуумдық сүзу, пленка құю, престеу және басып шығару технологияларын қоса алғанда, масштабталатын электрод түзу әдістерімен жақсы үйлеседі [45-48].

4. Өтпелі металл оксидтері мен гидроксидтері бар MXene композиттері

MXene-ді өтпелі металл оксидтерімен және гидроксидтерімен (MnO_2, RuO_2, $Ni(OH)_2$, Co_3O_4 және т.б.) біріктіру Фарадейдің заряд жинақталуына қосқан үлесін арттыру арқылы меншікті сыйымдылықты арттырудың тиімді стратегиясы болып табылады [23, 24, 39, 40]. Мұндай гибридті жүйелерде MXene жоғары өткізгіш субстрат және ток өткізгіш қаңқа ретінде жұмыс істейді, электрондардың жылдам тасымалдануын қамтамасыз етеді, ал оксид немесе гидроксид фазасы қайтымды беттік тотығу-тотықсыздану процестеріне байланысты негізгі үлес қосады [4, 42].

Бірқатар зерттеулер MXene парақтарының бетіне MnO_2 немесе RuO_2 нанобөлшектерінің біркелкі тұндырылуы сулы электролиттерде қанағаттанарлық жылдамдық сипаттамаларын сақтай отырып, 400–600 F/g немесе одан да көп меншікті сыйымдылыққа қол жеткізуге мүмкіндік беретінін көрсетті [39, 40]. Дегенмен, көміртекті композиттермен салыстырғанда, мұндай материалдар ток тығыздығының артуымен сыйымдылықтың айқын төмендеуін көрсетеді, бұл оксид фазаларының шектеулі ішкі өткізгіштігімен және тотығу-тотықсыздану процестерінің кинетикалық шектеулерімен байланысты [18, 42].

MXene-оксидті композиттердің тиімділігін анықтайтын негізгі параметр – белсенді фазаның морфологиясы мен таралуын бақылау. MXene бетіне біркелкі бекітілген, 10-20 нм-нен кіші нанобөлшектер жоғары тотығу-тотықсыздану белсенділігі мен өткізгіш жолдардың сақталуы арасындағы оңтайлы тепе-теңдікті қамтамасыз етеді [23, 39]. Әйтпесе, оксид агломерациясы кеуектердің бітелуіне, зарядтың берілуіне төзімділіктің жоғарылауына және цикл кезінде электрохимиялық сипаттамалардың тез бұзылуына әкеледі.

MXene-оксид жүйелерінің беріктігін шектейтін қосымша фактор – көлемдік кеңею коэффициенттері мен компоненттердің электрохимиялық жұмыс жағдайларындағы айырмашылықтардан туындаған MXene-оксид интерфейсінің механикалық және химиялық тұрақсыздығы [24, 42]. Тұрақтылықты жақсарту үшін фазалардың химиялық байланысына, градиент интерфейстерінің пайда болуына немесе аралық көміртекті қабаттарды пайдалануға негізделген тәсілдер ұсынылды, бұл гибридті электродтардың циклдік тұрақтылығын айтарлықтай жақсарта алады [49, 42].

5. Өткізгіш полимерлер қосылған MXene композиттері

MXene-ді полианилин (PANI), полипиррол (PPy) және политиофен сияқты өткізгіш полимерлермен біріктіру полимер фазасының қайтымды тотығу-тотықсыздану түрленулерімен және псевдоконденсацияның маңызды үлесіне байланысты меншікті сыйымдылықты арттырудың тиімді стратегиясы болып табылады [5, 21, 36, 50]. Мұндай

гибридті жүйелерде MXene жоғары өткізгіш субстрат және механикалық тұрақты қаңқа ретінде әрекет етеді, электрондардың тиімді тасымалдануын және полимер жабынының біркелкі өсуін қамтамасыз етеді [5, 36].

Тәжірибелік деректер MXene/PANI және MXene/PPy композиттерінің сулы электролиттерде 500-700 Ф/г асатын меншікті сыйымдылықты көрсете алатынын көрсетеді, бұл таза MXene немесе көміртекті материалдарға тән мәндерден айтарлықтай жоғары [36]. Бастапқы жоғары сыйымдылық MXene бетінің псевдоконденсациясы мен полимер фазасындағы көлемдік тотығу-тотықсыздану процестерінің үйлесіміне байланысты. Дегенмен, ток тығыздығының артуымен және ұзақ мерзімді циклдармен мұндай жүйелер көбінесе сыйымдылықтың жеделдетілген төмендеуін көрсетеді. Әртүрлі өткізгіш полимерлерді қолдану композиттердің жұмыс тұрақтылығына әрқилы әсер етеді. Полианилин негізіндегі жүйелер, әдетте, жоғары бастапқы меншікті сыйымдылықпен сипатталғанымен, көлемдік деформациялардың айқындылығына байланысты ұзақ мерзімді циклдеу кезінде деградацияға бейім келеді [43]. Полипирролмен модификацияланған MXene композиттері салыстырмалы түрде жақсы циклдік тұрақтылықты көрсетеді, ал политиофен және оның туындылары механикалық және химиялық тұрақтылығы жоғары, бірақ псевдоконденсациялық үлесі төмен жүйелер ретінде сипатталады.

MXene-полимер электродтарының ыдырауының негізгі факторы - зарядтау-разрядтау кезіндегі көлемдік өзгерістермен, сондай-ақ MXene-полимер интерфейсіндегі электрлік байланыстың нашарлауымен байланысты өткізгіш полимерлердің механикалық тұрақсыздығы [21, 43]. Бірқатар зерттеулер ультра жұқа полимер қабаттарының, наносымдардың немесе градиенттік жабындардың пайда болуы бұл кемшіліктерді ішінара өтей алатынын және композиттердің циклдік тұрақтылығын айтарлықтай арттыра алатынын көрсетті [36]. Өткізгіш полимерлері бар MXene композиттері икемді және киілетін энергия сақтау құрылғыларын қоса алғанда, орташа беріктік талаптары бар жоғары меншікті сыйымдылық басымдық болып табылатын қолданбалар үшін электрод материалдарының перспективалы класын білдіреді. Жақында жүргізілген зерттеулердің нәтижелері көрсеткендей, бұл жүйелердің практикалық қолданылуы үшін максималды сыйымдылық пен циклдік тұрақтылық арасындағы мәмілеге келу маңызды болып қала береді [21,36]. Жалпы алғанда, өткізгіш полимерлері бар MXene композиттері жоғары меншікті сыйымдылықты қамтамасыз ете отырып, құрылымдық тұрақтылық пен ұзақ мерзімді жұмыс қабілеттілігі арасындағы ымыраға келуді талап ететін күрделі жүйелер болып табылады. Сондықтан бұл материалдардың практикалық қолданылуын кеңейту үшін полимер фазасының морфологиясын басқаруға, интерфейстік байланысты күшейтуге және композиттердің деградация механизмдерін терең түсінуге бағытталған зерттеулер өзекті болып қала береді.

6. MXene морфологиялық инженериясы және 3D архитектуралары

Үш өлшемді (3D) кеуекті архитектураларды қалыптастыруға бағытталған Mxene-дер морфологиялық инженериясы екі өлшемді пленкалы электродтардың диффузия және құрылымдық шектеулерін жеңудің негізгі жолы болып саналады [15-17, 27]. Тығыз қабатты құрылымдардан айырмашылығы, 3D архитектуралары иондар үшін диффузия жолдарының ұзындығын қысқартуды, ток тығыздығының біркелкі таралуын және жылдамдық сипаттамаларын айтарлықтай жоғалтпай белсенді материалдың жоғары массалық жүктемесіне қол жеткізу мүмкіндігін қамтамасыз етеді [16, 28].

Мұздатып кептіру, өздігінен жинау немесе химиялық көлденең байланыстыру арқылы алынған MXene аэрогельдері мен гидрогельдері өзара байланысты кеуекті желіні құрайды, онда MXene парақтары қайта қабаттасуларды азайтуға және белсенді беттерге электролиттердің тиімді қол жеткізуін қамтамасыз етуге бағытталған [15, 27]. Тәжірибелік деректер мұндай құрылымдардың жоғары гравиметриялық және көлемдік сыйымдылықты біріктіре алатынын көрсетеді, бұл практикалық суперконденсаторлар үшін өте маңызды [16, 38].

3D архитектураларының қосымша артықшылығы - олардың механикалық тұрақтылығының артуы және икемді және киілетін электрондық құрылғыларға интеграциялану мүмкіндігі [28, 38]. Дегенмен, мұндай құрылымдарды синтездеу көбінесе күрделі технологиялық процесспен және құнының артуымен қатар жүретінін атап өткен жөн, бұл олардың масштабталуын және өнеркәсіптік қолданылуын шектеуі мүмкін [48]. Осыған байланысты, бақыланатын кеуектілігі және тұрақты электрохимиялық сипаттамалары бар 3D

MXene архитектураларын қалыптастырудың жеңілдетілген және қайталанатын әдістерін әзірлеуге бағытталған зерттеулер өзекті болып қала береді.

Жалпы алғанда, морфологиялық инженерия және 3D құрылымды MXeндерді жасау MXene негізіндегі электрод материалдарын әзірлеудің ең перспективалы бағыттарының бірі болып табылады, бұл заманауи шолулар мен эксперименттік зерттеулердің нәтижелерімен расталғандай, жоғары сыйымдылықтың, жоғары жылдамдықты сипаттамалардың және беріктіктің тиімді үйлесімін қамтамасыз етеді [15, 16, 27, 48].

Біріктірілген тәсілдер ең жақсы нәтижелерді көрсетеді – интеркаляцияның, көміртекті композиттердің және бақыланатын функционализацияның үйлесімі қайта қабаттастыруды бір мезгілде шешуге, өткізгіштікті арттыруға және қосымша тотығу-тотықсыздану орталықтарын енгізуге мүмкіндік береді. Модификациялардың тиімділігін бағалаудың негізгі эксперименттік әдістеріне XRD (қабатаралық арақашықтық, фазалық құрам), SEM/TEM (морфология, аддитивті таралу), XPS/FTIR (терминалдық топ құрамы), адсорбция өлшемдері (меншікті бет ауданы, кеуектілік) және электрохимиялық әдістер (CV, GCD, EIS) жатады. In situ/operando әдістері (in situ XRD, in situ Raman, EQCM) интеркаляция динамикасы және циклдік тұрақтылық туралы ақпарат береді.

Негізгі практикалық ұсыныстар: 1) электролит иондарының мөлшері мен ерітіндісін ескере отырып, интеркалантты және оны енгізу әдісін таңдау; 2) жұмсақ жуу және тотықсыздандыру қадамдарын қолдана отырып, терминалдардың –F құрамын азайту; 3) перколяция желісін сақтау үшін өткізгіш полимерлер мен көміртекті қоспалардың массасын және таралуын оңтайландыру; 4) беріктікті бағалау үшін біріктірілген модификацияларды және in situ әдістерін қолдану; 5) масштабталатын өндіріске көшкен кезде әдістердің экологиялық тазалығы мен қауіпсіздігін ескеру (мүмкін болса, фтор құрамдас реагенттерсіз).

Негізгі қиындықтарға тотықтырғыш электролиттерде MXene тұрақтылығы, басылымдарда меншікті сыйымдылықты және масса тығыздығын бағалауды стандарттау және масштабталатын, қайталанатын және экологиялық таза синтез әдістерін әзірлеу жатады.

7. MXene негізіндегі электродтардың электрохимиялық сипаттамаларын салыстырмалы талдау

Әртүрлі MXene модификациялау стратегияларының тиімділігін объективті бағалау үшін әдебиетте меншікті сыйымдылық, энергия тығыздығы, жылдамдық сипаттамалары және циклдік тұрақтылық кеңінен қолданылады. 1-кестеде соңғы жылдары жарияланған ең өкілді зерттеулердің деректері жинақталған, онда MXene суперконденсаторлар мен гибридті энергия сақтау құрылғыларында белсенді электрод материалы ретінде пайдаланылды.

Кесте 1 – Энергия сақтау құрылғыларындағы MXene және MXene композиттерінің электрохимиялық сипаттамалары

№	Материал	Модификациия тәсілі	Элект-ролит	Сыйым-дылығы, Ф/г	Энергия тығыздығы, Вт·сағ/кг	Циклдық тұрақтылығы	Дерек-көз
1	$Ti_3C_2T_x$	Бастапқы MXene	1 M H_2SO_4	~245	8-10	90 % (5000 цикл)	[1]
2	$Ti_3C_2T_x$	Li^+-интеркаляция	1 M H_2SO_4	~320	11-13	92 % (8000 цикл)	[11]
3	$Ti_3C_2T_x$	Zn^{2+}-интеркаляция	2 M $ZnSO_4$	~340	14-16	95 % (10 000 цикл)	[18]
4	$Ti_3C_2T_x$/rGO	Композиттік	1 M KOH	~410	16-18	96 % (10 000 цикл)	[9, 22]
5	$Ti_3C_2T_x$/CNT	Композиттік	1 M Na_2SO_4	~380	15-17	97 % (12 000 цикл)	[10]
6	$Ti_3C_2T_x$/PANI	Өткізгіш полимер	1 M H_2SO_4	~520	18-21	82 % (5000 цикл)	[5]
7	$Ti_3C_2T_x/MnO_2$	Оксидтік композиттік	1 M Na_2SO_4	~460	17-20	90 % (8000 цикл)	[23]
8	$Ti_3C_2T_x/Ni(OH)_2$	Гидроксидтік композиттік	1 M KOH	~480	18-22	88 % (7000 цикл)	[4]
9	N-$Ti_3C_2T_x$	Гетероатомдық қоспалау	1 M H_2SO_4	~360	13-15	93 % (10 000 цикл)	[20]
10	$Ti_3C_2T_x$ аэрогель	3D-архитектура	1 M H_2SO_4	~390	15-18	95 % (10 000 цикл)	[16]

Ұсынылған деректер өткізгіш полимерлер мен өтпелі металл оксидтері бар MXene композиттерінде ең жоғары меншікті сыйымдылық мәндеріне қол жеткізілетінін көрсетеді; дегенмен, мұндай жүйелер көбінесе көміртегі мен 3D құрылымды материалдарға қарағанда циклдік тұрақтылығы төмен. Өз кезегінде, көміртекті композиттер мен MXene аэрогельдері сыйымдылық, өнімділік және беріктік арасындағы оңтайлы тепе-теңдікті қамтамасыз етеді, бұл оларды практикалық қолдану үшін ең перспективалы етеді.

8. Әрі қарай зерттеудің болашағы мен бағыттары

Энергия сақтау құрылғылары үшін MXene материалдарын модификациялаудағы айтарлықтай жетістіктерге қарамастан, бірқатар іргелі және қолданбалы мәселелер шешілмеген күйінде қалып отыр. Негізгі міндеттердің бірі – сулы және сусыз электролиттерде MXene-нің ұзақ мерзімді тұрақтылығын қамтамасыз ету, әсіресе кеңейтілген потенциал терезесі және белсенді материалдың жоғары массалық жүктемесі кезінде. Перспективалық бағыт – MXene синтезінің фторсыз және экологиялық таза әдістерін әзірлеу, бұл бастапқыда оңтайлы терминалдық беттік құрамды қалыптастыруға мүмкіндік береді.

Әрі қарайғы зерттеулердің маңызды аспектісі – зертханалық пленкалы электродтардан жоғары энергия мен қуат тығыздығы бар көлемді және масштабталатын архитектураларға көшу. Осыған байланысты, жоғары өткізгіштікті, механикалық тұрақтылықты және тұрақты электрохимиялық қасиеттерді біріктіретін 3D құрылымды MXenдер және олардың көміртекті материалдармен будандары ерекше қызығушылық тудырады.

Нақты жұмыс жағдайында MXen электродтарының интеркаляциясы мен ыдырау динамикасын зерттеуге мүмкіндік беретін in situ және operando әдістерін (in situ XRD, Raman спектроскопиясы, EQCM) қолдану арқылы қосымша мүмкіндіктер ұсынылады. Мұндай эксперименттік тәсілдерді теориялық модельдеумен біріктіру бейімделген электрохимиялық қасиеттері бар MXen материалдарын мақсатты түрде жобалауды айтарлықтай жеделдете алады.

Қорытынды

Осы шолу жұмысы энергия сақтау құрылғыларында қолдануға арналған MXene негізіндегі электрод материалдарын модификациялаудың заманауи тәсілдерін жүйелі түрде талдауға және олардың электрохимиялық өнімділікке әсерін салыстырмалы бағалауға арналған. Әдеби деректерді талдау MXene материалдарының, әсіресе $Ti_3C_2T_x$ негізіндегі жүйелердің, жоғары ток өткізгіштікке, қабатты құрылымға және беткі тотығу-тотықсыздану белсенділігіне байланысты суперконденсаторлар мен гибридті энергия сақтау құрылғылары үшін айтарлықтай әлеуетке ие екенін көрсетті. Сонымен қатар, бастапқы MXene материалдарының практикалық қолданылуы қабаттардың қайта тығыздалуы, иондардың белсенді орталықтарға қолжетімділігінің шектелуі және ұзақ мерзімді циклдеу кезінде құрылымдық тұрақтылықтың төмендеуі сияқты шектеулермен сипатталатыны анықталды. Осыған байланысты, MXene электрохимиялық қасиеттерін жақсартуға бағытталған модификация стратегиялары – интеркаляция арқылы қабатаралық қашықтықты реттеу, беттік терминалдық топтардың құрамын басқару, көміртекті наноматериалдармен, өтпелі металл оксидтерімен және өткізгіш полимерлермен композиттер түзу, сондай-ақ морфологиялық инженерия мен үш өлшемді архитектураларды қалыптастыру – негізгі зерттеу бағыттары ретінде қарастырылды.

Жалпыланған талдау көрсеткендей, ең жоғары меншікті сыйымдылық мәндеріне өткізгіш полимерлермен және өтпелі металл оксидтерімен модификацияланған MXene композиттерінде қол жеткізіледі, алайда бұл жүйелер көбінесе циклдік тұрақтылықтың төмендеуімен шектеледі. Өз кезегінде, көміртекті композиттер мен 3D құрылымды MXene материалдары сыйымдылық, жылдамдық сипаттамалары және ұзақ мерзімді беріктік арасындағы анағұрлым оңтайлы тепе-теңдікті қамтамасыз етеді, бұл оларды практикалық қолдану үшін перспективалы етеді. Ең тиімді нәтижелер интеркаляция, композиттік түзу және бақыланатын беттік функционализацияны біріктіретін кешенді тәсілдер арқылы алынатыны анықталды.

Алдағы зерттеулер үшін негізгі өзекті міндеттерге электрохимиялық сынау әдістерін стандарттау, нақты жұмыс жағдайларында MXene электродтарының деградация механизмдерін терең түсіндіру, сондай-ақ фторсыз, экологиялық таза және масштабталатын синтез технологияларын әзірлеу жатады. In situ және operando әдістерін қолдану интеркаляция динамикасын, заряд жинақталу механизмдерін және циклдік тұрақтылықтың

шектеуші факторларын анықтауға мүмкіндік беретін маңызды құрал ретінде қарастырылады. Осы бағыттар бойынша жүргізілетін кешенді зерттеулер MXene негізіндегі электрод материалдарының өнеркәсіптік энергия сақтау құрылғыларында кеңінен қолданылуына жол ашуы мүмкін.

Әдебиеттер тізімі

1. MXenes: A new family of two-dimensional materials / M. Naguib et al // Advanced Materials. – 2014. – Т. 26, № 7. – P. 992-1005.
2. Conductive two-dimensional titanium carbide clay with high volumetric capacitance / M. Ghidiu et al // Nature. – 2014. – Т. 516. – P. 78-81.
3. Transparent conductive two-dimensional titanium carbide epitaxial thin films / J. Halim et al // Chemistry of Materials. – 2014. – Т. 26, № 7. – P. 2374-2381.
4. Anasori B. 2D metal carbides and nitrides (MXenes) for energy storage / B. Anasori, M.R. Lukatskaya, Y. Gogotsi // Nature Reviews Materials. – 2017. – Т. 2. – № 16098.
5. Ultra-high-rate pseudocapacitive energy storage in two-dimensional transition metal carbides / M.R. Lukatskaya et al // Nature Energy. – 2017. – Т. 2. – № 17105.
6. Guidelines for synthesis and processing of two-dimensional titanium carbide ($Ti_3C_2T_x$ MXene) / M. Alhabeb et al // Chemistry of Materials. – 2017. – Т. 29, № 18. – P. 7633-7644.
7. MXenes: An introduction of their synthesis, select properties, and applications / L. Verger et al // Trends in Chemistry. – 2019. – Т. 1, № 7. – P. 656-669.
8. Gogotsi Y. The rise of MXenes / Y. Gogotsi, B. Anasori // ACS Nano. – 2019. – Т. 13, № 8. – P. 8491-8494.
9. Carbon-intercalated $Ti_3C_2T_x$ MXene for high-performance supercapacitors / L. Shen et al // Journal of Materials Chemistry A. – 2018. – Т. 6, № 46. – P. 23513-23520.
10. Flexible and conductive MXene films and nanocomposites with high capacitance / Z. Ling et al // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. – 2014. – Т. 111, № 47. – P. 16676-16681.
11. Pseudocapacitance of MXene nanosheets for high-power sodium-ion hybrid capacitors / X. Wang et al // Nature Communications. – 2015. – Т. 6. – № 6544.
12. Two-dimensional vanadium carbide MXene as positive electrode for sodium-ion capacitors / Y. Dall'Agnese et al // Journal of Physical Chemistry Letters. – 2015. – Т. 6, № 12. – P. 2305-2309.
13. Pseudocapacitive electrodes produced by oxidation of MXenes / M. Boota et al // Advanced Materials. – 2016. – Т. 28, № 7. – P. 1517-1522.
14. Pillared MXene with ultralarge interlayer spacing for enhanced sodium-ion storage / J. Luo et al // ACS Nano. – 2017. – Т. 11, № 3. – P. 2459-2469.
15. MXene hydrogels: fundamentals and applications / Y.Z. Zhang et al // Chemical Society Reviews. – 2020. – Т. 49, № 20. – P. 7229-7251.
16. Intercalation chemistry of MXenes for energy storage / H. Wang et al // Energy Storage Materials. – 2019. – Т. 17. – P. 119-129.
17. Nitrogen-doped MXene for enhanced supercapacitor performance / H. Shao et al // Electrochimica Acta. – 2019. – Т. 318. – P. 676-684.
18. Sulfur-doped MXene electrodes for high-performance supercapacitors / Y. Li et al // Journal of Power Sources. – 2020. – Т. 451. – № 227777.
19. $Ti_3C_2T_x$ MXene/graphene composites for high-performance energy storage / Y. Dong et al // Carbon. – 2017. – Т. 119. – P. 351-360.
20. All-MXene asymmetric supercapacitors / Y. Peng et al // Energy and Environmental Science. – 2016. – Т. 9. – P. 2847-2854.
21. High-temperature stability of MXenes / M. Seredych et al // Carbon. – 2019. – Т. 146. – P. 712-723.
22. Yu X. Electrode-electrolyte interfaces in MXene-based supercapacitors / X. Yu, A. Manthiram // Energy Storage Materials. – 2020. – Т. 29. – P. 368-382.
23. A non-aqueous asymmetric cell with a Ti_2C-based two-dimensional electrode / J. Come et al // Journal of the Electrochemical Society. – 2012. – Т. 159, № 8. – P. A1368-A1373.
24. Flexible MXene films for microsupercapacitors / C. Zhang et al // Advanced Functional Materials. – 2018. – Т. 28. – № 1705506.
25. Surface chemistry tuning of MXenes for electrochemical energy storage / S.J. Kim et al // ACS Applied Materials and Interfaces. – 2018. – Т. 10. – P. 2746-2756.

26. Layered $Ti_3C_2T_x$ MXene for supercapacitors / F. Liu et al // Journal of Materials Chemistry A. – 2017. – Т. 5. – P. 15983-15990.
27. Hollow MXene spheres and 3D frameworks for sodium-ion storage / M.Q. Zhao et al // Advanced Materials. – 2017. – Т. 29. – № 1702410.
28. Pillared MXene for high-rate electrochemical energy storage / H. Wang et al // Energy Storage Materials. – 2019. – Т. 17. – P. 14-22.
29. Additive-free MXene inks and direct printing of micro-supercapacitors / C. Zhang et al // Nature Communications. – 2019. – Т. 10. – № 1795.
30. El-Demellawi J.K. MXene-enabled electrochemical energy storage: synthesis, properties, and applications / J.K. El-Demellawi, L. McKeon, Y. Gogotsi // Advanced Energy Materials. – 2021. – Т. 11. – № 2003517.
31. Novel amperometric glucose biosensor based on MXene nanocomposite / R.B. Rakhi et al // Biosensors and Bioelectronics. – 2016. – Т. 83. – P. 42-47.
32. Xie Y. Hybrid density functional study of structural and electronic properties of MXenes / Y. Xie, P.R.C. Kent // Physical Review B. – 2013. – Т. 87. – № 235441.
33. Tang Q. Are MXenes promising anode materials for lithium-ion batteries? / Q. Tang, Z. Zhou, P. Shen // Journal of the American Chemical Society. – 2012. – Т. 134. – P. 16909-16916.
34. Electrochemical and in situ X-ray diffraction studies of $Ti_3C_2T_x$ MXene in ionic liquid electrolyte / Z. Lin et al // Electrochemistry Communications. – 2016. – Т. 72. – P. 50-53.
35. Electrochemical characterization of MXene electrodes using operando techniques / J. Come et al // Journal of Physical Chemistry Letters. – 2015. – Т. 6. – P. 2802-2807.
36. MXene–polymer nanocomposites for flexible energy storage devices / W.T. Cao et al // Advanced Functional Materials. – 2020. – Т. 30. – № 1907316.
37. MXene-based nanocomposites for supercapacitors / W. Zheng et al // Journal of Energy Chemistry. – 2021. – Т. 54. – P. 431-450.
38. High-performance flexible supercapacitors based on MXene composites / J. Zhang et al // Nano Energy. – 2019. – Т. 60. – P. 894-902.
39. All-pseudocapacitive MXene–RuO_2 asymmetric supercapacitors / Q. Jiang et al // Advanced Energy Materials. – 2018. – Т. 8. – № 1703043.
40. High-capacitance MXene–MnO_2 composites / M. Hu et al // Chemical Engineering Journal. – 2020. – Т. 384. – № 123336.
41. Charge transfer and storage in MXene electrodes / C. Chen et al // Energy Storage Materials. – 2018. – Т. 11. – P. 18-26.
42. Wen Y. Metal oxides and MXenes for supercapacitors / Y. Wen, T.E. Rufford, D. Hulicova-Jurcakova // Chemical Society Reviews. – 2021. – Т. 50. – P. 3044-3079.
43. Graphene/polyaniline nanofiber composites / K. Zhang et al // Chemistry of Materials. – 2010. – Т. 22. – P. 1392-1401.
44. Ti_3C_2 MXene nanocomposites for energy storage / J. Li et al // Nano Energy. – 2017. – Т. 33. – P. 473-486.
45. Functionalized MXene nanosheets for high-performance supercapacitors / C. Zhao et al // Journal of Materials Chemistry A. – 2019. – Т. 7. – P. 19314-19323.
46. Scaling up MXene production / L. Dong et al // Journal of Materials Chemistry A. – 2017. – Т. 5. – P. 19123-19133.
47. Fluorine-free synthesis of MXenes / T. Li et al // Angewandte Chemie International Edition. – 2018. – Т. 57. – P. 6115-6119.
48. A review of MXene-based materials for energy storage / P. Zhang et al // Energy Storage Materials. – 2021. – Т. 36. – P. 147-170.
49. Surface engineering of MXenes / L. Wang et al // Nano Today. – 2022. – Т. 42. – № 101358.
50. Chen X. Recent advances in MXene-based supercapacitors / X. Chen, Z. Zhang, Z. Zhou // Journal of Power Sources. – 2023. – Т. 560. – № 232693.

Алғыс

Бұл зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті тарапынан қаржыландырылды (грант № BR24992873).

Ш.Т. Султахан[1]*, А. Абдисаттар[2], К. Тажу[2], А. Коробейник[3], С. Азат[1]
[1]Satbayev Univeristy,
050013, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева 22
[2]Институт проблем горения,
Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Богенбай батыр, 172
[3]Наноғылым және нанотехнология тобы, PABS, Брайтон университеті,
Льюис жолы, Брайтон BN2 4GJ, Ұлыбритания
*e-mail: shynggyskhan.1@gmail.com

МЕТОДЫ МОДИФИКАЦИИ MXENE ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЕМКОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УСТРОЙСТВ ХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ

В данном обзоре всесторонне анализируются и систематизируются современные методы модификации, направленные на улучшение емкостных характеристик двумерных MXene-материалов, прежде всего $Ti_3C_2T_x$ и родственных соединений, для их использования в суперконденсаторах и гибридных устройствах хранения энергии. Высокая электронная проводимость, слоистая структура и химически активная поверхность MXene-материалов делают их перспективными электродными материалами для устройств хранения энергии. Однако их практическое применение характеризуется рядом ограничений, таких как повторное уплотнение слоев, ограниченная доступность активных центров и снижение структурной стабильности при длительной работе. В данном обзоре рассматриваются основные стратегии модификации, влияющие на электрохимические свойства MXene-материалов, включая контроль межслоевого расстояния на основе интеркаляции, функционализацию концевых групп поверхности, формирование композитов с углеродными наноматериалами и оксидами переходных металлов, легирование гетероатомами, морфологическое проектирование и различные методы постобработки. Сравнительно оценивается влияние этих подходов на ионную и электронную проводимость, долю псевдоконденсации и циклическую стабильность электродных материалов. На основе литературных данных проведен обобщенный анализ показателей удельной емкости и долговременной циклической стабильности, а также сформулированы практические рекомендации и направления будущих исследований по оптимизации электродов на основе MXene.

Ключевые слова: *MXene, суперконденсаторы, накопление энергии, модификация поверхности, интеркаляция, псевдоконденсаторы.*

S.T. Sultakhan[1]*, A. Abdisattar[2], K. Tazhu[2], A. Korobeinyk[3], S. Azat[1]
[1]Satbayev Univeristy,
050013, Republic of Kazakhstan, Almaty, 22 Satbayev street
[2]Institute of Combustion Problems,
Almaty, Bogenbay batyr k-si, 172
[3]Aarhus Institute of Advanced Studies, Aarhus University,
8000 Aarhus C, Denmark
*e-mail:shynggyskhan.1@gmail.com

MXENE MODIFICATION METHODS TO ENHANCE THE CAPACITANCE PERFORMANCE OF ENERGY STORAGE DEVICES

This review comprehensively analyzes and systematizes modern modification methods aimed at improving the capacitance characteristics of two-dimensional MXene materials, primarily $Ti_3C_2T_x$ and related compounds, for their use in supercapacitors and hybrid energy storage devices. The high electronic conductivity, layered structure, and chemically active surface of MXene materials make them promising electrode materials for energy storage devices. However, their practical application is characterized by a number of limitations, such as layer re-densification, limited availability of active centers, and reduced structural stability during long-cycle operation. In this review, the main modification strategies affecting the electrochemical properties of MXene materials are considered, including intercalation-based interlayer spacing control, functionalization of surface terminal groups, composite formation with carbon nanomaterials and transition metal oxides, heteroatom doping, morphological engineering, and various post-processing methods. The impact of these approaches on the ionic and electronic conductivity, pseudocondensation fraction, and cyclic stability of electrode materials is comparatively evaluated. Based on the literature data, a generalized analysis is carried out on the specific capacitance and long-term cyclic stability indicators, and practical recommendations and future research directions for optimizing MXene-based electrodes are formulated.

Key words: *MXene, supercapacitors, energy storage, surface modification, intercalation, pseudocapacitors.*

Авторлар туралы мәліметтер:

Шыңғысхан Темірханұлы Султахан* – Ғылыми қызметкер, Satbayev Univeristy, Қазақстан Республикасы; e-mail: shynggyskhan.1@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2195-755X.

Әлишер Әбдісаттар – «Материалтану, нанотехнология және инженерлік физика» кафедрасының докторанты; Satbayev Univeristy, Қазақстан Республикасы; e-mail: alisher.abdisattar@inbox.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-3806-264X.

Тажу Қайрат – Ғылыми қызметкер, Жану проблемалары институты, Бөгенбай батыр көшесі 172; e-mail: qairat.hairat@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1884-8635.

Алина Коробейник – доцент, Aarhus Institute of Advanced Studies, Aarhus University, 8000 Aarhus C, Denmark; e-mail: alinavkorobeinyk@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7248-0627.

Сейтхан Азат – Профессор, Инженерлі бейімді зертхана жетекшісі, Satbayev Univeristy, Қазақстан Республикасы; e-mail: s.azat@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9705-7438.

Информация об авторах:

Шынгысхан Темирханулы Султахан* – научный сотрудник, Университет Сатбаева, Республика Казахстан; e-mail: shynggyskhan.1@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2195-755X.

Алишер Абдисаттар – аспирант кафедры «Материаловедение, нанотехнологии и инженерная физика»; Университет Сатбаева, Республика Казахстан; e-mail: alisher.abdisattar@inbox.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-3806-264X.

Тажу Кайрат – научный сотрудник, Институт проблем горения, ул. Богенбая Батыра, 172; e-mail: qairat.hairat@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1884-8635.

Алина Коробейник – доцент, Орхусский институт перспективных исследований, Орхусский университет, Дания; e-mail: alinavkorobeinyk@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7248-0627.

Сейхан Азат – профессор, заведующий инженерной лабораторией, Университет Сатбаева, Республика Казахстан; e-mail: s.azat@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9705-7438.

Information about the authors

Shynggyskhan Temirkhanuly Sultakhan* – Researcher, Satbayev University, Republic of Kazakhstan; e-mail: shynggyskhan.1@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2195-755X.

Alisher Abdisattar – Doctoral student of the Department of «Materials Science, Nanotechnology and Engineering Physics», Satbayev University, Republic of Kazakhstan; e-mail: alisher.abdisattar@inbox.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-3806-264X.

Tazhu Kairat – Researcher, Institute of Combustion Problems; e-mail: qairat.hairat@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1884-8635.

Alina Korobeinyk – Associate Professor, Aarhus Institute of Advanced Studies, Aarhus University, Denmark; e-mail: alinavkorobeinyk@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7248-0627.

Setkhan Azat – Professor, Head of the Engineering Laboratory, Satbayev University, Republic of Kazakhstan; e-mail: s.azat@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9705-7438.

Редакцияға енуі 05.01.2026
Өңдеуден кейін түсуі 04.02.2026
Жариялауға қабылданды 05.02.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-74

ҒТАХР: 62.01.94

CC BY 4.0
Check for updates

А.М. Қожахметова, М.Н. Сыздыкова*
М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан Университеті,
160021, Қазақстан Республикасы, Шымкент қ., Тауке хан 5
*e-mail: maksat.marzhan@mail.ru

БАКТЕРИЯЛЫҚ $Fe_2(SO_4)_3$ ЖӘНЕ БЕНТОНИТ НЕГІЗІНДЕГІ КЕШЕНДІ ҚҰРАМДЫ ҚОЛДАНУ АРҚЫЛЫ АҒЫНДЫ СУЛАРДЫ ТАЗАЛАУ ТИІМДІЛІГІН ЗЕРТТЕУ

Аңдатпа: *Мақалада бактериалды-химиялық жолмен алынған үш валентті темір мен бентониттің ағынды судағы оттегінің химиялық қажеттілігіне (ОХҚ) әсерін зерттеу нәтижелері көрсетілген. Қазіргі таңда құрамында жуғыш заттары бар ағынды суларды тазартудың түрлі әдістері қолданылады. Солардың бірі – суды адсорбция әдісі арқылы өңдеу, оның ішінде көмір*

©А.М. Қожахметова, М.Н. Сыздыкова, 2026

материалдарын адсорбент ретінде пайдалану кең тараған. Әдетте ағынды суларды коагуляция әдісімен тазарту барысында алюминий сульфаты мен темір тұздары сияқты коагулянттардың тиімділігі қарастырылады. Бұл реагенттер коллоидты және ұсақ дисперсті бөлшектерді ірі үлпектерге біріктіріп, судың мөлдірлігін арттырады және ластағыштардың шөгіндіге түсуін қамтамасыз етеді. Зерттеу жұмысының мақсаты – құрамында жуғыш заттары бар ағынды сулардың ОХҚ мөлшерін азайту үшін биокоагулянт пен бентонитті пайдалануды зерттеу. Зерттеу әдістері – бактерияларды оқшаулау және лақылдандыру шекті сұйылту әдісімен жүргізілді, судың химиялық оттегінің қажеттілігі МЕМСТ талаптарына сай жасалды, математикалық модельдеу жасанды интеллект арқылы құрастырылды, статистикалық өңдеу Microsoft Excel статистикалық бағдарламалық пакетін қолдану арқылы жүргізілді. Зерттеу нәтижесінде Acidithiobacillus ferrooxidans BIT1 бактерияларының тіршілік әрекетінен алынған үш валентті темірді пайдалану мүмкіндігі орнатылды. 1,75 г/л концентрациядағы бактериалды-химиялық жолмен алынған үш валентті темір мен 600 мг/л бентонитті бірлесіп қолдану нәтижесінде ағынды сулардың оттегінің химиялық қажеттілігі (ОХҚ) көрсеткішінің төмендеу дәрежесі 88,1±7,9% құрады. Мұндай жоғары тиімділік Fe^{3+} иондарының коллоидты және органикалық ластағыштармен әрекеттесіп, ірі үлпектер түзу қабілетімен, ал бентониттің адсорбциялық және коагуляциялық қасиеттерімен түсіндіріледі.

Түйін сөздер: *коагуляция, ағынды су, тионды бактериялар, бентонит, Acidithiobacillus ferrooxidans.*

Кіріспе

Қазақстан Республикасында соңғы жылдары өнеркәсіптік мақсатта қолданылатын жуғыш және тазартқыш заттардың түрлері мен көлемі айтарлықтай артты. Нәтижесінде құрамында әртүрлі органикалық және беттік-белсенді заттары (ББЗ) бар ағынды сулардың мөлшері ұлғайып, олардың қоршаған ортаға тигізетін әсері күшейіп отыр [1].

Синтетикалық беттік-белсенді заттар – химиялық құрылымы мен табиғаты әртүрлі, бірнеше кластарға жататын органикалық қосылыстар тобы. Бұл қосылыстардың негізгі ерекшелігі – олардың фазалар шекарасында адсорбцияланып, жүйенің беттік керілуін төмендету қабілетінде. Аталған қасиет судың физика-химиялық сипаттамасын өзгертеді және көбік түзу, эмульсия түзу процестерін жеңілдетеді [2]. Дегенмен, синтетикалық ББЗ-дың көпшілігі биологиялық тұрғыдан баяу ыдырайды және табиғи суларда ұзақ уақыт сақталып, экожүйелердің тепе-теңдігіне теріс әсер етеді. Мысалы, алкилбензолсульфонаттар (АБС) өзен мен көлдердің бетінде тұрақты көбік түзіп, оттегінің диффузиясын төмендетеді және гидробионттардың тіршілігін тежейді [3]. 2024 жылы жүргізілген зерттеулерге сәйкес, Қазақстандағы өнеркәсіптік ағынды сулардың 18-22%-ы ББЗ қалдықтарымен ластанған, ал тұрмыстық сарқынды сулардың құрамында аниондық ББЗ мөлшері орта есеппен 3-6 мг/л деңгейінде тіркелген [4].

Қазіргі таңда құрамында жуғыш заттары бар ағынды суларды тазартудың түрлі әдістері қолданылады. Солардың бірі – суды адсорбция әдісі арқылы өңдеу, оның ішінде көмір материалдарын адсорбент ретінде пайдалану кең тараған [5]. Бұл әдісте қолданылатын адсорбенттерге бірқатар негізгі талаптар қойылады: жоғары сорбциялық сыйымдылық, механикалық беріктік, арзандылығы және регенерацияға бейімділігі [6].

Сондай-ақ ағынды суларды ауыр металл иондарынан, мұнай өнімдерінен және басқа да органикалық ластағыштардан тазарту процесінде сазды материалдар ерекше маңызға ие. Олар табиғи шығу тегімен, кең таралуымен және жоғары адсорбциялық қасиеттерімен ерекшеленеді [7].

Ағынды суларды коагуляция әдісімен тазарту – коллоидты және ұсақ дисперсті бөлшектерді біріктіріп, тұндыру арқылы судың мөлдірлігін арттыратын ең тиімді физика-химиялық әдістердің бірі. Бұл үдеріс кезінде ластағыш бөлшектер коагулянттар әсерінен тұрақсызданып, үлпек түрінде шөгіндіге түседі. Тәжірибеде коагуляцияны жүзеге асыру үшін көбінесе алюминий сульфаты ($Al_2(SO_4)_3$) немесе темір тұздары ($FeCl_3$, $Fe_2(SO_4)_3$) сияқты минералды реагенттер қолданылады [8]. Зерттеулерде $FeCl_3$ коагулянтын әкпен ($Ca(OH)_2$) бірге қолдану арқылы ағынды судың ОХҚ төмендеу тиімділігі 94,2% құрағаны анықталды, ал $FeCl_3$ пен полиакриламид (ПАА) комбинациясы кезінде бұл көрсеткіш 70% шамасында болған [9]. Мұндай айырмашылық коагулянттардың табиғаты мен реагенттердің өзара әсерлесу механизміне байланысты. Fe^{3+} иондары органикалық қосылыстарды тотығуға бейім орта түзе отырып, судың құрамындағы коллоидты бөлшектердің агрегациясын күшейтеді, ал полиакриламид үлпек түзу процесін жылдамдатады [10].

Зерттеу жұмысының мақсаты – құрамында жуғыш заттары бар ағынды сулардың ОХҚ мөлшерін азайту үшін биокоагулянт пен бентонитті пайдалануды зерттеу.

Зерттеу нысаны мен әдістері

Зерттеу нысаны – Шымкент қаласында орналасқан «Petro Kazakhstan Oil Products» ЖШС мұнай өңдеу зауытының ағынды суы болып табылады. Жуғыш синтетикалық ластағыштар ағынды суға қондырғылар мен қазандықтарды түрлі жуғыш заттармен шаю нәтижесінде келіп түседі.

Бентонит үлгілері Түркістан облысы, Сарыағаш ауданы аумағында орналасқан Дарбаза стратоморфты кен орнынан алынған. Бұл сазды жыныс құрамында шамамен 70%-дан астам монтмориллонит бар минералдық материал болып табылады. Оның негізгі минералы – галенит, ол негізгі тау жыныстарында жұқа қабатты аралас құрылым түзе отырып кездеседі. Дарбаза стратоморфты кен орнының құрамындағы негізгі металл – қорғасын, оның орташа мөлшері шамамен 2,39% құрайды. Қоспа элементтер ретінде күміс пен алтынның іздік мөлшерлері анықталған. Сонымен қатар, кеннің минералдық құрамында барит (1-6,7%) және марганец (0,2-0,6%) бар екені байқалады. Бұл кен орнынан алынған бентониттер судың қатысуында тығыз гель түзуге және көлемдік шектеу (ісіну) қасиетіне ие. Олардың pH көрсеткіші 6-9,5 аралығында өзгеріп отырады, ал құрамындағы натрий карбонатының мөлшері 2%-дан төмен. Мұндай физика-химиялық қасиеттер Дарбаза бентониттерін сорбент және биокоагулянттық материал ретінде қолдануға мүмкіндік береді.

A.ferroxidans BIT 1 штамы – Түркістан облысыгың фосфоры бар қалдықтарынан бөлініп алынған. Таяқша тәрізді, кейде жұптасып, көбінесе жалғыз орналасқан тионды бактериялар. Бөліну арқылы көбейеді, спора түзбейді. Қолайлы жағдайда екі валентті темірді үш валентті темірге дейін тотықтыра алады [11].

Судың ОХҚ мөлшері МЕМСТ 31859-2012 Су. Судағы ОХҚ көрсеткішін анықтау әдістеріне сай жүргізілді, ал pH ортасы WTW Multiparameter 340 (Экоинструмент, РФ) жүргізілді. Тион бактерияларын оқшаулау және дақылдандыру МЕМСТ 26670-91 бойынша шекті сұйылту әдісімен жүргізілді. Тион бактерияларының штамы *A.ferrooxidans BIT 1* Сильверман-Люндгрен 9К сұйық қоректік ортада дақылдандырылды, қоректік ортаның құрамы келесідей г/л: $(NH_4)_2SO_4$ -2,0; K_2HPO_4-1,0; $MgSO_4$-0,5; NaCI -0,2; $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ – 44,2; H_2O-1л; өсіру (30-35)ºС температурасында үздіксіз аэрациялау арқылы жүзеге асырылды.

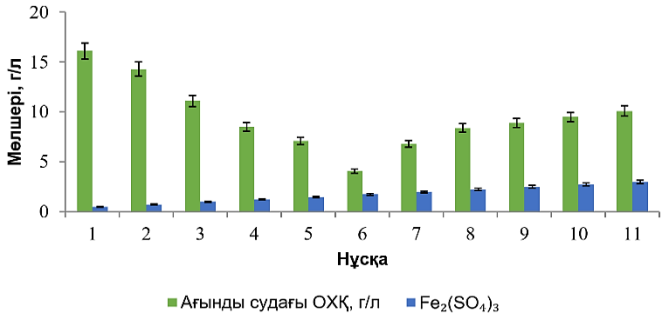
Математикалық модель құрастыуға жасанды интеллект (ЖИ, ChatGPT) пайдаланылды. Зерттеу нәтижелерінің сенімділігін арттыру мақсатында тәжірибелер әрбір жағдайда кемінде үш рет қайталанып жүргізілді. Алынған мәліметтер бойынша стандартты ауытқу $0,85 < P < 0,91$ сенімділік деңгейінде есептелді. Статистикалық деректерді өңдеу Microsoft Excel бағдарламасының статистикалық талдау пакеті арқылы Pentium-IV дербес компьютерінде орындалды.

Зерттеу нәтижелері мен талқылаулар

Ағынды суларды талдау нәтижелері бойынша ОХҚ 24,1 ± 2,2 г/л, ал ОБҚ$_5$ 2,9 ± 0,2 г/л мәндерін көрсетті. Зертханалық зерттеулер нәтижесінде коагуляциялық тазарту процесінде дәстүрлі түрде қолданылатын $FeCl_3$ орнына құрамында $Fe_2(SO_4)_3$ бар *A.ferrooxidans* бактериялық суспензиясын қолдану тиімділігі мен мүмкіндігі анықталды.

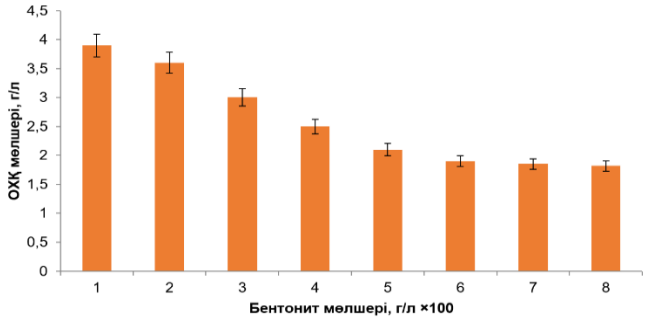
Тиімді pH мәнін анықтау және ОХҚ мен ОБҚ көрсеткіштерін барынша төмендету мақсатында $Fe_2(SO_4)_3$ концентрациясы 1,5±0,1 г/л деңгейінде тұрақтандырылды. Әртүрлі pH мәндерінің ОХҚ-ға әсері зерттеліп, олардың арасында кері корреляциялық тәуелділік байқалды. pH көрсеткіші 3-тен 11-ге дейін артқан жағдайда ОХҚ-ның жойылу тиімділігі 65,8%-дан 42,9%-ға дейін төмендейтіні анықталды. Бұл ретте тазарту процесінен кейінгі ағынды сулардағы ОХҚ концентрациясы 10,3±1,0 г/л шамасында болды. ОХҚ 16,1±1,5 г/л мәнінен 4,1±0,4 г/л көрсеткішіне дейін төмендету үшін $Fe_2(SO_4)_3$ тиімді мөлшері 1,75 г/л болатыны анықталды, яғни ағынды сулардағы ОХҚ жою дәрежесі 74,5±0,7% құрайды (сурет 1).

ОХҚ көрсеткішін одан әрі төмендету үшін ағынды суларды тазалауда қосымша физикалық-химиялық үрдістерді қолдану тиімді болып табылады. Мұндай жағдайда табиғи сазды минералдар, соның ішінде бентонит, ерекше мәнге ие. Бентониттің құрамындағы монтмориллонит минералы жоғары катионалмасу қабілетіне және кеңейтілген меншікті беткей ауданына ие болғандықтан, коагуляция процесінде түзілетін ұсақ дисперсті бөлшектерді ірі әрі тығыз үлпектерге біріктіреді.



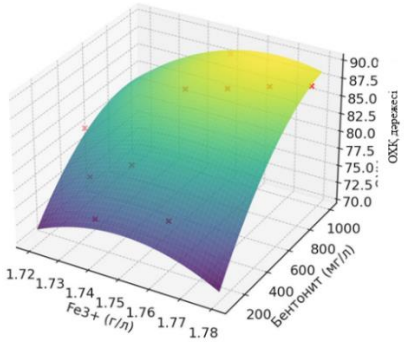
Сурет 1 – $Fe_2(SO_4)_3$ мөлшерінің ОХҚ дәрежесінің төмендеуіне ықпалы

Зерттеу нәтижелері бойынша, бентониттің концентрациясы ағынды сулардың оттегінің химиялық қажеттілігіне (ОХҚ) айтарлықтай әсер ететіні анықталды. 100 мг/л бентонит қосылған жағдайда, ОХҚ көрсеткіші 4,1±0,4 г/л-ден 3,9±0,3 г/л деңгейіне дейін төмендеді, яғни тазарту тиімділігі шамамен 5%-ды құрады. Ал бентонит мөлшері 600 мг/л дейін арттырылған кезде, ОХҚ көрсеткіші 1,9±0,1 г/л шамасына дейін төмендеп, бастапқы мәнмен салыстырғанда 88,1±7,9% төмендеу байқалды. Бұл нәтиже бентониттің жоғары адсорбциялық белсенділігін және коагуляциялық процестегі қосымша құрылымдандырушы рөлін айқын көрсетеді (сурет 2).



Сурет 2 – Бентонит мөлшерінің ОХҚ көрсеткішіне әсері

Математикалық талдау және тәуелділіктерді визуализациялау мақсатында үш өлшемді графиктерді құру үшін Statistica бағдарламалық кешені қолданылды. Алдымен эксперименттік нәтижелер негізінде бастапқы деректер өңделіп, статистикалық есептеулер жүргізілді және тиісті параметрлер кесте түрінде жүйеленді. Бағдарлама көмегімен алынған мәліметтер тұрақты және айнымалы факторлардың өзара әсерін ескере отырып, үш өлшемді кеңістікте бейнеленді (сурет 3). Мұндай тәсіл $Fe_2(SO_4)_3$ және бентонит концентрацияларының ағынды сулардағы ОХҚ көрсеткішіне ықпал ету заңдылықтарын көрнекі түрде бағалауға мүмкіндік берді.



Сурет 3 – Fe^{3+} мен бентониттің судағы ОХҚ мөлшеріне әсерінің математикалық моделі

Зерттеу нәтижесінде *A. ferrooxidans BIT 1* бактерияларының тіршілік әрекетінен алынған Fe^{3+} пайдалану мүмкіндігі орнатылды. 1,75 г/л концентрациядағы бактериялық химиялық жолмен алынған Fe^{3+} мен 600 мг/л бентонитті бірлесіп қолдану нәтижесінде ағынды судың ОХҚ көрсеткішігің төмендеу дәрежесі 88,1±7,9% құрады. Мұндай жоғары тиімділік Fe^{3+} иондарының коллоидты және органикалық ластағыштармен әрекеттесіп, ірі үлпектер түзу қабілетімен, ал бентониттің адсорбциялық және коагуляциялық қасиеттерімен түсіндіріледі.

Қорытынды

Жүргізілген зерттеу нәтижелері құрамында жуғыш заттары бар өндірістік ағынды суларды тазарту тиімділігін арттыру мақсатында бактериалды-химиялық жолмен алынған Fe3+ және табиғи бентонитті қолданудың жоғары әлеуетін дәлелдеді. Шымкент қаласындағы «Petro Kazakhstan Oil Products» ЖШС-нің ағынды суларына жүргізілген талдау олардың жоғары ластану дәрежесін көрсетті (ОХҚ – 24,1±2,2 г/л, $ОБҚ_5$ – 2,9±0,2 г/л). Дәстүрлі коагулянт $FeCl_3$ орнына A. ferrooxidans BIT 1 тионды бактериялары негізінде алынған $Fe_2(SO_4)_3$ ерітіндісін қолдану арқылы коагуляциялық тазарту процесінің тиімділігі зерттелді. $Fe_2(SO_4)_3$ концентрациясы 1,5-1,75 г/л диапазонында ұсталған жағдайда және pH мәні 3-тен 11-ге дейін өзгертілгенде, ОХҚ жою дәрежесі 65,8-42,9% аралығында болды. Ал $Fe_2(SO_4)_3$ мөлшері 1,75 г/л болғанда ОХҚ 74,5±0,7% дейін төмендеді. Қосымша адсорбент ретінде бентонитті енгізу коагуляциялық процестің тиімділігін едәуір арттырды. Бентонит мөлшері 600 мг/л болғанда ОХҚ төмендеу дәрежесі 88,1±7,9% жетті, бұл синтетикалық жуғыш заттармен ластанған ағынды суларды кешенді биокоагуляциялық әдіспен тазарту тиімді екенін дәлелдейді.

Осылайша, A. ferrooxidans бактериялары арқылы алынған үш валентті темір мен бентонитті бірлесіп пайдалану – экологиялық қауіпсіз, экономикалық тұрғыдан тиімді және өндірістік жағдайда оңай қолдануға болатын технологиялық шешім болып табылады. Бұл әдіс құрамында органикалық ластағыштары бар ағынды суларды биокоагуляциялық жолмен тазартудың жаңа бағытын ұсынады.

Әдебиеттер тізімі

1. Advancing on the promises of techno-ecological nature-based solutions: A framework for green technology in water supply and treatment / E.A.J. Blackburn et Al // Blue-Green Systems. – 2021. – № 3(1). – P. 81-94. https://doi.org/10.2166/bgs.2021.008.
2. Mohseni-Bandpi A. Biological nitrate removal processes from drinking water supply-a review / A. Mohseni-Bandpi, D.J. Elliott, M.A. Zazouli // Journal of environmental health science & engineering. – 2013. – № 11(1). – P. 35. https://doi.org/10.1186/2052-336X-11-35.
3. Self-heating of dried industrial tannery wastewater sludge induced by pyrophoric iron sulfides formation / R. Bertani et al // Journal of Hazardous Materials. – 2016. – № 305. – P. 105-114.
4. Шамханов М.Ч. Адсорбенты на основе природного бентонита / М.Ч. Шамханов // Вестник магистратуры. – 2021. – № 5-5(116). – С. 34-37.
5. Садикова Н.К. Кинетические характеристики очистки сточных вод от нефтепродуктов / Н.К. Садикова, М.Р. Амонов // Universum: технические науки. – 2024. – vol. 6, № 10(127). – P. 50-53.
6. Сатаева С.С. Применение сорбентов, приготовленных на основе растительного сырья, для очистки загрязненных вод / С.С. Сатаева, М.Е. Сидагалиев, Ф.Ж. Ахметова // Yessenov science journal. – 2024. – vol. 47, № 2. – P. 15-26. https://doi.org/10.56525/MTZD8751.
7. Baciocchi R. Activated carbons application to remove nonionic surfactants from wastewater produced by an Italian metallurgic plant / R. Baciocchi, F. Lombardi, R. Torella // J Environ Sci Health A Tox Hazard Subst Environ Eng. – 2004. – № 39(4). – P. 1095-106. https://doi.org/10.1081/ese-120028416. PMID: 15137722.
8. Comparative Evaluation of Aluminum Sulfate and Ferric Sulfate-Induced Coagulations as Pretreatment of Microfiltration for Treatment of Surface Water / Y. Song et al // International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2015. – № 12(6). – P. 6700-6709. https://doi.org/10.3390/ijerph120606700.
9. Industrial Wastewater Treatment by Coagulation–Flocculation and Advanced Oxidation Processes: A Review / M.S. Lucas et al // Water. – 2025. – № 17(13). – P. 1934. https://doi.org/10.3390/w17131934.
10. Use of combined coagulation-adsorption process as pretreatment of landfill leachate / R. Gandhimathi et al / J Environ Health Sci Engineer. – 2013. – № 10, 24. https://doi.org/10.1186/1735-2746-10-24.
11. Сыздыкова М.Н. Ағынды суды тазалауда пайдаланылатын *Acidithiobacillus ferrooxidans Ach 1* бактериялық штамының темірді биохимиялық тотықтыру жылдамдығын зерттеу / М.Н. Сыздыкова, А.У. Исаева // Вестник Университета Шакарима. Серия технические науки. – 2025. – № 1(17). – С.398-403. https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-1(17)-49.

References

1. Advancing on the promises of techno-ecological nature-based solutions: A framework for green technology in water supply and treatment / E.A.J. Blackburn et Al // Blue-Green Systems. – 2021. – № 3(1). – R. 81-94. https://doi.org/10.2166/bgs.2021.008. (In English).
2. Mohseni-Bandpi A. Biological nitrate removal processes from drinking water supply-a review / A. Mohseni-Bandpi, D.J. Elliott, M.A. Zazouli // Journal of environmental health science & engineering. – 2013. – № 11(1). – R. 35. https://doi.org/10.1186/2052-336X-11-35. (In English).
3. Self-heating of dried industrial tannery wastewater sludge induced by pyrophoric iron sulfides formation / R. Bertani et al // Journal of Hazardous Materials. – 2016. – № 305. – R. 105-114. (In English).
4. Shamkhanov M.CH. Adsorbenty na osnove prirodnogo bentonita / M.CH. Shamkhanov // Vestnik magistratury. – 2021. – № 5-5(116). – S. 34-37. (In Russian).
5. Sadikova N.K. Kineticheskie kharakteristiki ochistki stochnykh vod ot nefteproduktov / N.K. Sadikova, M.R. Amonov // Universum: tekhnicheskie nauki. – 2024. – vol. 6, № 10(127). – R. 50-53. (In Russian).
6. Sataeva S.S. Primenenie sorbentov, prigotovlennykh na osnove rastitel'nogo syr'ya, dlya ochistki zagryaznennykh vod / S.S. Sataeva, M.E. Sidagaliev, F.ZH. Akhmetova // Yessenov science journal. – 2024. – vol. 47, № 2. – R. 15-26. https://doi.org/10.56525/MTZD8751. (In Russian).
7. Baciocchi R. Activated carbons application to remove nonionic surfactants from wastewater produced by an Italian metallurgic plant / R. Baciocchi, F. Lombardi, R. Torella // J Environ Sci Health A Tox Hazard Subst Environ Eng. – 2004. – № 39(4). – R. 1095-106. https://doi.org/10.1081/ese-120028416. PMID: 15137722. (In English).
8. Comparative Evaluation of Aluminum Sulfate and Ferric Sulfate-Induced Coagulations as Pretreatment of Microfiltration for Treatment of Surface Water / Y. Song et al // International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2015. – № 12(6). – R. 6700-6709. https://doi.org/10.3390/ijerph120606700. (In English).
9. Industrial Wastewater Treatment by Coagulation–Flocculation and Advanced Oxidation Processes: A Review / M.S. Lucas et al // Water. – 2025. – № 17(13). – R. 1934. https://doi.org/10.3390/w17131934. (In English).
10. Use of combined coagulation-adsorption process as pretreatment of landfill leachate / R. Gandhimathi et al / J Environ Health Sci Engineer. – 2013. – № 10, 24. https://doi.org/10.1186/1735-2746-10-24. (In English).
11. Syzdykova M.N. Ағындy sudy tazalauda paidalanylatyn Acidithiobacillus ferrooxidans Ach 1 bakteriyalyқ shtamynyң temirdi biokhimiyalyқ totyқtyru zhyldamdyғyn zertteu / M.N. Syzdykova, A.U. Isaeva // Vestnik Universiteta Shakarima. Seriya tekhnicheskie nauki. – 2025. – № 1(17). – S.398-403. https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-1(17)-49. (In Russian).

А.М. Қожахметова, М.Н. Сыздыкова*

М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан Университеті,
160021, Қазақстан Республикасы, Шымкент қ., Тауке хан 5
*e-mail: maksat.marzhan@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЛЕКСНОГО СОСТАВА НА ОСНОВЕ БАКТЕРИАЛЬНОГО $FE_2(SO_4)_3$ И БЕНТОНИТА

В статье представлены результаты исследования влияния трёхвалентного железа, полученного бактериально-химическим способом, и бентонита на показатель химического потребления кислорода (ХПК) сточных вод. В настоящее время для очистки сточных вод, содержащих моющие средства, применяются различные методы. Одним из наиболее распространённых является метод адсорбции, в частности использование углеродных материалов в качестве адсорбентов. Очистка сточных вод методом коагуляции осуществляется с применением таких коагулянтов, как сульфат алюминия или соли железа. Цель исследования – снижение показателя химического потребления кислорода (ХПК) сточных вод, содержащих моющие вещества, путём использования трёхвалентного железа, полученного бактериально-химическим методом с применением бентонита. Методы исследования включали выделение и культивирование бактерий методом предельных разведений, определение ХПК в соответствии с требованиями ГОСТ, математическое моделирование с использованием искусственного интеллекта, а также статистическую обработку данных на ПК «Pentium-IV» с применением пакета статистических программ Microsoft Excel. В результате исследований установлена возможность применения

$Fe_2(SO_4)_3$, полученного бактериально-химическим путём с участием тионных бактерий A. ferrooxidans BIT 1. При совместном использовании бактериально-химического трёхвалентного железа в концентрации 1,75 г/л и бентонита 600 мг/л степень снижения ХПК сточных вод достигает 88,1±7,9%. При добавлении $Fe_2(SO_4)_3$ в количестве 1,75 г/л и бентонита 100 мг/л снижение ХПК составило 75,7%.

Ключевые слова: *коагуляция, сточная вода, тионовые бактерии, бентонит, Acidithiobacillus ferrooxidans.*

A.M. Kozhakhmetova, M.N. Syzdykova*
M. Auezov South Kazakhstan University,
160021, Republic of Kazakhstan, Shymkent, Tauke khan 5
*e-mail: maksat.marzhan@mail.ru

STUDY OF THE EFFICIENCY OF WASTEWATER TREATMENT USING A COMPLEX COMPOSITION BASED ON BACTERIAL $FE_2(SO_4)_3$ AND BENTONITE

The article presents the results of a study on the effect of trivalent iron obtained by a bacterial-chemical method and bentonite on the chemical oxygen demand (COD) of wastewater. Currently, various methods are used to treat wastewater containing detergents. One of the most common is the adsorption method, particularly using carbon-based materials as adsorbents. Wastewater treatment by coagulation is also widely applied, using coagulants such as aluminum sulfate or iron salts. The aim of the study was to reduce the chemical oxygen demand (COD) of wastewater containing detergents by applying trivalent iron obtained through a bacterial-chemical process using bentonite. The research methods included bacterial isolation and cultivation by the serial dilution method, COD determination according to GOST standards, mathematical modeling using artificial intelligence, and statistical data processing on a Pentium-IV PC using the Microsoft Excel statistical software package. As a result of the study, the possibility of using $Fe_2(SO_4)_3$ obtained by a bacterial-chemical method with A. ferrooxidans BIT 1 sulfur-oxidizing bacteria was established. Under conditions of combined use of bacterial–chemical trivalent iron (1.75 g/L) and bentonite (600 mg/L), the maximum COD reduction of wastewater reached 88.1±7.9%. When $Fe_2(SO_4)_3$ was applied at 1.75 g/L and bentonite at 100 mg/L, the COD reduction degree was 75.7%.

Key words: *coagulation, wastewater, thion bacteria, bentonite, Acidithiobacillus ferrooxidans.*

Авторлар туралы мәліметтер

Айдана Маратовна Қожахметова – жаратылыстану ғылымдарының магистрі, «Экология» кафедрасының аға оқытушысы, М.Әуезов атындағы ОҚУ.

Маржан Нурлановна Сыздыкова* – жаратылыстану ғылымдарының магистрі, «Экология» кафедрасының докторанты, М. Әуезов атындағы ОҚУ; e-mail: maksat.marzhan@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9603-9748.

Сведения об авторах

Айдана Маратовна Кожахметова – магистр естественных наук, старший преподаватель кафедры «Экология», Южно-Казахстанский университет им. М.Ауэзова.

Маржан Нурлановна Сыздыкова* – Южно-Казахстанский Университет им. М.Ауэзова, Казахстан, Шымкент, докторант кафедры «Экология»; e-mail: maksat.marzhan@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9603-9748.

Information about the authors

Aidana Maratovna Kozhakhmetova – Master of Natural Sciences, Senior Lecturer at the Department of Ecology, M. Auezov South Kazakhstan University.

Маржан Нурлановна Сыздыкова* – M. Auezov South Kazakhstan University, Republic of Kazakhstan, Shymkent; master of Natural Sciences, Doctoral student of the Department of Ecology; e-mail: maksat.marzhan@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9603-9748.

Редакцияға енуі 29.10.2025
Өңдеуден кейін түсуі 23.12.2025
Жариялауға қабылданды 24.12.2025

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-75

МРНТИ: 35.15.19

BY 4.0
Check for updates

М. Әліпұлы*, Ш. Султахан, Е. Есжан, У. Жантикеев, К. Шакенов
Satbayev Univeristy,
050013, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22
*e-mail: mukhtaralipuly@gmail.com

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НАНОКОМПОЗИТОВ $Ti_3C_2T_X$/SI, ПОЛУЧЕННЫХ МЕХАНОХИМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Аннотация: *Настоящее исследование посвящено изучению фундаментальных закономерностей формирования гетероструктур на основе двумерных карбидов титана ($Ti_3C_2T_x$ MXene) и кремнийсодержащих модификаторов различного генезиса. Актуальность работы обусловлена необходимостью создания стабильных анодных материалов, способных нивелировать значительные объемные изменения кремния в процессах электрохимического циклирования. В качестве прекурсоров были исследованы кристаллический кремний, биогенный кремний из рисовой шелухи и аморфный диоксид кремния с варьируемой дисперсностью. Синтез нанокомпозитов осуществлялся методом высокоэнергетической механохимической активации в восстановительной среде этанола. Комплексный анализ методами сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии позволил установить, что использование биогенных аморфных модификаторов обеспечивает наиболее прецизионную однородность покрытия ламелей MXene. Выявлено, что ключевым фактором стабилизации интерфейса является формирование ковалентных мостиковых связей Si–O–Ti, инициируемое наличием активных гидроксильных групп на поверхности биогенного сырья. Установлено, что применение этанола в качестве дисперсионной среды эффективно предотвращает деградацию и окисление титановой матрицы, способствуя сохранению ламеллярной архитектуры композита. Полученные результаты расширяют научно-технологическую базу для разработки высокоэффективных электродов нового поколения для литий-ионных систем хранения энергии и функциональных каталитических покрытий.*

Ключевые слова: *MXene, $Ti_3C_2T_x$, нанокомпозиты, кремний, биогенный диоксид кремния, рисовая шелуха, мокрое шаровое измельчение, электронная микроскопия.*

Введение

Ландшафт наноструктурированных материалов претерпевает значительные изменения благодаря интеграции композитов MXene и кремния (Si), что обусловлено их существенным потенциалом в области электрохимии и катализа. MXene, класс двумерных (2D) материалов, обычно получаемых из карбидов, нитридов или карбонитридов переходных металлов, демонстрируют исключительную проводимость, механическую прочность и большую площадь поверхности, что является преимуществом для приложений хранения энергии, в частности, в литий-ионных аккумуляторах и суперконденсаторах [1]. Кроме того, кремний признан перспективным анодным материалом благодаря своей высокой теоретической емкости (примерно 4200 мАч/г) для хранения лития [2]. Однако создание композитов MXene/Si предлагает инновационный подход к смягчению некоторых присущих кремниевым электродам недостатков, в частности, значительных объемных изменений во время циклов, которые приводят к быстрому падению емкости [1-3]. Взаимодействие между этими материалами способно значительно улучшить электрохимические характеристики и стабильность, открывая путь для передовых технологий хранения энергии.

Несмотря на многообещающие характеристики композитов MXene/Si, сохраняются проблемы, касающиеся эффективного распределения порошков кремния по поверхности MXene. Поскольку кремниевые аноды подвергаются значительному расширению и сжатию во время электрохимического циклирования, обеспечение равномерной дисперсии частиц кремния на матрице MXene имеет решающее значение для поддержания эффективных электронных путей и снижения риска агрегации и окисления. Исследования показывают, что эффективность кремния в этих композитах в значительной степени зависит от природы

©М. Әліпұлы, Ш. Султахан, Е. Есжан, У. Жантикеев, К. Шакенов, 2026

используемого прекурсора, который может представлять собой кристаллический кремний или биогенные источники, такие как кремний, полученный из рисовой шелухи [4-6]. Эти материалы обладают уникальным составом, который потенциально может улучшить межфазную химию и структурную целостность композитов MXene.

Основной целью данного исследования является изучение того, как характеристики кремниевых прекурсоров, в частности их кристалличность и происхождение, влияют на структурные и композиционные параметры нанокомпозитов MXene/Si, полученных методом мокрого шарового измельчения (wet ball milling). В данной работе особое внимание уделяется роли жидкой среды в процессе механохимического синтеза. Использование этанола в качестве дисперсионной среды призвано не только предотвратить агломерацию, но и выступить в качестве мягкого восстановителя, минимизирующего окисление компонентов.

В то время как кристаллический кремний (c-Si) традиционно известен своей стабильностью при циклировании, биогенный кремний из рисовой шелухи привлекает внимание своей экологической устойчивостью и уникальными свойствами (высокая удельная поверхность, наличие активных поверхностных групп), которые могут сделать его конкурентоспособной альтернативой [4, 6]. В рамках исследования проводится сравнительный анализ четырех типов модификаторов: кристаллического Si высокой чистоты, чистого Si из рисовой шелухи и аморфных форм SiO_2. Работа направлена на выявление корреляций между природой кремниевых прекурсоров и результирующими свойствами интерфейса внутри композитов MXene, что внесет вклад в более широкое понимание и оптимизацию материалов для хранения энергии нового поколения.

Стабилизация анодов на основе кремния требует прецизионного проектирования гетерофазных границ, способных выдерживать значительные градиенты напряжений и сохранять пути транспорта зарядов. Даже в модельных структурах кристаллический кремний / аморфный SiO_2 наблюдается структурно измененная переходная зона, обусловленная интерфейсным напряжением, что может существенно влиять на показатели межфазного переноса [7]. Учитывая, что кремний остается ключевым объектом для разработки высокоемких анодов [8], мы предполагаем, что использование биогенного кремния, полученного из рисовой шелухи, может обеспечить формирование более реакционноспособного интерфейса. В отличие от традиционного кристаллического кремния, биогенный кремнезем (преимущественно аморфный при контролируемой термообработке) обладает поверхностью, склонной к гидроксильной модификации, что способствует возникновению ковалентных связей Si–O–Ti на границе с MXene [9, 10]. Данная гипотеза также подкрепляется существующими различиями в структуре кристаллических и аморфных силикатов, которые определяют плотность дефектов и способность к аккомодации напряжений в нагруженных гетероструктурах [11].

Методологически использование мокрой механохимической обработки в среде этанола обосновано тем, что высокоэнергетическое измельчение в реакционноспособной жидкой среде позволяет совместить диспергирование с *in situ* пассивацией и функционализацией поверхности [12, 13]. Такой контроль поверхности критически важен, так как образование изолирующих оксидных фаз может подавлять межфазный перенос заряда [14]. Следовательно, сравнительный анализ кристаллического Si, биогенного кремния и аморфного SiO_2 необходим для понимания того, как баланс аморфной и кристаллической фаз влияет на связывание и компенсацию напряжений [9, 15]. Конечной целью является определение условий, обеспечивающих максимальную прочность связи Si–O–Ti при сохранении ламеллярной морфологии и эффективного буферного эффекта против накопления механических напряжений [10, 16].

Таким образом, разработка нанокомпозитов MXene/Si представляет собой значительные возможности и вызовы, требующие тщательного изучения. Данное исследование призвано предоставить ценные сведения о том, как выбор прекурсора кремния и условия механохимической обработки влияют на эффективность композита и формирование межфазных границ (в том числе связей Si–O–Ti), что в конечном итоге может способствовать прогрессу в создании экологически чистых и эффективных технологий хранения энергии.

Материалы и методы

Исходные материалы

В качестве прекурсора для формирования двумерной матрицы использовался супернатант карбида титана ($Ti_3C_2T_x$), полученный после стадии кислотного травления Ti_3AlC_2 и последующего расслоения. Для удаления непрореагировавших частиц MAX-фазы смесь подвергалась отстаиванию и центрифугированию, после чего отбиралась верхняя фракция (супернатант), содержащая диспергированные моно- и малослойные фрагменты MXene.

Для модификации поверхности MXene были использованы четыре типа кремнийсодержащих материалов, различающихся степенью кристалличности и происхождением:

1. Кристаллический кремний (c-Si) высокой чистоты – в качестве референсного образца.
2. Биогенный кремний, полученный из рисовой шелухи (чистый Si).
3. Аморфный диоксид кремния (SiO_2), синтезированный из рисовой шелухи при соотношении сырья к щелочи (Rice Husk:NaOH) равном 1:10.
4. Аморфный диоксид кремния (SiO_2), синтезированный из рисовой шелухи при соотношении сырья к щелочи (Rice Husk:NaOH) равном 1:2.

Выбор материалов на основе рисовой шелухи обусловлен их развитой удельной поверхностью и наличием поверхностных гидроксильных групп (-OH), способствующих химическому взаимодействию с функциональными группами MXene.

Методика синтеза композитов

Синтез нанокомпозитов $Ti_3C_2T_x$/Si осуществлялся методом механохимической активации (мокрое шаровое измельчение).

Процедура синтеза включала следующие этапы (рис. 1):

1. Подготовка реакционной смеси: В стаканы из диоксида циркония (ZrO_2) помещался отобранный объем супернатанта MXene и соответствующий кремнийсодержащий модификатор.

2. Выбор дисперсионной среды: В систему добавлялся этанол до общего объема жидкой фазы 10 мл. Этанол использовался для создания стабильной суспензии, снижения поверхностного натяжения и предотвращения агломерации наночастиц. Кроме того, этанол выступал в роли мягкого восстановителя и защитного агента, препятствующего окислению $Ti_3C_2T_x$ и кремния в процессе механической обработки.

3. Параметры помола: Механохимическая обработка проводилась в присутствии мелющих шаров из ZrO_2. Массовое отношение мелющих тел к порошку (Ball-to-Powder Ratio, BPR) составляло 10:1. Скорость вращения стаканов была установлена на уровне 350 об/мин. Продолжительность синтеза составляла 3 часа.

4. Постобработка: Полученную суспензию промывали для удаления остаточных реагентов и центрифугировали. Финальный осадок подвергался вакуумной сушке при температуре 80 °C в течение 12 часов.



Рисунок 1 – Схематическое изображение процесса синтеза нанокомпозитов

Методы исследования

Морфология полученных образцов и особенности распределения частиц кремния на поверхности MXene изучались методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Элементный состав и наличие химических связей оценивались методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДС).

Результаты и обсуждение

Морфологические особенности композитов $Ti_3C_2T_x$/Si и их элементный состав

В результате применения метода мокрого шарового измельчения (wet ball milling) было установлено, что все исследуемые образцы успешно сохранили свою фундаментальную многослойную и ламеллярную морфологию, характерную для фазы MXene, что отчетливо

подтверждается полученными СЭМ-изображениями. Тем не менее, в процессе механохимической активации микрорельеф поверхности двумерных пластин претерпел качественные изменения: наблюдается заметное увеличение шероховатости и появление многочисленных мелкодисперсных включений. Данные структурные элементы представляют собой частицы кремнийсодержащих материалов, которые в ходе синтеза были равномерно и гомогенно распределены по всей доступной площади поверхности матричного материала $Ti_3C_2T_x$, формируя развитый интерфейс композита.

Детальный анализ микрофотографий, полученных при увеличениях 1000× и 2000×, позволяет идентифицировать присутствие плотных частиц округлой формы, локализованных на поверхности матричного материала (рис. 2). При более высоком разрешении (увеличение 2000×) отчетливо визуализируется частичная инкорпорация отдельных частиц кремния в межпакетные пространства ламелей $Ti_3C_2T_x$, что ведет к формированию зон плотного межфазного контакта. Данный морфологический признак подтверждает превалирование механизмов механического закрепления частиц Si, обусловленных интенсивными ударно-истирающими воздействиями в процессе высокоэнергетического шарового помола.

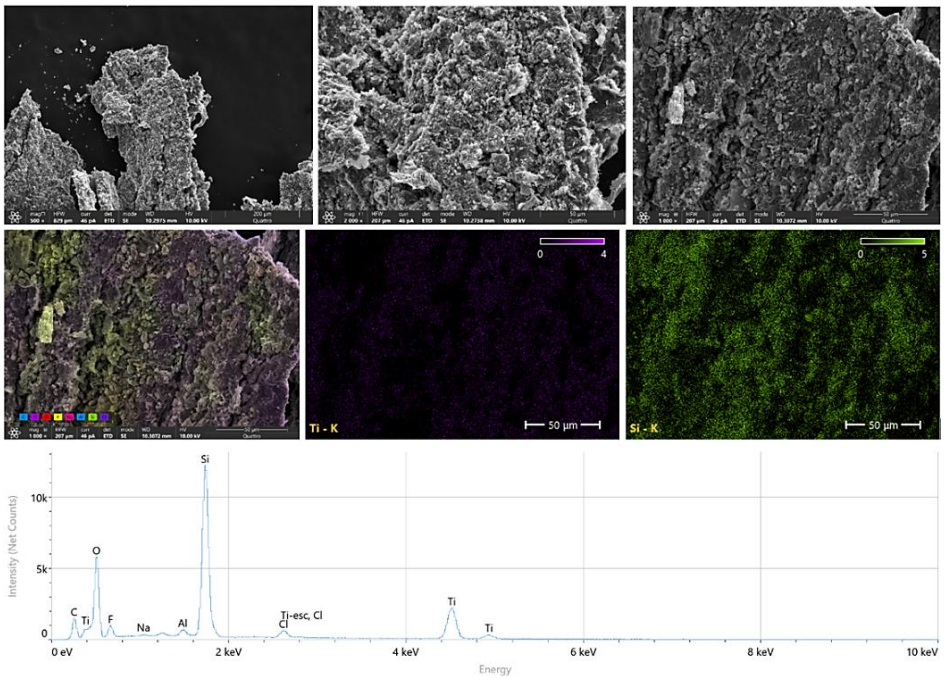


Рисунок 2 – СЭМ-изображение и ЭДС-спектр нанокомпозита $Ti_3C_2T_x$ с кристаллическим кремнием (c-Si)

На локальных участках фиксируется повышение микрошероховатости поверхности MXene, свидетельствующее о частичной деформации атомарных слоев под влиянием приложенной механической энергии, при этом базовая структурная целостность двумерного материала остается ненарушенной. Согласно данным энергодисперсионного микроанализа (ЭДС), в составе исследуемого образца присутствуют характеристические элементы Ti, C, O, F и Si. Массовая доля кремния достигает 27,8%, что указывает на высокую эффективность адгезии кристаллических прекурсоров к проводящей подложке.

Результаты картирования распределения элементов демонстрируют преимущественную концентрацию Si вдоль границ пластин и по периферии частиц $Ti_3C_2T_x$ – в зонах наиболее активной адсорбции и потенциального формирования химических связей типа Si–O–Ti. Увеличение процентного содержания кислорода относительно исходного (немодифицированного) MXene косвенно подтверждает гипотезу о формировании переходного оксидного слоя на границе раздела фаз Ti и Si, что характерно для гетероструктур подобного типа.

При малом увеличении (100×) на СЭМ-микрофотографиях поверхность слоев MXene характеризуется однородной, слегка зернистой текстурой без видимых признаков крупнодисперсных фаз (рис. 3). Однако повышение разрешающей способности до 500× и

выше позволяет визуализировать наличие многочисленных наноразмерных сферических гранул. Данные структурные элементы формируют дискретные островковые кластеры, характеризующиеся высокой адгезией к базальным плоскостям $Ti_3C_2T_x$, что свидетельствует о преобладании адсорбционного механизма фиксации модификатора.

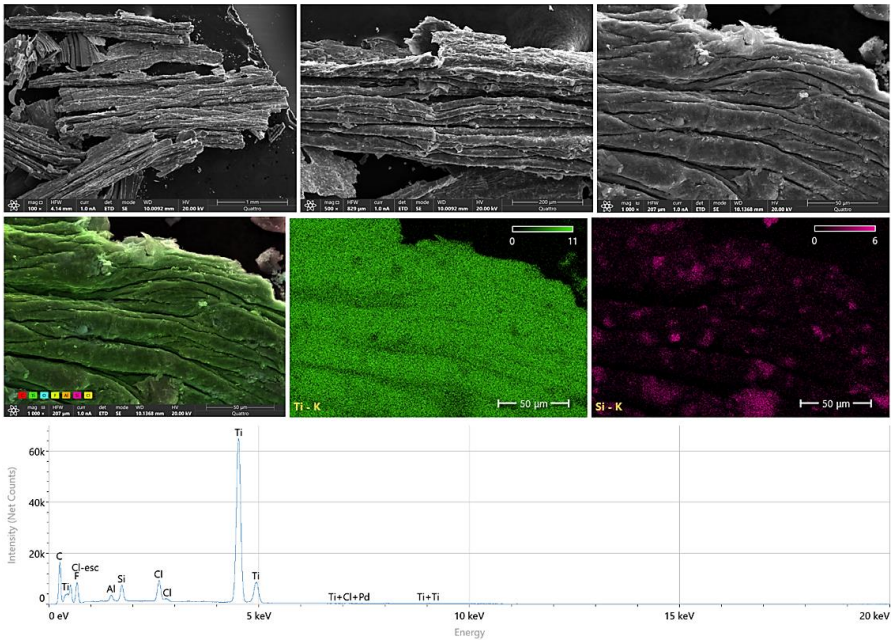


Рисунок 3 – СЭМ-изображение и ЭДС-спектр нанокомпозита $Ti_3C_2T_x$ с биогенным кремнием из рисовой шелухи

Согласно результатам энергодисперсионного микроанализа (ЭДС), содержание кремния в данном образце составляет порядка 2,1% масс. при значительном содержании титана (52,0% масс.). Столь умеренная концентрация кремния указывает на ограниченную степень инкорпорации частиц SiO_2 и относительно невысокую интенсивность химического взаимодействия с поверхностью матрицы. Тем не менее, данные карт распределения элементов (mapping) подтверждают гомогенность осаждения кремнийсодержащих фаз на поверхности $Ti_3C_2T_x$, что доказывает эффективность совместной механохимической обработки даже для аморфных прекурсоров.

Относительно низкое содержание кремния в составе композита может быть обусловлено спецификой реакционной способности аморфного диоксида кремния. Взаимодействие между компонентами в данной системе носит преимущественно физический характер и реализуется за счет сил Ван-дер-Ваальса, без существенного формирования ковалентных мостиковых связей, что подтверждается сохранением элементного баланса матрицы».

При анализе СЭМ-микрофотографий образца с малым увеличением (100×) визуализируется морфологически стабильная поверхность MXene, характеризующаяся наличием гомогенного слоя мелкодисперсных фаз (рис. 4). Детальное изучение при увеличениях 500× и 1000× позволяет идентифицировать округлые пористые наноструктуры диаметром 50-100 нм, которые равномерно распределены по базальным плоскостям материала. Несмотря на сохранение типичной ламеллярной структуры $Ti_3C_2T_x$, отмечается выраженное снижение гладкости поверхности, что свидетельствует о формировании тонкого наноразмерного покрытия из аморфных фаз кремния или его диоксида.

Согласно результатам энергодисперсионного анализа (ЭДС), в элементном составе композита присутствуют Ti, C, O, F и Si. Количественный анализ фиксирует массовую долю кремния на уровне 6,5 % при содержании титана 77,6 %. Сочетание относительно невысокой концентрации Si с исключительной однородностью его распределения подтверждает гипотезу о том, что кремнийсодержащий модификатор присутствует на поверхности матрицы в виде ультратонкого аморфного слоя, а не в форме изолированных макроскопических агрегатов.

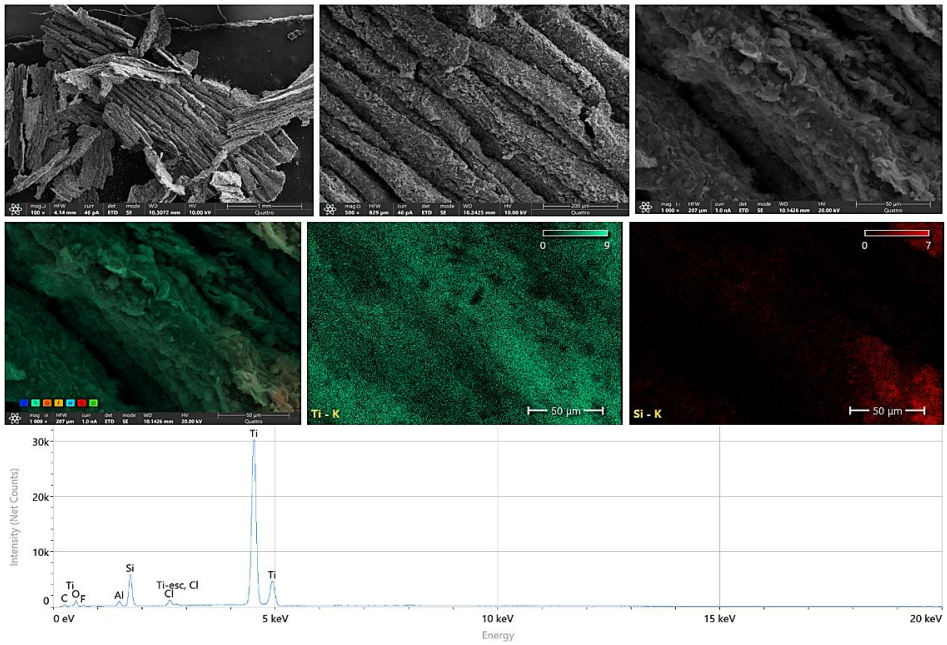


Рисунок 4 – СЭМ-изображение и ЭДС-спектр нанокомпозита $Ti_3C_2T_x$ с аморфным SiO_2 (соотношение 1:10)

Результаты элементного картирования демонстрируют сплошное покрытие поверхности MXene кремнием с минимальной локальной агломерацией. Подобный характер распределения обусловлен высокой степенью дисперсности биогенного прекурсора из рисовой шелухи и наличием активных поверхностных гидроксильных групп. Данные группы способны вступать в химическое взаимодействие с функциональными фрагментами Ti–OH и Ti–O–F на поверхности MXene еще на стадии предварительной обработки и травления.

Дополнительным фактором, обеспечивающим структурную стабильность, выступило использование этанола в процессе механохимического помола. Среда этанола эффективно снизила поверхностную энергию частиц, предотвращая их коалесценцию и обеспечивая равномерную седиментацию на матрице. Таким образом, данный метод модификации позволяет достичь прецизионного изменения свойств поверхности MXene без нарушения его исходной двумерной морфологии.

Исследуемый образец (рис. 5) характеризуется наиболее выраженным развитием микрорельефа поверхности среди всей серии синтезированных материалов.

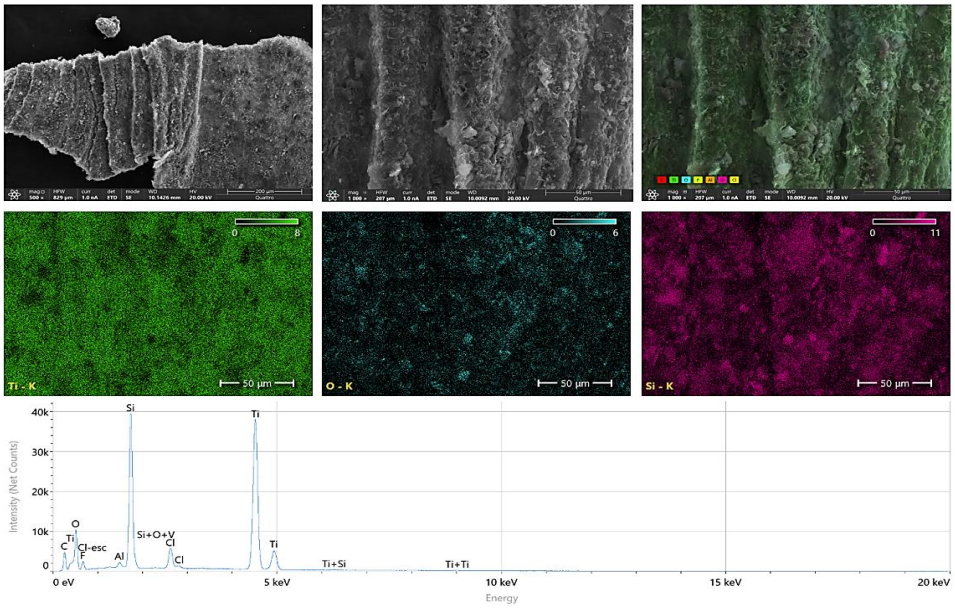


Рисунок 5 – СЭМ-изображение и ЭДС-спектр нанокомпозита $Ti_3C_2T_x$ с аморфным SiO_2 (соотношение 1:2)

При умеренном увеличении (500×) визуализируется плотная сеть нанодисперсных фаз, демонстрирующих высокую степень адгезии к базальным плоскостям MXene. Детальная микроскопия при разрешении 1000× позволяет установить, что модифицирующие частицы обладают неправильной аморфной формой с характерным размерным диапазоном 70-150 нм. Несмотря на тенденцию к образованию локальных агрегатов, крупные макроскопические агломераты отсутствуют, что свидетельствует о высокой эффективности деспергирования. В ряде областей частицы формируют развитую пористую архитектуру, представляющую собой аморфный диоксид кремния, гомогенно осажденный на поверхность проводящей подложки.

Данные энергодисперсионного анализа (ЭДС) фиксируют содержание кремния на уровне 16,2 % масс. при значительной доле кислорода (27,5% масс.), что однозначно верифицирует присутствие SiO_2 в составе поверхностного слоя. Относительный избыток кислорода в сравнении с другими образцами указывает на частичное окисление кремниевого прекурсора в процессе травления или интенсивной механохимической активации. При этом значительная часть Si–O связей, вероятно, трансформировалась в устойчивые гетероядерные мостики типа Si–O–Ti, обеспечивающие прочную химическую фиксацию аморфных фаз на поверхности $Ti_3C_2T_x$. Результаты элементного картирования подтверждают прецизионную однородность распределения кремния по всей площади образца без формирования зон градиентной концентрации. Сравнительный анализ с предыдущим образцом (1:10) показывает, что варьирование доли кремния в исходной реакционной смеси (переход к соотношению 1:2) позволяет управлять плотностью формируемого покрытия и итоговым содержанием активной фазы в композите.

Обобщающий сравнительный анализ всей серии из четырех образцов демонстрирует жесткую детерминированность характера модификации от природы выбранного кремнийсодержащего материала. Установлено, что кристаллический кремний (c-Si) обеспечивает достижение максимальной массовой концентрации целевого элемента, однако сопровождается образованием изолированных крупнодисперсных частиц. В свою очередь, аморфные формы диоксида кремния способствуют формированию сплошных и равномерных покрытий, хотя и при более низком суммарном содержании Si. Наиболее сбалансированные структурные характеристики были достигнуты при использовании биогенных прекурсоров из рисовой шелухи, где кремний представлен мелкодисперсными аморфными частицами с оптимальным сочетанием гомогенности распределения и химической связанности с матрицей.

Наличие характеристических сигналов Si во всех зарегистрированных ЭДС-спектрах служит неоспоримым доказательством успешности модификации поверхности MXene. Возникновение интенсивных пиков Si K\α в энергетическом диапазоне 1,73-1,75 кэВ, коррелирующее со снижением интенсивности фона титана и ростом содержания кислорода, прямо указывает на формирование межфазных слоев Si–O–Ti и SiO_2, типичных для данных гетерогенных систем. Таким образом, разработанный протокол модификации обеспечил надежное закрепление кремнийсодержащих компонентов на поверхности $Ti_3C_2T_x$ посредством комбинированных механизмов: физической адсорбции, механической инкорпорации и образования ковалентных Si–O–Ti мостиков.

Резюмируя полученные данные, можно утверждать, что предложенная методология, сочетающая *in-situ* модификацию на стадии травления с последующим высокоэнергетическим мокрым помолом в среде этанола, является эффективным инструментом создания устойчивых нанокомпозитов Si–MXene. Роль этанола в данном процессе многогранна: он не только обеспечивает качественное диспергирование компонентов, но и функционирует как мягкий восстановитель и антиоксидант, нивелируя деградацию структуры $Ti_3C_2T_x$. Полученная архитектура материалов – многослойные пластины MXene с развитым интерфейсом и равномерно распределенными частицами Si/SiO_2 – определяет их высокую перспективность для применения в передовых электрохимических устройствах хранения энергии, каталитических процессах и в качестве компонентов многофункциональных защитных покрытий».

Заключение

На основании проведенного комплексного исследования по разработке и характеризации нанокомпозитов системы $Ti_3C_2T_x$ /Si можно сделать следующие выводы. Была продемонстрирована высокая эффективность предложенной методики, сочетающей *in-situ* модификацию на стадии травления MAX-фазы с последующей механохимической

активацией в среде этанола. Данный подход позволил обеспечить стабильную инкорпорацию кремнийсодержащих добавок при полном сохранении уникальной многослойной морфологии MXene.

Установлено, что природа и фазовый состав кремниевых прекурсоров являются определяющими факторами в формировании микрорельефа поверхности композита. Кристаллический кремний (c-Si) обеспечивает максимальную концентрацию активного компонента (до 27,8% масс.), однако характеризуется образованием крупных изолированных агломератов. В свою очередь, использование биогенных источников из рисовой шелухи (аморфный SiO_2 и чистый Si) способствует созданию прецизионно равномерных, тонких покрытий с развитой удельной поверхностью.

Данные энергодисперсионного микроанализа (ЭДС) и картирования подтвердили наличие комбинированного механизма фиксации частиц, включающего как физическую адсорбцию и механическое внедрение в межпакетные промежутки, так и химическое взаимодействие с образованием гетероядерных мостиковых связей Si–O–Ti. Подтверждена критическая роль этанола как защитного агента и мягкого восстановителя, предотвращающего деградацию матрицы до диоксида титана (TiO_2). Таким образом, полученные материалы, сочетающие высокую проводимость MXene с функциональными свойствами кремния, обладают значительным потенциалом для применения в высокоэнергоемких анодах литий-ионных аккумуляторов и каталитических системах нового поколения.

Список литературы

1. Burgeoning Silicon/MXene Nanocomposites for Lithium Ion Batteries: A Review / P. Zhang et al // Advanced Functional Materials. – 2024. – № 34(37). https://doi.org/10.1002/adfm.202402307.
2. MXene/Si@SiOx@C Layer-by-Layer Superstructure with Autoadjustable Function for Superior Stable Lithium Storage / Y. Zhang et al // ACS Nano – 2019. – № 13(2). – P. 2167-2175. https://doi.org/10.1021/acsnano.8b08821.
3. Ti3C2Tx MXene Nanosheets as a Robust and Conductive Tight on Si Anodes Significantly Enhance Electrochemical Lithium Storage Performance / M. Xia et al // ACS Nano. – 2020. – № 14(4). – P. 5111-5120. https://doi.org/10.1021/acsnano.0c01976.
4. Sun L. Silicon-Based Materials from Rice Husks and Their Applications / L. Sun, K. Gong // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2001. – № 40(25). – P. 5861-5877. https://doi.org/10.1021/ie010284b.
5. MXene Frameworks Promote the Growth and Stability of LiF-Rich Solid–Electrolyte Interphases on Silicon Nanoparticle Bundles / Y. Yan et al // ACS Applied Materials & Interfaces. – 2020. – № 12(16). – P. 18541-18550. https://doi.org/10.1021/acsami.0c01959.
6. Oboh I. Use of Rice Husk and Rice Husk Ash for Metallurgical Grade Silicon: The Production, Purification and Upgrade / I. Oboh, A. Ihom, I. Markson // International Journal of Engineering and Modern Technology. – 2023. – № 9(1). – P. 83-99. https://doi.org/10.56201/ijemt.v9.no1.2023.pg83.99.
7. Electromagnetic characteristics of biosilica from rice husk / V. Buz'ko et al // E3s Web of Conferences. – 2021. – № 263. – P. 01013. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126301013.
8. Chen J. Thermal contact resistance across nanoscale silicon dioxide and silicon interface / J. Chen, G. Zhang, B. Li // Journal of Applied Physics. – 2012. – № 112(6). https://doi.org/10.1063/1.4754513.
9. 5L-Scale Magnesio-Milling Reduction of Nanostructured SiO2 for High Capacity Silicon Anodes in Lithium-Ion Batteries / W. Cho et al // Nano Letters. – 2016. – № 16(11). – P. 7261-7269. https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.6b03762.
10. Fiber-cement composite using rice stalk fiber and rice husk ash: Mechanical and physical properties / M. Ghofrani et al // Journal of Composite Materials. – 2014. – № 49(26). – P. 3317-3322. https://doi.org/10.1177/0021998314561813.
11. Hallmann S. The Mechanochemical Formation of Functionalized Semiconductor Nanoparticles for Biological / S. Hallmann, M. Fink, B. Mitchell // Electronic and Superhydrophobic Surface Applications. – 2011. – P. 129-142. https://doi.org/10.1002/9781118144602.ch13.
12. Heintz A. Silicon nanoparticles with chemically tailored surfaces. / A. Heintz et al // Applied Organometallic Chemistry. – 2004. – № 24(3). – P. 236-240. https://doi.org/10.1002/aoc.1602.

13. Spectroscopic characterization of quantum-sized TiO2 supported on silica: influence of size and TiO2-SiO2 interface composition / G. Lassaletta et al // The Journal of Physical Chemistry. – 1995. – № 99(5). – P. 1484-1490. https://doi.org/10.1021/j100005a019.
14. A structural investigation relating to the pozzolanic activity of rice husk ashes / D. Nair et al // Cement and Concrete Research. – 2008. – № 38(6). – P. 861-869. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.10.004.
15. Enhancing Effect of SiOx Monolayer Coverage of TiO2 on the Photoinduced Oxidation of Rhodamine 6G in Aqueous Media / H. Tada et al // The Journal of Physical Chemistry B. – 1998. – № 102(33). – P. 6360-6366. https://doi.org/10.1021/jp980892d.
16. Comparison of high temperature chars of wheat straw and rice husk with respect to chemistry, morphology and reactivity / A. Trubetskaya et al // Biomass and Bioenergy. – 2016. – № 86. – P. 76-87. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.01.017.

Информация о финансировании: *исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № BR24992873 «Разработка эффективных нанокомпозитов на основе MXene для создания нового поколения устройств накопления электрической энергии»).*

М. Әліпұлы*, Ш. Султахан, Е. Есжан, Ұ. Жантикеев, Қ. Шакенов
Satbayev Univeristy,
050013, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Сатпаев к-сі, 22
*e-mail: mukhtaralipuly@gmail.com

МЕХАНОХИМИЯЛЫҚ ӘДІСПЕН АЛЫНҒАН $Ti_3C_2T_x$/SI НАНОКОМПОЗИТТЕРІНІҢ САЛЫСТЫРМАЛЫ ТАЛДАУЫ

Аңдатпа: *Бұл зерттеу әртүрлі генезистегі кремний құрамды модификаторлар мен екі өлшемді титан карбидтері ($Ti_3C_2T_x$ MXene) негізіндегі гетероқұрылымдардың түзілуінің іргелі заңдылықтарын зерттеуге арналған. Жұмыстың өзектілігі электрохимиялық циклдеу процестерінде кремнийдің едәуір көлемдік өзгерістерін төмендетуге қабілетті тұрақты анодтық материалдарды жасау қажеттілігімен байланысты. Прекурсорлар ретінде кристалды кремний, күріш қауызынан алынған биогенді кремний және дисперстілігі түрлі аморфты кремний диоксиді зерттелді. Нанокомпозиттер синтезі этанолдың тотықсыздандырғыш ортасында жоғары энергиялы механохимиялық активтендіру әдісімен жүзеге асырылды. Сканирлеуші электрондық микроскопия және энергия-дисперсиялық рентгендік спектроскопия әдістерімен жүргізілген кешенді талдау биогенді аморфты модификаторларды қолдану MXene ламеллаларының жабынының барынша дәл біртектілігін қамтамасыз ететінін көрсетті. Интерфейсті тұрақтандырудың негізгі факторы биогенді шикізат бетіндегі белсенді гидроксил топтарының болуымен инициацияланатын ковалентті Si–O–Ti көпірлік байланыстарының түзілуі екендігі анықталды. Этанолды дисперсиялық орта ретінде қолдану титан матрицасының деградациясы мен тотығуын тиімді болдырмай, композиттің ламеллярлы архитектурасының сақталуына ықпал ететіні дәлелденді. Алынған нәтижелер литий-ионды энергия сақтау жүйелері мен функционалды каталитикалық жабындар үшін жоғары тиімді жаңа буын электродтарын жасаудың ғылыми-технологиялық базасын кеңейтеді.*

Түйін сөздер: *MXene, $Ti_3C_2T_x$, нанокомпозиттер, кремний, биогенді кремний диоксиді, күріш қауызы, дымқыл шарлы ұнтақтау, электрондық микроскопия.*

M. Alipuly*, S. Sultakhan, Y. Yeszhan, U. Zhantikeyev, K. Shakenov
Satbayev Univeristy,
050013, Republic of Kazakhstan, Almaty, 22 Satbayev street
*e-mail: mukhtaralipuly@gmail.com

COMPARATIVE ANALYSIS OF $Ti_3C_2T_x$/SI NANOCOMPOSITES OBTAINED BY A MECHANOCHEMICAL METHOD

This study investigates the fundamental regularities of heterostructure formation based on two-dimensional titanium carbides ($Ti_3C_2T_x$ MXene) and silicon-containing modifiers of various origins. The relevance of the work is driven by the necessity to develop stable anode materials capable of mitigating the significant volume changes of silicon during electrochemical cycling. Crystalline silicon, biogenic silicon derived from rice husks, and amorphous silicon dioxide with variable dispersity were examined as precursors.The synthesis of nanocomposites was carried out using high-energy mechanochemical activation in a reducing ethanol medium. A comprehensive analysis using scanning electron microscopy and energy-dispersive X-ray spectroscopy revealed that the use of biogenic amorphous modifiers provides the most precise coating

uniformity of MXene lamellae. It was found that the key factor in interface stabilization is the formation of covalent Si–O–Ti bridge bonds, initiated by the presence of active hydroxyl groups on the surface of the biogenic raw material.It was established that the use of ethanol as a dispersion medium effectively prevents degradation and oxidation of the titanium matrix, contributing to the preservation of the composite's lamellar architecture. The results obtained expand the scientific and technological base for the development of high-performance next-generation electrodes for lithium-ion energy storage systems and functional catalytic coatings.

Key words: *MXene, $Ti_3C_2T_x$, nanocomposites, silicon, biogenic silicon dioxide, rice husk, wet ball milling, electron microscopy.*

Сведения об авторах

Мұхтар Әліпұлы* – докторант кафедры «Материаловедение, нанотехнологии и инженерная физика», Satbayev Univeristy, Республика Казахстан; e-mail: mukhtaralipuly@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6265-6238.

Шынгысхан Султахан – магистр технических наук, научный сотрудник, Satbayev Univeristy, Республика Казахстан; e-mail: shynggyskhan.1@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2195-755X.

Елриза Есжан – докторант кафедры «Материаловедение, нанотехнологии и инженерная физика», Satbayev Univeristy, Республика Казахстан; e-mail: yelriza.yeszhan@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4523-1211.

Улан Жантикеев – докторант кафедры «Материаловедение, нанотехнологии и инженерная физика», Satbayev Univeristy, Республика Казахстан; e-mail: nurlybekov.ulan@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1200-2340.

Калижан Шакенов – PhD, ассоциированный профессор, кафедра «Энергетика», Satbayev University, Республика Казахстан; e-mail: k.shakenov@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9722-1605.

Авторлар туралы мәліметтер

Мұхтар Әліпұлы* – «Материалтану, нанотехнология және инженерлік физика» кафедрасының докторанты, Satbayev Univeristy, Қазақстан Республикасы; e-mail: mukhtaralipuly@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6265-6238.

Шыңғысхан Султахан – техникалық ғылымдар магистрі, ғылыми қызметкер, Satbayev Univeristy, Қазақстан Республикасы; e-mail: shynggyskhan.1@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2195-755X.

Елриза Есжан – «Материалтану, нанотехнология және инженерлік физика» кафедрасының докторанты, Satbayev Univeristy, Қазақстан Республикасы; e-mail: yelriza.yeszhan@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4523-1211.

Ұлан Жантикеев – «Материалтану, нанотехнология және инженерлік физика» кафедрасының докторанты, Satbayev Univeristy, Қазақстан Республикасы; e-mail: nurlybekov.ulan@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1200-2340.

Қалижан Шакенов – PhD, қауымдастырылған профессор, «Энергетика» кафедра, Satbayev University, Қазақстан Республикасы; e-mail: k.shakenov@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9722-1605.

Information about the authors

Mukhtar Alipuly* – doctoral student of the department «Materials science, nanotechnology and engineering physics», Satbayev Univeristy, Republic of Kazakhstan; e-mail: mukhtaralipuly@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6265-6238.

Shynggyskhan Sultakhan – master in technical sciences, researcher; Satbayev Univeristy, Republic of Kazakhstan; e-mail: shynggyskhan.1@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2195-755X.

Yelriza Yeszhan – doctoral student of the department «Materials science, nanotechnology and engineering physics», Satbayev Univeristy, Republic of Kazakhstan; e-mail: yelriza.yeszhan@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4523-1211.

Ulan Zhantikeyev – doctoral student of the department «Materials science, nanotechnology and engineering physics», Satbayev Univeristy, Republic of Kazakhstan; e-mail: nurlybekov.ulan@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1200-2340.

Kalizhan Shakenov – PhD, associated professor, Department of Power Engineering, Satbayev Univeristy, Republic of Kazakhstan; e-mail: k.shakenov@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9722-1605.

Поступила в редакцию 08.01.2026
Поступила после доработки 05.03.2026
Принята к публикации 06.03.2026

ttps://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-76

МРНТИ 61.51.29

BY 4.0
Check for updates

A.M. Belkozhayev[1]*, A. Abaildayev[1], B.D. Kossalbayev[1,2,3], N. Gizatullina[1], G. Toleutay[1,4],*
[1]Geology and Oil-Gas Business Institute Named After K. Turyssov, Satbayev University,
050013, Republic of Kazakhstan, Almaty, 22a Satpaev str.
[2]Al-Farabi Kazakh National University,
050040, Kazakhstan, Almaty, Al-Farabi Ave. 71,
[3]Ecology Research Institute, Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh Turkish University,
Turkistan 161200, Kazakhstan
[4]University of Tennessee, Knoxville, TN 37996, USA
*e-mail: a.belkozhayev@satbayev.university

COMPARATIVE STRUCTURAL AND PHYSICOCHEMICAL ANALYSIS OF PLANT-DERIVED CELLULOSE FROM AGRICULTURAL RESIDUES AND BACTERIAL CELLULOSE

Abstract: *This study presents a comparative investigation of the structural and physicochemical properties of plant-derived cellulose extracted from agricultural residues (wheat, maize, cotton, and rice straw) and bacterial cellulose synthesized via fermentation using Komagataeibacter xylinus (K. xylinus). Plant-derived cellulose was obtained through an $AlCl_3$-glycerol pretreatment followed by alkaline purification, while bacterial cellulose was produced under static cultivation in a Hestrin – Schramm medium. The morphology, chemical structure, and thermal behavior of the resulting celluloses were systematically characterized using scanning electron microscopy (SEM), Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy, and thermogravimetric analysis (TGA/DTG). SEM analysis revealed that plant-derived cellulose exhibits elongated microfibrillar structures with fiber diameters ranging from 5 to 25 μm, accompanied by surface microcracks and pores resulting from effective removal of lignin and hemicellulose. In contrast, bacterial cellulose formed a dense, multilayered, and highly interconnected fibrillar network with significantly smaller fiber diameters (2.7-9.7 μm), reflecting its high structural uniformity and purity. FTIR spectra confirmed that both cellulose types share the same fundamental chemical backbone, while the weakening or absence of lignin-related absorption bands indicated efficient delignification and superior chemical purity in bacterial cellulose. Overall, the results demonstrate that plant-derived and bacterial cellulose possess distinct yet complementary structural characteristics. Plant-derived cellulose provides a fibrous structural framework, whereas bacterial cellulose offers a nanostructured network, suggesting their potential combined use in sustainable biopolymer composites and environmentally friendly packaging materials.*

Key words: *agricultural biomass; cellulose extraction; bacterial cellulose; sustainable packaging; FTIR; TGA; SEM.*

Introduction

In recent years, issues related to environmental sustainability, ecosystem preservation, and the reduction of carbon footprints have gained increasing global attention [1, 2]. In this context, there has been a growing interest in materials derived from renewable and biodegradable resources as viable alternatives to petroleum-based synthetic polymers. Among these materials, cellulose-based biopolymers have attracted particular interest due to their environmental friendliness, biocompatibility, and widespread availability [3, 4]. Cellulose is the most abundant biopolymer found in nature and serves as the primary structural component of plant cell walls [5]. Agricultural residues, including wheat, maize, rice, and cotton straw, represent inexpensive and cellulose-rich raw materials. Since such residues are commonly disposed of through open burning or other waste management practices, their valorization through recycling offers both environmental and economic advantages [6, 7]. Nevertheless, the presence of additional constituents such as lignin and hemicellulose within plant-derived biomass complicates the isolation of cellulose in its pure form, necessitating the development and application of efficient processing and pretreatment strategies [8]. In recent years, significant research efforts have been devoted to the development of environmentally friendly and efficient approaches for cellulose extraction [9]. Compared with conventional acid alkali treatment methods, systems based on ionic liquids and organic solvents including those employing glycerol and metal salts enable more effective lignin removal while preserving the structural integrity of cellulose [10, 11]. Such strategies are consistent with the

©A.M. Belkozhayev, A. Abaildayev, B.D. Kossalbayev, N. Gizatullina, G. Toleutay, 2026

principles of green chemistry and contribute to reducing the environmental burden associated with biomass processing [12]. In addition to plant-derived cellulose, bacterial cellulose has recently attracted considerable scientific and practical interest due to its highly pure nanofibrous structure and its biosynthesis by bacteria belonging to the Komagataeibacter genus, which results in cellulose free of lignin and hemicellulose (Figure 1) [13-15]. Bacterial cellulose is characterized by a high degree of crystallinity, excellent mechanical strength, superior water-holding capacity, and outstanding barrier properties, making it a promising material for applications in packaging, biomedicine, and biocomposite development [16]. Although plant-derived and bacterial celluloses differ in their structural organization, their combined use allows for complementary enhancement of material properties [14, 16]. Plant-based cellulose contributes a fibrous structural framework and cost-effectiveness, whereas bacterial cellulose may act as a nanostructured reinforcing component, potentially contributing to improved structural and barrier properties of biopolymer matrices. Consequently, a comparative investigation of the structural and physicochemical characteristics of these two types of cellulose represents an important scientific objective for the development of environmentally friendly and high-performance biopolymeric materials [17, 18]. The aim of this study is to conduct a comprehensive investigation and comparative evaluation of the structural, chemical, and thermal properties of plant-derived cellulose obtained from agricultural biomass and bacterial cellulose synthesized via fermentation, as well as the biopolymeric materials developed on their basis. The findings of this work are expected to provide a scientific foundation for the design of environmentally friendly packaging materials and biocomposites, while also contributing to the valorization of agro-industrial residues into value-added products.

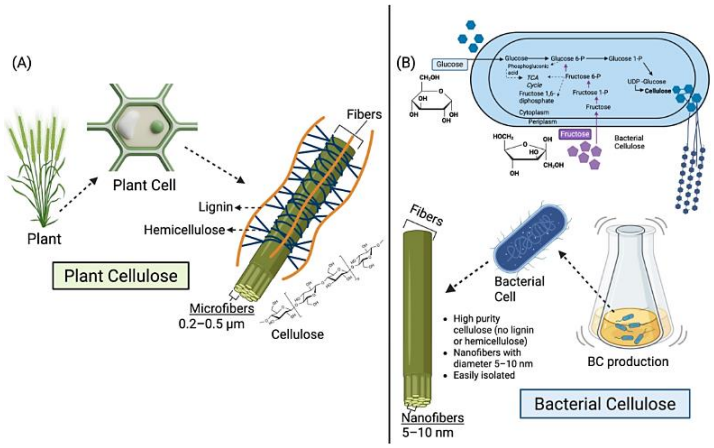


Figure 1 – Schematic illustration of the structural organization of plant-derived cellulose (A) and the biosynthesis and nanofibrillar structure of bacterial cellulose (B). (B) Created with BioRender.com (License No. SN298B73AX)

Materials and Methods

Raw materials and reagents

Agricultural residues, including wheat straw, maize stalks, cotton stalks, and rice straw, were used as raw materials for the extraction of plant-derived cellulose. All biomass samples were thoroughly cleaned to remove foreign impurities, repeatedly washed with running water, and subsequently dried prior to further processing. Glycerol, aluminum chloride ($AlCl_3$), sodium hydroxide (NaOH), ethanol, and other chemical reagents used in this study were of analytical grade. Distilled water was used in all experimental procedures.

Biomass pretreatment and chemical processing for plant-derived cellulose extraction

The overall experimental workflow for the extraction, purification, and characterization of plant-derived and bacterial cellulose is illustrated in Figure 2. Dried agricultural residues were mechanically milled to obtain particles with an average size of 1-2 mm. The ground biomass was sieved to ensure a uniform particle size distribution and stored in a dry environment prior to chemical processing. Chemical pretreatment was performed using an $AlCl_3$ – glycerol system to facilitate cellulose liberation and promote lignin removal. The reaction medium consisted of 80% glycerol, 20% distilled water, and 0.1 M $AlCl_3$ as a catalyst. The solid-to-liquid ratio was maintained at 1:10.

Pretreatment was carried out under a two-step autoclave regime: 120°C for 20 min followed by 132°C for 30 min. After pretreatment, the reaction mixture was separated into solid and liquid phases by vacuum filtration. The solid fraction enriched in cellulose fibers was subjected to further purification. In the present study, the focus was primarily on the structural and physicochemical characterization of the extracted cellulose. Therefore, the quantitative yield of cellulose from different biomass sources was not determined.

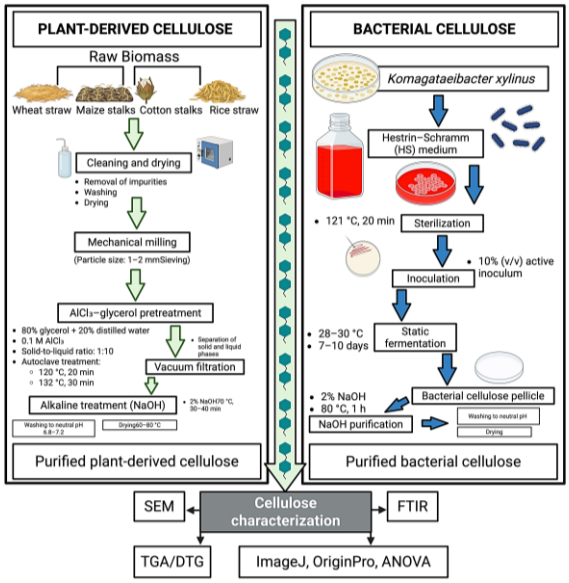


Figure 2 – Schematic workflow of plant-derived and bacterial cellulose production, purification, and subsequent characterization. Created with BioRender.com (License No. RB298AZ6KT)

Alkaline purification and drying of plant-derived cellulose

The obtained fibrous material was repeatedly washed with distilled water at 80°C and subsequently treated with 96% ethanol to remove residual waxes and resinous substances. To ensure complete removal of remaining lignin, the samples were subjected to alkaline treatment in a 2% (w/v) NaOH solution at 70°C for 30-40 min. After alkaline processing, the samples were thoroughly rinsed with distilled water until a neutral pH (6.8-7.2) was achieved. The purified cellulose fibers were then dried at 60-80 °C and stored in sealed containers prior to characterization.

Production of bacterial cellulose

Bacterial cellulose was produced using the K. xylinus strain. Fermentation was carried out in a standard Hestrin – Schramm (HS) medium composed of glucose (20 g/L), peptone (5 g/L), yeast extract (5 g/L), Na_2HPO_4 (2.7 g/L), and citric acid (1.15 g/L). The initial pH of the medium was adjusted to 5.0-5.5 prior to sterilization. The culture medium was sterilized in an autoclave at 121 °C for 20 min. After cooling to room temperature, an active inoculum (10%, v/v) was aseptically added. Fermentation was conducted under static conditions at 28-30°C for 7-10 days, during which a gelatinous bacterial cellulose pellicle formed at the air-liquid interface.

Purification and drying of bacterial cellulose

The obtained bacterial cellulose pellicles were thoroughly washed with distilled water and subsequently treated with a 2% (w/v) NaOH solution at 80 °C for 1 h to remove bacterial cells and residual proteins. The samples were then rinsed repeatedly with distilled water until a neutral pH was reached and dried at 40°C prior to further analysis.

Morphological analysis

The morphological features of plant-derived and bacterial cellulose samples were examined using scanning electron microscopy. Dried samples were mounted on aluminum stubs and analyzed under low-vacuum conditions at an accelerating voltage of 5-15 kV. Images were acquired over a magnification range of 100× to 20,000×.

Fourier transform infrared spectroscopy

FTIR spectroscopy was employed to investigate the chemical structure of the cellulose samples. Spectra were recorded in the range of 4000-400 cm^{-1} with a spectral resolution of 4 cm^{-1} and 32 scans per sample. The obtained spectra were used to identify characteristic functional groups of cellulose and to evaluate the efficiency of the delignification process.

Thermal analysis

The thermal stability of the cellulose samples was assessed using TGA and derivative thermogravimetric analysis (DTG). Measurements were performed under a nitrogen atmosphere from room temperature to 600°C at a heating rate of 10°C/min. The sample mass ranged between 10 and 15 mg.

Statistical analysis

Experimental data processing and graphical visualization were carried out using OriginLab Pro 2024 software. Quantitative analysis of fiber diameters was performed using ImageJ software. Statistical significance was evaluated using one-way analysis of variance (ANOVA) and Student's t-test, with $p < 0.05$ considered statistically significant.

Results

Morphological analysis of wheat straw derived and bacterial cellulose

The morphological features of cellulose fibers isolated from wheat straw via an organic pretreatment approach were examined using scanning electron microscopy (Figure 3). SEM micrographs revealed that the fibers exhibit a clearly elongated morphology and form an interconnected network structure. Such morphological characteristics are typical of plant-derived cellulose and may contribute to the structural stability of the material. Quantitative analysis indicated that the diameter of cellulose fibers obtained from wheat straw varied within the range of 5-25 μm, which is consistent with values reported for natural plant-based cellulose. Notably, one representative SEM measurement showed a fiber diameter of approximately 5.25 μm, suggesting a relatively uniform microfibrillar structure. At higher magnifications, the fiber surfaces displayed the presence of microcracks and small pores. These morphological features are attributed to the removal of lignin and hemicellulose during organic pretreatment and subsequent alkaline purification. The resulting porous surface increases the specific surface area of the fibers and may enhance their adhesion to polymeric and biological matrices, potentially contributing to improved structural stability of composite materials. The SEM analysis confirmed that cellulose derived from wheat straw possesses high structural integrity and a homogeneous microfibrillar morphology. These characteristics demonstrate its potential as an environmentally friendly, recyclable raw material suitable for the development of biopolymer composites intended for sustainable packaging applications.

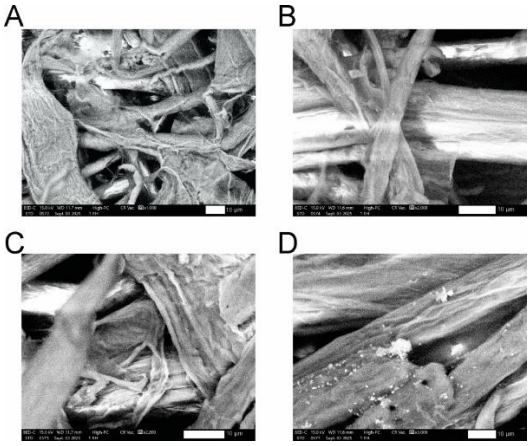


Figure 3 – Morphological structure of cellulose fibers obtained from wheat straw via organic pretreatment. The fibers exhibit a distinctly elongated morphology and an interconnected network structure. The presence of microcracks and small pores on the fiber surface indicates the effective removal of lignin and hemicellulose.
Magnification scales: (A) ×1000, (B) ×2000, (C) ×2200, (D) ×3000.

The morphological characteristics of bacterial cellulose (BC) synthesized via fermentation were examined using scanning electron microscopy (SEM) (Figure 4). SEM observations revealed that BC forms a dense and highly interconnected fibrillar network with a compact, mesh-like architecture. At ×1500 magnification (Figure 4A), the BC fibers appeared extensively intertwined, forming compact microfibrillar bundles and multilayered arrangements. Quantitative measurements indicated that the fiber diameters ranged within from 2.7 to 9.7 μm., reflecting the formation of well-developed microfibrillar structures. Such dense entanglement and bundle formation contribute to the

development of a three-dimensional network, which is closely associated with the high structural stability and water-holding capacity of bacterial cellulose. At a higher magnification of ×2000 (Figure 4B), individual fibrils and their preferential orientation became more clearly distinguishable. At this scale, a broader distribution of fiber diameters was observed, suggesting partial fibril aggregation and hierarchical structural organization within the cellulose network. The fiber surfaces appeared smooth and homogeneous, with no observable bacterial cells or foreign impurities, confirming the effectiveness of the purification process. The SEM analysis demonstrates that bacterial cellulose synthesized by K. xylinus exhibits a compact, uniform, and well-organized fibrillar morphology. These structural features highlight the high degree of molecular ordering and make bacterial cellulose a promising material for applications in sustainable food packaging, biomedical materials, tissue engineering scaffolds, and environmentally friendly biopolymer composites.

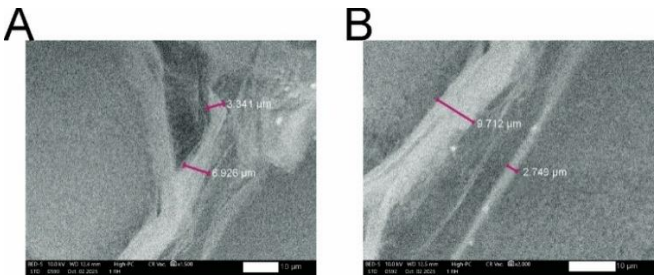


Figure 4 – Morphological structure of bacterial cellulose observed by scanning electron microscopy. The images reveal a dense, interconnected fibrillar network characteristic of bacterial cellulose. Magnification: (A) ×1500 and (B) ×2000

The morphological architecture of cellulosic materials plays a crucial role in determining their functional performance. In this study, clear morphological differences were observed between plant-derived and bacterial cellulose. Cellulose isolated from wheat straw exhibited a microfibrillar structure that provides bulk mechanical strength, whereas bacterial cellulose formed a dense, nanoscale, interconnected fibrillar network that enhances structural reinforcement. These complementary morphological features indicate that the combined use of plant-derived and bacterial cellulose is a promising approach for developing environmentally friendly packaging materials with improved mechanical and functional properties.

FTIR analysis

FTIR spectroscopy was employed to examine the chemical structure and functional groups of plant-derived celluloses obtained from agricultural biomass, including wheat, maize, cotton, and rice straw, as well as bacterial cellulose synthesized via fermentation. FTIR analysis enabled the evaluation of cellulose chemical purity, assessment of lignin and hemicellulose removal efficiency, and comparison of structural differences between plant-based and bacterial cellulose samples.

FTIR spectra of plant-derived celluloses (wheat, maize, cotton, and rice)

The FTIR spectra of celluloses isolated from wheat, maize, cotton, and rice straw exhibited highly similar profiles, confirming the presence of characteristic absorption bands associated with cellulose. A broad band observed in the region of 3300-3400 cm^{-1} corresponds to the stretching vibrations of hydroxyl (–OH) groups, indicating the presence of extensive intermolecular hydrogen bonding within the cellulose macromolecules (Figure 5). The absorption band located near 2890 cm^{-1} is attributed to aliphatic C–H stretching vibrations, confirming the preservation of the cellulose hydrocarbon backbone. A pronounced peak around 1050 cm^{-1} is associated with C–O–C stretching vibrations of β-1,4-glycosidic linkages, while the band observed near 897 cm^{-1} further confirms the presence of β-glycosidic bonds. These features provide clear evidence of the cellulosic nature of the extracted materials. The absence or very weak intensity of aromatic vibration bands typically associated with lignin in the range of 1510-1600 cm^{-1} indicates the effective removal of lignin and hemicellulose during organic pretreatment and alkaline purification. Additionally, a weak band observed near 1640 cm^{-1} corresponds to the deformation vibrations of bound water, reflecting the hygroscopic character of cellulose. The FTIR results demonstrate that celluloses obtained from wheat, maize, cotton, and rice straw exhibit similar chemical compositions and represent sufficiently purified cellulose materials.

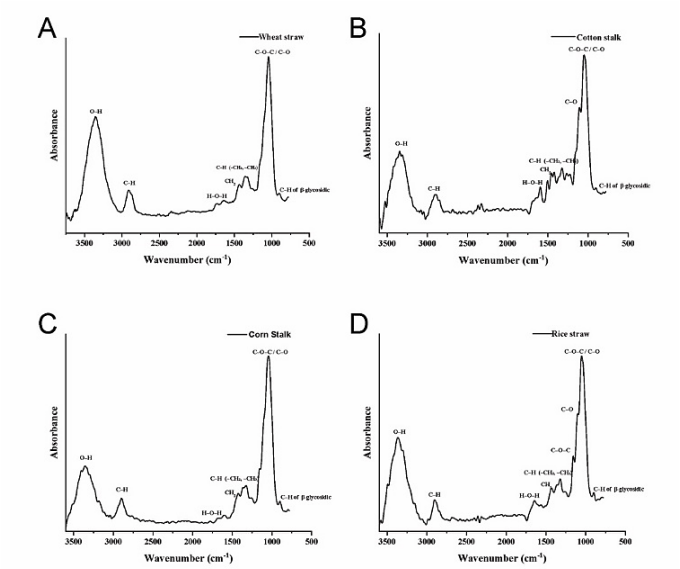


Figure 5 – FTIR spectra of cellulose extracted from different agricultural residues:
(A) wheat straw, (B) cotton stalk, (C) corn stalk, and (D) rice straw. All spectra exhibit characteristic cellulose absorption bands, including O–H stretching vibrations (3300–3400 cm^{-1}), C–H stretching vibrations (~2900 cm^{-1}), C–O–C/C–O stretching vibrations (~1050 cm^{-1}), and β-glycosidic bond vibrations (~897 cm^{-1}). The absence of lignin-related aromatic bands (1510–1600 cm^{-1}) indicates effective removal of non-cellulosic components during pretreatment.

FTIR spectrum of bacterial cellulose

The FTIR spectrum of BC exhibited the same characteristic cellulose-related absorption bands observed for plant-derived celluloses. The broad –OH stretching band in the range of 3300-3400 cm^{-1}, together with the C–H stretching vibration near 2890 cm^{-1}, indicates a well-developed hydrogen-bonding network within the bacterial cellulose structure (Figure 6) .In addition, the pronounced peaks observed at approximately 1050 cm^{-1} and 897 cm^{-1} confirm the presence of an ordered structure based on β-1,4-glycosidic linkages. The complete absence of absorption bands associated with lignin and hemicellulose in the bacterial cellulose spectrum further demonstrates its high chemical purity and confirms its biosynthetic origin as a naturally produced cellulose.

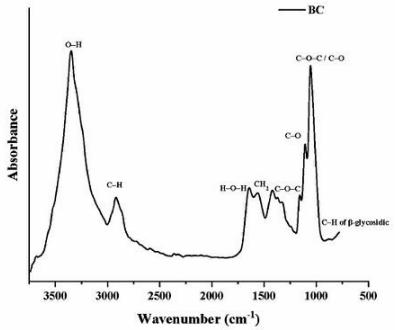


Figure 6 – FTIR spectrum of bacterial cellulose synthesized via fermentation

Compared to plant-derived celluloses, the FTIR spectrum of bacterial cellulose exhibited more distinct and intense absorption bands, indicating a higher degree of structural order, which is consistent with the well-organized nanofibrillar structure of bacterial cellulose (Figure 7). FTIR analysis confirmed that plant-derived and bacterial celluloses share the same fundamental chemical nature; however, notable differences were observed in their purity levels and structural organization. Although organic pretreatment effectively removed most lignin and hemicellulose from plant-based celluloses, bacterial cellulose demonstrated superior chemical purity and structural homogeneity. Overall, the FTIR results verify that both plant-derived celluloses obtained from agricultural biomass and bacterial cellulose are chemically suitable to produce biopolymer composites and environmentally friendly packaging materials.

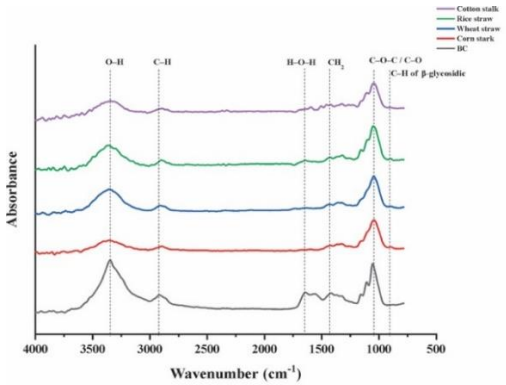
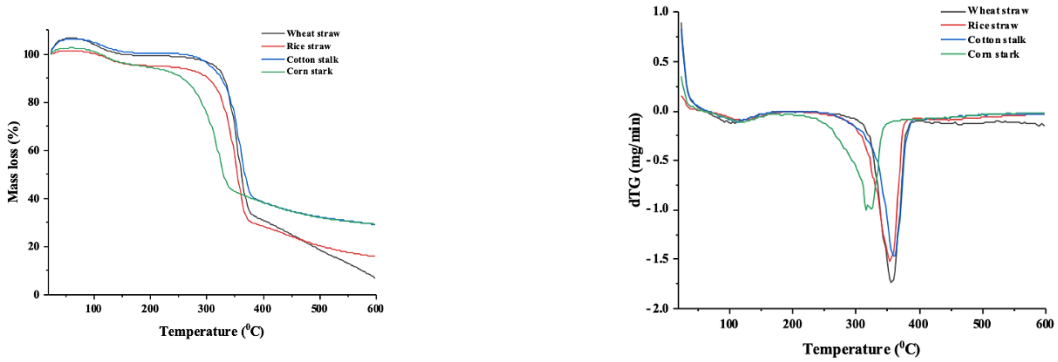


Figure 7 – Overlaid FTIR spectra of plant-derived celluloses obtained from wheat, maize, cotton, and rice straw, together with bacterial cellulose

Thermal analysis

Thermogravimetric analysis (TGA) and derivative thermogravimetric analysis (DTG) were performed to evaluate the thermal stability and degradation behavior of celluloses obtained from agricultural residues (wheat, maize, cotton, and rice straw) and bacterial cellulose. The analysis was conducted in a nitrogen atmosphere within the temperature range of 50-600°C (Figure 8). The TGA curves revealed a characteristic three-stage thermal degradation pattern typical for cellulose-based materials. The first stage, occurring at 50-120°C, corresponds to the evaporation of physically adsorbed moisture, resulting in a mass loss of approximately 5-8%. The second stage, observed in the 250-380°C range, represents the main thermal degradation region associated with the depolymerization of cellulose chains and the cleavage of β-1,4-glycosidic bonds, where the major mass loss (60-70%) occurs. The third stage, above 400°C, corresponds to the slow decomposition of residual carbonaceous structures and mineral components.

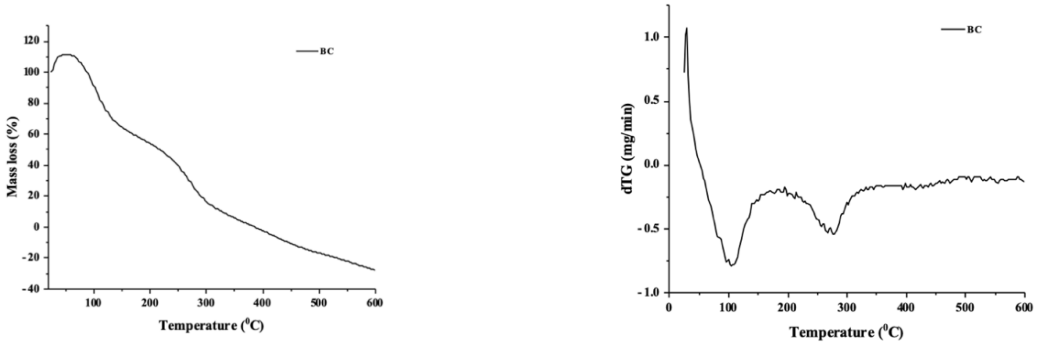
DTG analysis provided a more precise description of the degradation kinetics. The maximum degradation rate (Tmax) for most plant-derived cellulose samples was observed within the 330-360 °C range. Among the studied samples, cellulose obtained from cotton stalks showed the highest thermal stability with a Tmax close to 360°C, which can be attributed to its more homogeneous fiber structure and higher structural organization. Cellulose derived from maize stalks exhibited a Tmax around 350°C, while wheat straw cellulose showed moderate thermal stability with the main degradation occurring between 350-370°C. In contrast, cellulose from rice straw demonstrated a broader degradation profile and higher residual mass, which is likely associated with the presence of inorganic components such as silica (SiO_2).



(A) (B)

Figure 8 – Thermal properties of celluloses obtained from agricultural biomass:
(A) TGA curve showing mass loss as a function of temperature;
(B) DTG curve showing the temperature dependence of the degradation rate

The thermogravimetric behavior of bacterial cellulose (BC) showed a similar multistage degradation pattern (Figure 9). An initial mass loss of 8-12% was observed in the 30-120°C range due to the evaporation of bound water, reflecting the high water-holding capacity of BC. The main degradation stage occurred between 300-380°C, with a Tmax in the range of 330-355°C, corresponding to the decomposition of the cellulose backbone. Above 400°C, the degradation rate decreased significantly, indicating the formation of carbonaceous residues.



(A) (B)

Figure 9 – Thermogravimetric and derivative thermogravimetric analysis of bacterial cellulose:
(A) TGA curve showing mass change as a function of temperature;
(B) DTG curve showing the temperature dependence of the degradation rate

The results demonstrate that both plant-derived and bacterial celluloses exhibit relatively high thermal stability, with the main degradation occurring around 330-360°C. The slightly higher thermal stability of bacterial cellulose is associated with its high structural order, uniform nanofibrillar morphology, and absence of lignin and hemicellulose. These findings confirm that both types of cellulose possess sufficient thermal stability for potential applications in biopolymer composites and sustainable packaging materials.

Discussion

The comparative SEM and FTIR analyses provide insight into how the origin and biosynthesis pathways of cellulose influence its structural organization and potential functionality. The observed distinctions between plant-derived and bacterial cellulose reflect fundamentally different formation mechanisms, with plant cellulose originating from lignocellulosic cell walls and bacterial cellulose being biosynthesized in situ as a highly ordered fibrillar network. From a materials science perspective, such origin-dependent structural organization is critical, as microfibrillar architectures are typically associated with bulk mechanical reinforcement, whereas densely interconnected nanofibrillar networks are more effective in providing nanoscale reinforcement, enhanced interfacial interactions, and improved functional performance in composite systems. The present study highlights the complementary rather than competitive roles of plant-derived and bacterial cellulose, emphasizing their combined potential for the rational design of sustainable biopolymer materials.

These findings are supported by recent studies. For example, Efthymiou et al. (2022) demonstrated, through SEM and FTIR analyses, that bacterial cellulose exhibits a well-developed network-like nanofibrillar structure with a high degree of structural organization and crystallinity [19]. Similarly, Yilmaz et al. (2024) reported that bacterial cellulose production by K. xylinus can be effectively optimized and emphasized that the resulting BC morphology and structural properties are strongly dependent on the cultivation medium and fermentation conditions [20]. Furthermore, in line with the solvent-based approach employed in the present study using an $AlCl_3$ – glycerol system, Zhao et al. (2025) reported that glycerol-based pretreatment facilitates lignin redistribution and fiber defibrillation, resulting in pronounced alterations in cellulose structure and enhanced accessibility [21]. Consistently, our FTIR results revealed a noticeable weakening of lignin-related absorption bands, confirming the effectiveness of glycerol-assisted pretreatment in reducing lignin interference and promoting cellulose structural reorganization.

From an applied perspective, Sun et al. (2022) demonstrated that the three-dimensional reticulated nanofibrillar structure of bacterial cellulose provides an effective matrix for the incorporation of bioactive components. SEM analysis revealed a highly uniform fibrillar structure of bacterial cellulose – based composite films, suggesting potential advantages for their structural organization. These observations complement the findings of the present study, as our SEM results likewise indicate a dense and interconnected fibrillar network in bacterial cellulose, suggesting its potential role as a nanostructural reinforcing phase in composite materials [22]. Jiang et al. (2022) investigated the development of cellulose-based paper materials for food packaging through multilayer functional surface modification. Their study demonstrated that coating cellulose paper with polylactic acid (PLA) significantly enhanced tensile strength, while the introduction of nanoscale

SiO_2/stearic acid layers imparted superhydrophobic behavior and markedly improved gas, moisture, and oil barrier properties [23]. The authors emphasized that the inherent fibrous structure of cellulose paper provides the primary mechanical framework, whereas nanoscale surface and structural features play a critical role in improving functional performance. These observations are in line with the findings of the present study, where clear structural distinctions were identified between plant-derived and bacterial cellulose. In our work, plant-derived cellulose exhibited a microfibrillar architecture that mainly contributes bulk mechanical support, while bacterial cellulose formed a dense and highly interconnected nanofibrillar network, as revealed by SEM analysis. Such a nanostructured morphology suggests that bacterial cellulose may contribute to property enhancement at the nanostructural level, complementing the role of plant-derived cellulose as a fibrous structural framework in biopolymer composites intended for sustainable packaging applications.

The comparative analysis highlights the complementary roles of plant-derived and bacterial cellulose in biopolymer systems. Plant-derived cellulose provides a mechanically robust fibrous framework, while bacterial cellulose, owing to its highly ordered and interconnected nanofibrillar structure, offers advantages at the nanoscale that can contribute to enhanced functional performance. The combination of these structural features, together with effective pretreatment and purification strategies, supports the rational design of environmentally friendly and high-performance cellulose-based composites for sustainable packaging applications.

Conclusion

This study presented a detailed comparative analysis of plant-derived cellulose extracted from wheat, maize, cotton, and rice straw and bacterial cellulose synthesized via K. xylinus, with a focus on their structural and physicochemical characteristics. SEM analysis demonstrated that plant-derived cellulose exhibits elongated microfibrillar structures with fiber diameters ranging from 5 to 25 μm, accompanied by surface microcracks and pores formed because of effective lignin and hemicellulose removal during $AlCl_3$ – glycerol pretreatment and subsequent alkaline purification. These features indicate good structural integrity and suitability of plant-derived cellulose as a bulk reinforcing framework in biopolymer systems. In contrast, bacterial cellulose formed a dense, multilayered, and highly interconnected fibrillar network with significantly smaller fiber diameters (2.7-9.7 μm), smooth surfaces, and the absence of visible impurities, reflecting its high structural homogeneity and purification efficiency. FTIR spectroscopy confirmed that both plant-derived and bacterial celluloses share the same fundamental cellulose chemical backbone. However, the pronounced weakening or absence of lignin-related absorption bands in plant-derived samples, together with their complete absence in bacterial cellulose, verified effective delignification and the inherently high chemical purity of bacterial cellulose. Moreover, the stronger and sharper FTIR absorption bands observed for bacterial cellulose suggest a higher degree of structural order and molecular organization, consistent with its uniform nanofibrillar morphology. The results demonstrate that plant-derived cellulose and bacterial cellulose possess distinct yet complementary structural characteristics. Plant-derived cellulose primarily contributes bulk mechanical strength through its microfibrillar architecture, whereas bacterial cellulose, owing to its dense nanofibrillar network and higher structural order, is well suited for nanostructural reinforcement. The combined utilization of agricultural biomass–derived cellulose and bacterial cellulose, supported by environmentally friendly pretreatment and purification strategies, offers a scientifically grounded approach for the development of sustainable cellulose-based biopolymer composites and packaging materials.

References

1. Environmental sustainability in healthcare: impacts of climate change, challenges and opportunities / E.Y. Koh et al // Singapore Medical Journal. – 2025. – Vol. 66, Suppl. 1. – P. S47-S56.

2. A review on the life cycle assessment of cellulose: from properties to the potential of making it a low carbon material / F. Foroughi et al // Materials. – 2021. – Vol. 14, № 4. – Article 714. https://doi.org/10.3390/ma14040714.

3. Biodegradable polymers: properties, applications, and environmental impact / R. Dallaev et al // Polymers. – 2025. – Vol. 17, № 14. – Article 1981. https://doi.org/10.3390/polym17141981.

4. Advanced biocompatible and biodegradable polymers: a review of functionalization, smart systems, and sustainable applications / L. Abdulsalam et al // Polymers. – 2025. – Vol. 17, № 21. – Article 2901. https://doi.org/10.3390/polym17212901.

5. The plant cell wall – dynamic, strong, and adaptable – is a natural shapeshifter / D. Delmer et al // The Plant Cell. – 2024. – Vol. 36, № 5. – P. 1257-1311. https://doi.org/10.1093/plcell/koad325.
6. Reduction and reuse of forestry and agricultural bio-waste through innovative green utilization approaches: a review / J. Guo et al // Forests. – 2024. – Vol. 15. – Article 1372. https://doi.org/10.3390/f15081372.
7. From waste to wealth: unlocking the potential of cellulase characteristics for food processing waste management / M.H. Hussain et al // Foods. – 2025. – Vol. 14, № 21. – Article 3639. https://doi.org/10.3390/foods14213639.
8. Lignin extraction by using two-step fractionation: a review / M.H. Tanis et al // Molecules. – 2023. – Vol. 29, № 1. – Article 98.
9. Eco-friendly methods for extraction and modification of cellulose: an overview / S. Magalhães et al // Polymers. – 2023. – Vol. 15, № 14. – Article 3138.
10. Using ionic liquids for lignin extraction from lignocellulose and high-value utilization: a review / X. Li et al // Molecules. – 2025. – Vol. 30, № 12. – Article 2514.
11. A comprehensive review of unlocking the potential of lignin-derived biomaterials: from lignin structure to biomedical application / J. Zhao et al // Journal of Nanobiotechnology. – 2025. – Vol. 23, № 1. – Article 538. https://doi.org/10.1186/s12951-025-03604-7.
12. Sharma N. Green chemistry strategies in pulping and biomass valorization: toward a circular bioeconomy / N. Sharma, P. Basera // Frontiers in Chemistry. – 2025. – Vol. 13. – Article 1724324. https://doi.org/10.3389/fchem.2025.1724324.
13. Biodegradable packaging from agricultural wastes: a comprehensive review of processing techniques, material properties, and future prospects / B.D. Kossalbayev et al // Polymers. – 2025. – Vol. 17. – Article 2224.
14. Microbial valorization of agricultural and agro-industrial waste into bacterial cellulose: innovations for circular bioeconomy integration / A.M. Belkozhayev et al // Microorganisms. – 2025. – Vol. 13. – Article 2686. https://doi.org/10.3390/microorganisms13122686.
15. Gomes R.J. Bacterial cellulose production by Komagataeibacter hansenii can be improved by successive batch culture / R.J. Gomes, E.I. Ida, W.A. Spinosa // Brazilian Journal of Microbiology. – 2023. – Vol. 54, № 2. – P. 703-713.
16. Bacterial cellulose for sustainable food packaging: production pathways, structural design, and functional modification strategies / R. Turganova et al // Polymers. – 2025. – Vol. 17, № 23. – Article 3165. https://doi.org/10.3390/polym17233165.
17. A review on the modification of cellulose and its applications / T. Aziz et al // Polymers. – 2022. – Vol. 14, № 15. – Article 3206.
18. A comprehensive review on recent advances in preparation, physicochemical characterization, and bioengineering applications of biopolymers / A. Das et al // Polymer Bulletin. – 2023. – Vol. 80, № 7. – P. 7247-7312.
19. Property evaluation of bacterial cellulose nanostructures produced from confectionery wastes / M.-N. Efthymiou et al // Biochemical Engineering Journal. – 2022. – Vol. 186. – Article 108575.
20. Yilmaz M. Optimization of bacterial cellulose production from waste figs by Komagataeibacter xylinus / M. Yilmaz, Y. Goksungur // Fermentation. – 2024. – Vol. 10. – Article 466.
21. Redeposition of lignin derivatives in $AlCl_3$–ethanol–glycerol pretreated pine wood: impacts on cellulose structure and enzymatic hydrolysis efficiency / J. Zhao et al // Industrial Crops and Products. – 2025. – Vol. 237. – Article 122200.
22. Antibacterial films made of bacterial cellulose / Z. Sun et al // Polymers. – 2022. – Vol. 14, № 16. – Article 3306. https://doi.org/10.3390/polym14163306.
23. Preparation and characterization of degradable cellulose-based paper with superhydrophobic, antibacterial, and barrier properties for food packaging / X. Jiang et al // International Journal of Molecular Sciences. – 2022. – Vol. 23, № 19. – Article 11158.

Funding

This research was funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. BR27199103 – Project Title: Development of Eco-Friendly Packaging Materials from Recyclable Paper and Biomass Waste with Adaptive and Enhanced Protective Properties).

А.М. Белкожаев[1]*, А.О. Абайлдаев[1], Б.Д. Қосалбаев[1,2,3], Н. Ғизатуллина[1], Г. Толеутай[1,4]*
[1]Қ. Тұрысов атындағы геология Және Мұнай-Газ Ісі Институты, Сәтбаев Университеті,
050013, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Сәтбаев к-сі, 22а.
[2]ал-Фараби атындағы қазақ Ұлттық Университеті,
050040, Қазақстан, Алматы Қ., Әл-Фараби Даңғ. 71,
[3]Экология Ғылыми-Зерттеу Институты, Қожа Ахмет Ясауи Атындағы халықаралық
қазақ-түрік Университеті, Түркістан Қ., 161200, Қазақстан
[4]Теннесси университеті, Ноксвилл, TN 37996, АҚШ
*e-mail: a.belkozhayev@satbayev.university

АУЫЛШАРУАШЫЛЫҚ ҚАЛДЫҚТАРЫНАН АЛЫНҒАН ӨСІМДІК ТЕКТІ ЦЕЛЛЮЛОЗА МЕН БАКТЕРИЯЛЫҚ ЦЕЛЛЮЛОЗАНЫҢ ҚҰРЫЛЫМДЫҚ ЖӘНЕ ФИЗИКА-ХИМИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН САЛЫСТЫРМАЛЫ ТАЛДАУ

Бұл зерттеуде ауылшаруашылық қалдықтарынан (бидай, жүгері, мақта және күріш сабаны) алынған өсімдік текті целлюлозаның және Komagataeibacter xylinus (K. xylinus) көмегімен ферментация арқылы синтезделген бактериялық целлюлозаның құрылымдық және физика-химиялық қасиеттеріне салыстырмалы талдау жүргізілді. Өсімдік текті целлюлоза $AlCl_3$–глицеринмен алдын ала өңдеуден кейін сілтілік тазалау арқылы алынды, ал бактериялық целлюлоза Hestrin–Schramm қоректік ортасында статикалық культивирлеу жағдайында синтезделді. Алынған целлюлоза үлгілерінің морфологиясы, химиялық құрылымы және термиялық тұрақтылығы сканерлеуші электрондық микроскопия (SEM), Фурье түрлендірулі инфрақызыл спектроскопия (FTIR) және термогравиметриялық талдау (TGA/DTG) әдістері арқылы жүйелі түрде зерттелді. SEM талдауы өсімдік текті целлюлозаның талшық диаметрі 5-25 мкм аралығында болатын ұзын микрофибриллярлы құрылымдарға ие екенін, сондай-ақ лигнин мен гемицеллюлозаның тиімді жойылуы нәтижесінде бетінде микрожарықтар мен кеуектердің пайда болғанын көрсетті. Ал бактериялық целлюлоза тығыз, көпқабатты және өзара тығыз байланысқан фибриллярлы тор түзді, оның талшық диаметрі айтарлықтай кіші (2,7-9,7мкм), бұл оның жоғары құрылымдық біртектілігі мен тазалығын көрсетеді. FTIR спектрлері екі целлюлоза түрінің де негізгі химиялық қаңқасы бірдей екенін растады, ал лигнинге тән жұтылу жолақтарының әлсіреуі немесе болмауы тиімді делигнификацияны және бактериялық целлюлозаның жоғары химиялық тазалығын көрсетті. Жалпы алғанда, алынған нәтижелер өсімдік текті және бактериялық целлюлозаның құрылымдық қасиеттері әртүрлі, бірақ өзара толықтыратын сипатқа ие екенін дәлелдейді. Өсімдік текті целлюлоза көлемдік механикалық беріктік берсе, бактериялық целлюлоза наноқұрылымдық арматура қызметін атқарады, бұл олардың тұрақты биополимерлі композиттер мен экологиялық таза қаптама материалдарын әзірлеуде бірлесіп қолданылуын негіздейді.

Түйін сөздер: *ауылшаруашылық биомассасы; целлюлозаны экстракциялау; бактериялық целлюлоза; тұрақты қаптама; FTIR; TGA; SEM.*

А.М. Белкожаев[1]*, А.О. Абайлдаев[1], Б.Д. Косалбаев[1,2,3], Н. Гизатуллина[1], Г. Толеутай[1,4]
[1]Институт геологии и нефтегазового дела имени К. Турысова, Университет Сатпаева,
050013, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22а.
[2]Казахский национальный университет им. аль-Фараби,
050040, Казахстан, Алматы, пр. Аль-Фараби, 71,
[3]Институт экологических исследований, Международный Казахско-Турецкий университет имени
Ходжи Ахмета Яссави, Туркестан, 161200, Казахстан
[4]Университет Теннесси, Ноксвилл, Теннесси 37996, США
*e-mail: a.belkozhayev@satbayev.university

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ СТРУКТУРНЫЙ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ РАСТИТЕЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ ИЗ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ОТХОДОВ И БАКТЕРИАЛЬНОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ

В данном исследовании представлен сравнительный анализ структурных и физико-химических свойств целлюлозы растительного происхождения, выделенной из сельскохозяйственных отходов (солома пшеницы, кукурузы, хлопка и риса), и бактериальной целлюлозы, синтезированной методом ферментации с использованием Komagataeibacter xylinus (K. xylinus). Растительная целлюлоза была получена путем предварительной обработки системой $AlCl_3$-глицерин с последующей щелочной очисткой, тогда как бактериальная целлюлоза синтезировалась в статических условиях культивирования в среде Хестрина-Шрамма. Морфология, химическая структура и термическое поведение полученных образцов целлюлозы были систематически охарактеризованы с использованием сканирующей электронной микроскопии (SEM), инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье (FTIR) и термогравиметрического

анализа (TGA/DTG). Результаты SEM показали, что целлюлоза растительного происхождения характеризуется вытянутыми микрофибриллярными структурами с диаметром волокон в диапазоне 5-25 мкм, а также наличием поверхностных микротрещин и пор, сформированных в результате эффективного удаления лигнина и гемицеллюлозы. В отличие от нее, бактериальная целлюлоза формирует плотную, многослойную и высоко взаимосвязанную фибриллярную сеть с существенно меньшим диаметром волокон (2,7-9,7мкм), что отражает ее высокую структурную однородность и чистоту. FTIR-спектры подтвердили наличие общей фундаментальной химической структуры для обоих типов целлюлозы, тогда как ослабление или отсутствие полос поглощения, характерных для лигнина, свидетельствовало об эффективной делигнификации и более высокой химической чистоте бактериальной целлюлозы. В целом результаты демонстрируют, что растительная и бактериальная целлюлоза обладают различными, но взаимодополняющими структурными характеристиками. Целлюлоза растительного происхождения обеспечивает объемную механическую прочность, тогда как бактериальная целлюлоза выполняет функцию наноразмерного армирования, что обосновывает их совместное применение при разработке устойчивых биополимерных композитов и экологически безопасных упаковочных материалов.

Ключевые слова: *сельскохозяйственная биомасса; экстракция целлюлозы; бактериальная целлюлоза; устойчивая упаковка; FTIR; TGA; SEM.*

Information about the authors

Ayaz Maratovich Belkozhayev* – PhD, Associate Professor of Department of Chemical and Biochemical Engineering, Geology and Oil-Gas Business Institute Named After K. Turyssov, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: a.belkozhayev@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7429-4994.

Arman Orazalyuly Abaildayev – Senior lecturer of Department of Chemical and Biochemical Engineering, Geology and Oil-Gas Business Institute Named After K. Turyssov, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: a.abaildayev@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1813-1338.

Bekzhan Duisenbiuly Kossalbayev – PhD, Associate Professor of Department of Chemical and Biochemical Engineering, Geology and Oil-Gas Business Institute Named After K. Turyssov, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: kossalbayev.bekzhan@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3892-7920.

Nargiz Gizatullina – PhD student, Department of Chemical and Biochemical Engineering, Geology and Oil-Gas Business Institute Named After K. Turyssov, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: nar.gn@bk.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4230-1031.

Gaukhar Toleutay – PhD of Department of Chemical and Biochemical Engineering, Geology and Oil-Gas Business Institute Named After K. Turyssov, Satbayev University, Republic of Kazakhstan; e-mail: gaukhar.toleutay@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0381-6665.

Авторлар туралы мәліметтер

Аяз Маратович Белкожаев* – PhD, Химиялық және биохимиялық инженерия кафедрасының қауымдастырылған профессоры, К. Тұрысов атындағы Геология және мұнай-газ ісі институты, Сәтбаев университеті, Алматы, Қазақстан; e-mail: a.belkozhayev@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7429-4994.

Арман Оразалыұлы Абайлдаев – Химиялық және биохимиялық инженерия кафедрасының аға оқытушысы, К. Тұрысов атындағы Геология және мұнай-газ ісі институты, Сәтбаев университеті, Алматы, Қазақстан; e+mail: a.abaildayev@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1813-1338.

Бекжан Дуйсенбиұлы Қосалбаев – PhD, Химиялық және биохимиялық инженерия кафедрасының қауымдастырылған профессоры, К. Тұрысов атындағы Геология және мұнай-газ ісі институты, Сәтбаев университеті, Алматы, Қазақстан; e-mail: kossalbayev.bekzhan@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3892-7920.

Наргиз Ғизатуллина – химиялық және биохимиялық инженерия кафедрасының докторанты, К. Тұрысов атындағы Геология және мұнай-газ ісі институты, Сәтбаев университеті, Алматы, Қазақстан; e-mail: nar.gn@bk.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4230-1031.

Гаухар Толеутай – PhD, Химиялық және биохимиялық инженерия кафедрасы, К. Тұрысов атындағы Геология және мұнай-газ ісі институты, Сәтбаев университеті, Қазақстан; e-mail: gaukhar.toleutay@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0381-6665.

Сведения об авторах

Аяз Маратович Белкожаев* – PhD, ассоциированный профессор кафедры химической и биохимической инженерии Института геологии и нефтегазового дела им. К. Турысова, Университет Сатпаева, Алматы, Казахстан; e-mail: a.belkozhayev@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7429-4994.

Арман Оразалыулы Абайлдаев – старший преподаватель кафедры химической и биохимической инженерии Института геологии и нефтегазового дела им. К. Турысова, Университет Сатпаева, Алматы, Казахстан; e-mail: a.abaildayev@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1813-1338.

Бекжан Дуисенбиулы Коссалбаев – PhD, ассоциированный профессор кафедры химической и биохимической инженерии Института геологии и нефтегазового дела им. К. Турысова, Университет Сатпаева, Алматы, Казахстан; e-mail: kossalbayev.bekzhan@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3892-7920.

Наргиз Гизатуллина – докторант кафедры химической и биохимической инженерии Института геологии и нефтегазового дела им. К. Турысова, Satbayev University, Алматы, Казахстан; e-mail: nar.gn@bk.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4230-1031.

Гаухар Толеутай – PhD кафедры химической и биохимической инженерии Института геологии и нефтегазового дела им. К. Турысова, Университет Сатпаева, Казахстан; e-mail: gaukhar.toleutay@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0381-6665.

Received 30.01.2026
Revised 05.03.2026
Accepted 05.03.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-77

МРНТИ: 31.21.01

CC BY 4.0
Check for updates

А.Б. Джумагазиева[*], Ж.А. Искакбаева[1], У.Е. Жантикеев[2], К.С. Бексеитова[2], С. Азат[2]
[1]Лаборатория микробиологии, АО «Научный центр противоинфекционных препаратов»,
Республика Казахстан, г. Алматы, пр. Аль-фараби, 75Б
[2]Satbayev University,
050013, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22
*e-mail: r_dawa@mail.ru

ОЧИСТКА ВОДЫ МЕТОДОМ ХОЛОДНОЙ ПЛАЗМЫ: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА БАКТЕРИЦИДНОГО ДЕЙСТВИЯ

Аннотация: *Целью данного исследования являлась оценка эффективности установки холодной плазмы для обеззараживания воды, контаминированной бактериальной микрофлорой. Экспериментальная установка CD Plasma генерирует холодную плазму путем ионизации частиц обрабатываемой жидкости, предварительно преобразованной в двухфазную жидко-газовую среду. Холодная плазма оказывает выраженное антимикробное действие за счет синергетического влияния активных форм кислорода и азота, ультрафиолетового излучения и заряженных частиц, которые вызывают окислительное повреждение клеточной стенки, нарушение целостности мембраны, инактивацию белков и фрагментацию ДНК микроорганизмов. В качестве тест-объектов использованы бактерии Escherichia coli и Pseudomonas aeruginosa как представители санитарно-показательной и условно-патогенной микрофлоры. Показано, что воздействие холодной плазмы в течение 5 минут обеспечивает значительное снижение микробной обсеменённости в отношении обеих культур, однако в большей степени в отношении Pseudomonas aeruginosa. Полученные результаты свидетельствуют о высокой эффективности холодной плазмы в инактивации бактерий без использования химических реагентов и указывают на перспективность её применения в технологиях очистки и обеззараживания воды. Метод отличается энергоэффективностью, масштабируемостью и минимальным образованием побочных продуктов при небольших эксплуатационных затратах.*

Ключевые слова: *холодная плазма, обеззараживание воды, бактерии, экологически чистые технологии.*

1. ВВЕДЕНИЕ

Дефицит и загрязнение воды остаются двумя наиболее острыми глобальными проблемами, имеющими глубокие последствия для общественного здравоохранения, экологической устойчивости и экономического развития [1]. В связи с продолжающимся

©А.Б. Джумагазиева, Ж.А. Искакбаева, У.Е. Жантикеев, К.С. Бексеитова, С. Азат, 2026

ростом населения мира и расширением промышленной деятельности, спрос на чистую, безопасную воду неуклонно увеличивается [2]. Однако водоемы все чаще загрязняются различными веществами, включая промышленные химикаты [3], сельскохозяйственные стоки [4], фармацевтические препараты [5], микроорганизмы [6] и микропластик [7]. Бактериальное загрязнение в значительной степени усложняет традиционные процессы очистки воды и представляют собой значительные проблемы [8-12], поскольку многие из них трудно удалить с помощью обычной фильтрации и химической обработки. Следовательно, существует острая потребность в более передовых и эффективных технологиях очистки воды, способных решать эти меняющиеся проблемы.

В условиях нарастающей нехватки водных ресурсов во многих точках мира и, в частности, в Казахстане, становится критически важным не только улучшать процессы очистки сточных вод, но и делать приоритетным их повторное использование и восстановление водных ресурсов. [13-17]. Поэтому существует острая потребность в инновационных, экономически эффективных и устойчивых технологиях очистки воды, которые могут решать эти проблемы, одновременно повышая общую эффективность, экологичность и доступность систем очистки воды.

Материалы и методы

Для моделирования бактериальной контаминации воды использовали тест-штаммы микроорганизмов *Escherichia coli* ATCC 8739 и *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 9027, полученные из Американской коллекции типовых культур (*American Type Culture Collection*). Выбор модельных штаммов был основан на эпидемиологической значимости: *Escherichia coli* является санитарно-показательным микроорганизмом и служит маркером фекального загрязнения воды; *Pseudomonas aeruginosa* относится к условно-патогенным микроорганизмам с выраженной природной устойчивостью к физическим и химическим факторам, способностью к формированию биопленок и активной колонизации водных систем.

Культуры выращивали в течение 18 часов на плотной питательной среде Мюллер-Хинтон агар (Himedia, Индия) при температуре 37±1 °C. По истечении времени инкубации, готовили по отдельности суспензии тест-штаммов с использованием прибора денситометра DEN-1 (Biosan, Латвия) в концентрации 1,5x103 КОЕ/мл.

В общей сложности были подготовлены и переданы для обработки установкой холодной плазмы 4 колбы по 1000 мл воды, засеянных *Escherichia coli* ATCC 8739 и 4 колбы по 1000 мл воды, засеянных *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 9027. Оценку эффективности обеззараживания воды проводили путем высева 1 мл воды на поверхность плотной питательной среды – МХА, после обработки холодной плазмой в течение 1 минуты, 3 минут и 5 минут. Параллельно, прооводили контроль обсемененности воды до фильтрации аналогичным образом. Чашки Петри с внесенными образцами инкубировали в термостате в течение 24 часов, с последующим подсчетом выросших колоний с помощью счетчика колоний Scan 100 (Interscience, Франция).

Экспериментальные исследования проводились с использованием лабораторной установки холодной плазмы, предназначенной для плазменно-химической очистки загрязнённой воды и её обеззараживания. Принцип работы установки основан на генерации плазменного разряда в двухфазной газо-жидкостной среде внутри реактора, что приводит к образованию высокоэнергетических и высокореакционных частиц – электронов, ионов, радикалов и возбужденных атомов. Установка функционирует при атмосферном давлении и комнатной температуре, что исключает термическое воздействие на воду и повышает энергоэффективность процесса. В ходе обработки формируются активные формы кислорода и азота, включая гидроксильные радикалы (•OH), озон (O_3) и пероксид водорода (H_2O_2), обеспечивающие окислительное разрушение органических и неорганических загрязнителей, а также инактивацию микроорганизмов. Циркуляция воды осуществляется в замкнутом контуре с использованием насоса, обеспечивающего равномерное воздействие плазмы на весь объём жидкости. Время обработки регулируется и составляет от 1 до 20 минут, что позволяет адаптировать процесс к различным экспериментальным условиям.

Циркуляция воды осуществлялась в замкнутом контуре с использованием насоса, обеспечивающего равномерное воздействие плазмы на весь объём жидкости. Циркуляционный насос подает воду из резервуара по трубопроводу из ПВХ толщиной 20 мм со скоростью потока 10 л/мин, создавая давление приблизительно 3 бар на входе в

плазменный реактор. Прежде чем попасть в зону реактора, вода проходит через специально сконструированное сопло типа Вентури, расположенное в нижней части реактора. Внутренний диаметр сопла уменьшается с 14 мм до 5 мм, что приводит к значительному увеличению скорости и распылению жидкости на капли размером от микрометра до нанометра. При таком распылении образуется газожидкостный аэрозоль, который является рабочей средой плазменного реактора. Быстрое прохождение жидкости через узкое сечение сопла создает локальный перепад давления, создавая область низкого давления внутри активной зоны реактора. Это вызванное гидродинамикой снижение давления позволяет аэрозолю проникать в зону плазмы, не нарушая общей стабильности вакуума. В результате реактор работает в саморегулирующемся режиме смешанного давления: давление в контуре рециркуляции остается близким к атмосферному, в то время как в плазменной камере поддерживается пониженное внутреннее давление, составляющее приблизительно -0,8 бар, что контролируется вакуумметром. Плазма генерируется в этой двухфазной среде при входной мощности 3 кВт, напряжение 10кВ и импульсе 3 А. Несмотря на высокую мгновенную электрическую мощность, разряд остается нетепловым из-за интенсивного охлаждения капель аэрозоля за счет испарения и быстрого гашения на границе раздела газ-жидкость. Время обработки регулируется и составляет от 1 до 20 минут, что позволяет адаптировать процесс к различным экспериментальным условиям.

Результаты

Для оценки эффективности обеззараживания воды с использованием установки холодной плазмы был проведен модельный эксперимент с тест-штаммами *Escherichia coli* АТСС 8739 и *Pseudomonas aeruginosa* АТСС 9027.

Исходная бактериальная нагрузка составляла 1,5×10³ КОЕ/мл для каждого микроорганизма, что подтверждено результатами контрольных посевов до обработки (рис. 1-2).

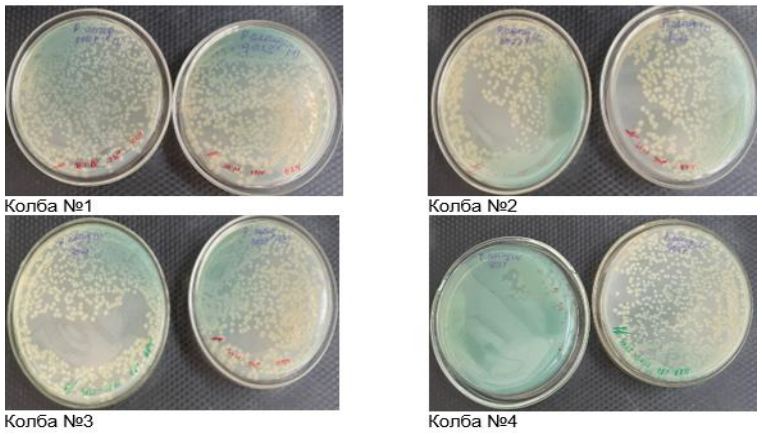


Рисунок 1 – Результаты высева из образцов воды с *Pseudomonas aeruginosa* АТСС 9027 до фильтрации

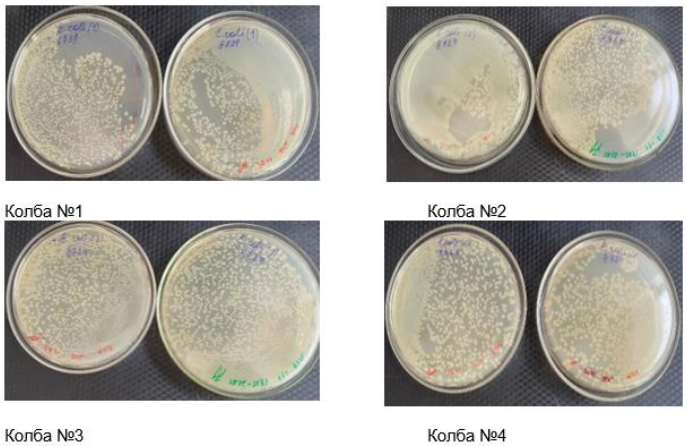


Рисунок 2 – Результаты высева из образцов воды с *Escherichia coli* АТСС 8739 до фильтрации

Из данных, представленных на рисунках 1-2 видно, что в контрольных образцах, не подвергавшихся обработке холодной плазмой, наблюдался рост микроорганизмов в количестве, сопоставимом с исходной концентрацией посева. По истечении времени инкубации на чашках Петри отмечался характерный рост типичных колоний *Escherichia coli* АТСС 8739 и *Pseudomonas aeruginosa* АТСС 9027. Подсчет колоний показал, что средний уровень бактериальной обсемененности составлял ~1,5×10³ КОЕ/мл, что подтверждает стабильность жизнеспособности тест-культур и воспроизводимость модельной контаминации. Эти данные свидетельствуют об отсутствии факторов, влияющих на рост микроорганизмов в контрольных условиях.

Результаты высева образцов отфильтрованной воды представлены в таблице 1 и на рисунках 3-4.

Таблица 1 – Результаты количественного высева из образцов воды после фильтрации

Экспозиция	Общее количество выросших колоний, КОЕ/мл							
	Escherichia coli АТСС 8739				*Pseudomonas aeruginosa* АТСС 9027			
	1 повтор	2 повтор	3 повтор	M±StD	1 повтор	2 повтор	3 повтор	M±StD
1 минута	~1,5x10^3	~1,5x10^3	~1,5x10^3	~1,5x10^3	3	5	4	4±1
3 минуты	528	498	517	514,3±15,2	1	3	2	2±1
5 минут	69	94	78	80,3±12,7	1	-	-	НО
Примечание: «-» – отсутствие роста, «НО» – среднее значение и значение стандартного отклонения не определены в виду отсутствия роста во 2 и 3 повторах								

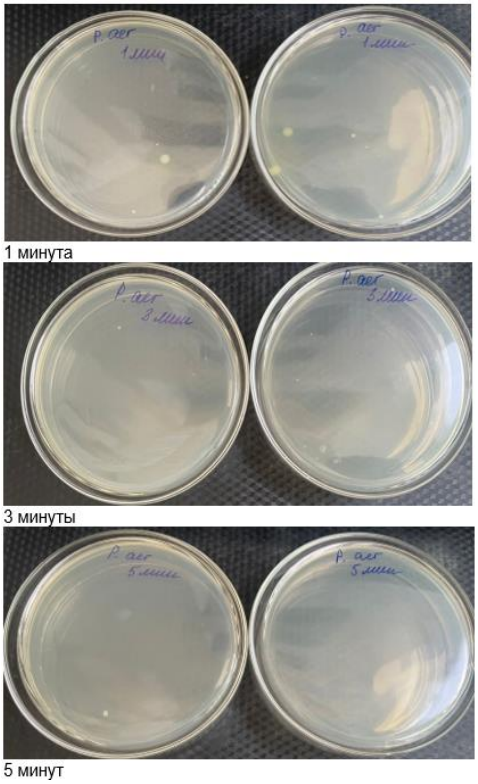


Рисунок 3 – Результаты высева из образцов воды с *Pseudomonas aeruginosa* АТСС 9027 после фильтрации

По результатам проведенного эксперимента установлено, что установка холодной плазмы оказывает выраженное бактерицидное действие, с времязависимым эффектом (табл. 1). После одной минуты обработки снижение бактериальной обсемененности *Escherichia coli* АТСС 8739 было незначительным: количество выросших колоний соответствовало исходной концентрации (~1,5×10³ КОЕ/мл), что указывает на отсутствие мгновенного плазменного эффекта в отношении данного микроорганизма при минимальном времени экспозиции. В то же время в отношении *Pseudomonas aeruginosa* АТСС 9027 наблюдается более выраженный эффект: количество колониеобразующих единиц снизилось до 3-5 КОЕ/мл, что соответствует снижению более чем на 3 порядка ($\log_{10}$).

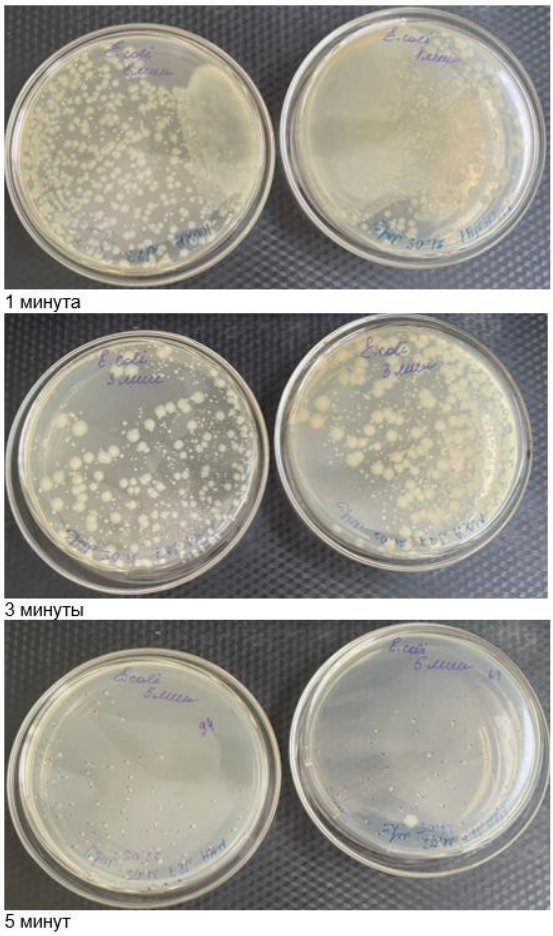


Рисунок 4 – Результаты высева из образцов воды с *Escherichia coli* ATCC 8739 после фильтрации

При увеличении времени обработки до 3 минут количество клеток *E. coli* уменьшилось до 500 КОЕ/мл, что соответствует снижению бактериальной нагрузки примерно на 1 логарифмический цикл ($\log_{10}$). Для *P. aeruginosa* количество выросших колоний составило 1-3 КОЕ/мл, что указывает на практически полную инактивацию культуры. Максимальный бактерицидный эффект наблюдался при экспозиции 5 минут: количество клеток *E. coli* снизилось до ~75 КОЕ/мл (снижение на 2 $\log_{10}$), а для *P. aeruginosa* рост отсутствовал практически полностью (1 КОЕ в одном повторе, полное отсутствие КОЕ во втором).

Полученные результаты показали более выраженную чувствительность *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 9027 к воздействию холодной плазмы по сравнению с *Escherichia coli* ATCC 8739. Данный феномен может быть объяснен особенностями действия низкотемпературной плазмы, включающего генерацию реактивных форм кислорода и азота (ROS/RNS), ультрафиолетового излучения и заряженных частиц, вызывающих множественные повреждения клеточных структур микроорганизмов [18-20].

Известно, что одним из ключевых механизмов бактерицидного действия холодной плазмы является индуцированное ROS перекисное окисление липидов клеточной мембраны, приводящее к утрате барьерной функции и быстрой гибели клетки [19, 21]. Наружная мембрана *P. aeruginosa* характеризуется высоким содержанием ненасыщенных жирных кислот, что повышает её чувствительность к окислительному стрессу и пероксидации липидов [22]. В результате под действием плазмы происходит быстрое нарушение целостности мембраны и инактивация клеток.

Кроме того, высокая метаболическая активность *P. aeruginosa* и интенсивное потребление кислорода могут способствовать усиленному образованию вторичных ROS внутри клетки, что приводит к накоплению окислительных повреждений ДНК и белков [20, 23]. При этом антиоксидантные системы защиты (каталаза, супероксиддисмутаза) оказываются недостаточными при воздействии высокоактивных плазменных радикалов, обладающих комплексным повреждающим действием [19, 24].

Несмотря на известную устойчивость *P. aeruginosa* к антибиотикам и химическим дезинфектантам, её чувствительность к холодной плазме может быть выше, чем у *E. coli*, что показано в ряде экспериментальных исследований по плазменной инактивации водных патогенов [25, 26]. Это связывают с различиями в структуре липополисахаридного слоя и особенностями поверхностных полисахаридов, которые определяют проницаемость клеточной оболочки для реактивных частиц плазмы [21, 25].

Таким образом, более высокая чувствительность *Pseudomonas aeruginosa* к холодной плазме обусловлена совокупностью факторов: уязвимостью липидного слоя к окислительному повреждению, усилением внутриклеточного окислительного стресса и ограниченной эффективностью антиоксидантных механизмов защиты при воздействии активных плазменных частиц.

Установленные особенности повышенной чувствительности *Pseudomonas aeruginosa* к воздействию холодной плазмы определяют необходимость учёта экспериментальных условий, в частности исходной бактериальной нагрузки, при интерпретации полученных результатов. Поскольку интенсивность генерации ROS/RNS и глубина их проникновения в микробные клетки во многом зависят от плотности популяции, корректный выбор начальной концентрации микроорганизмов является важным фактором, позволяющим объективно оценить кинетику плазменной инактивации и сопоставить чувствительность различных видов бактерий в стандартизированных условиях эксперимента.

В нашем эксперименте начальная бактериальная нагрузка в модельном эксперименте составляла $1{,}5\times10^3$ КОЕ/мл, что соответствует уровню умеренной микробной контаминации воды и широко используется в исследованиях по оценке эффективности новых методов обеззараживания [27, 28]. Применение контролируемой и относительно невысокой концентрации микроорганизмов позволяет корректно оценить кинетику инактивации и выявить времязависимый характер бактерицидного действия холодной плазмы без эффекта экранирования клеток.

При высокой степени микробного загрязнения возможно формирование клеточных агрегатов и биопленочных структур, что приводит к снижению эффективности плазменной инактивации вследствие частичной защиты внутренних клеток от воздействия ROS и УФ-излучения [20, 29]. Кроме того, увеличение биомассы сопровождается потреблением и нейтрализацией реактивных форм кислорода органическими компонентами среды, что уменьшает их биоцидную активность [18, 20].

Ряд исследований показывает, что эффективность холодной плазмы сохраняется и при более высокой микробной нагрузке, однако в этом случае требуется увеличение времени экспозиции или мощности разряда для достижения аналогичного уровня инактивации [25, 30]. Следовательно, выбранная начальная концентрация $1{,}5\times10^3$ КОЕ/мл является методически обоснованной и позволяет оценить базовую кинетику бактерицидного действия плазмы, с возможностью экстраполяции результатов на условия более выраженного загрязнения при оптимизации параметров обработки.

Заключение

Таким образом, проведенный эксперимент показал высокую эффективность установки холодной плазмы для инактивации бактериальной микрофлоры в воде. Отмечена чётко выраженная зависимость бактерицидного действия от времени обработки: при увеличении экспозиции наблюдается значительное снижение количества жизнеспособных клеток. Наибольший эффект достигался при 5-минутной обработке, что обеспечивало снижение бактериальной нагрузки до $2\log_{10}$ для *Escherichia coli* ATCC 8739 и практически полную элиминацию *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 9027. Полученные данные подтверждают перспективность применения холодной плазмы как эффективной не термической технологии для обеззараживания воды, способной обеспечивать значительное снижение микробной обсеменённости без использования химических реагентов и нагрева.

Список литературы

1. Efficient nitrogen removal through coupling biochar with zero-valent iron by different packing modes in bioretention system / J. Chen et al // Environ. Res. – 2023. – № 223. – P. 115375.
2. Campos L.C. A Review of the Most Concerning Chemical Contaminants in Drinking Water for Human Health / L.C. Campos // Sustainability. – 2024. – № 16. – P. 7107.

3Chemical contaminants and environmental stressors induced teratogenic effect in aquatic ecosystem – A comprehensive review / S. Madesh et al // Toxicology Reports. – 2024. – Vol. 13. – P. 101819. https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2024.101819.
4. Madjar RM. Nutrient Water Pollution from Unsustainable Patterns of Agricultural Systems, Effects and Measures of Integrated Farming / RM. Madjar, G. Vasile Scăeţeanu, MA. Sandu // Water. – 2024. – № 16(21). – P. 3146. https://doi.org/10.3390/w16213146.
5. Wada O.Z. Recent occurrence of pharmaceuticals in freshwater, emerging treatment technologies, and future considerations: A review / O.Z. Wada, D.B. Olawade // Chemosphere. – 2025. – Vol. 374. – P. 144153. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2025.144153.
6. Mendoza-Espinosa LG. Editorial: Wastewater and microbial contamination of water courses / LG. Mendoza-Espinosa, A. Mojiri // Front. – 2024. – Water 6. – P. 1428714. https://doi.org/10.3389/frwa.2024.1428714.
7. A comprehensive review of microplastic pollution in freshwater and marine environments / I.M. Jaikumar et al // Green Analytical Chemistry. – 2025. – Vol. 12. – P. 100202. https://doi.org/10.1016/j.greeac.2024.100202.
8. Exploring emerging water treatment technologies for the removal of microbial pathogens / O.V. Obayomi et al // Current Research in Biotechnology. – 2024. – Vol. 8. – P. 100252. https://doi.org/10.1016/j.crbiot.2024.100252.
9. Linden Systematic Review of Microorganism Removal Performance by Physiochemical Water Treatment Technologies / M. Burke et al // Environmental Science & Technology Article ASAP. https://doi.org/10.1021/acs.est.4c03459.
10. Current microbiological challenges in drinking water / A.C. Afonso et al // Journal of Water Process Engineering. – 2025. – Vol. 72. – P. 107614. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.107614.
11. Emerging Technologies for the Control of Biological Contaminants in Water Treatment: A Critical Review / Rui Gao et al // Engineering. – 2025. – № 48(5). – P. 185-204 https://doi.org/10.1016/j.eng.2024.08.022.
12. Effect of water treatment processes on microbial contamination in drinking water in rural areas of the urban periphery / Lan Zhang et al // Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development. – Vol 14, № 8. – P. 735
13. Wastewater Treatment in Central Asia: Treatment Alternatives for Safe Water Reuse / MS Kalmakhanova et al // Sustainability. – 2023. – № 15(20). – P. 14949. https://doi.org/10.3390/su152014949.
14. An analysis of barriers and perspectives for circular economy in industrial water use in Kazakhstan / I. Radelyuk et al // Sustainable Water Resources Management. – 2024. https://doi.org/10.1007/s40899-024-01057-8.
15. Trotta V. Risks associated with wastewater reuse in agriculture: investigating the effects of contaminants in soil, plants, and insects / V. Trotta, O. Baaloudj, M. Brienza // Front. Environ. Sci. – 2024. – № 12. – P. 1358842. https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1358842.
16. EXCESS AND ACTUAL INDICATORS OF WATER CONSUMPTION AND WASTEWATER DISPOSAL IN THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN / B. Botantaeva et al // Water Conservation & Management. – 2024. – Vol. 8. https://doi.org/10.26480/wcm.03.2024.362.367.
17. Radelyuk I. Sustainable Water Use in Industry - Reasons, Challenges, Response of Kazakhstan / I. Radelyuk, J. Klemeš, K. Tussupova // Circular Economy and Sustainability. – 2023. https://doi.org/10.1007/s43615-023-00269-y.
18. Laroussi M. Low Temperature Plasma Jet for Biomedical Applications: A Review / M. Laroussi // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2015. – № 43. – P. 703-711. https://doi.org/10.1109/TPS.2015.2403307.
19. Nonthermal plasma inactivation of food-borne pathogens / NN Misra et al // Food Eng Rev. – 2011.
20. Plasma-liquid interactions: A review and roadmap / P.J. Bruggeman et al // Plasma Sources Science and Technology. – 2016. – № 25(5). – Article 053002. https://doi.org/10.1088/0963-0252/25/5/053002.
21. How Does Cold Plasma Work in Medicine?. / S. Bekeschus et al // Textbook of Good Clinical Practice in Cold Plasma Therapy. Springer, Cham. – 2022. https://doi.org/10.1007/978-3-030-87857-3_3.

22. Breaking the outer membrane barrier: structure, targets, and antimicrobial strategies for Gram-negative bacteria / F. Xu et al // Front. Microbiol. – 2026. – № 17. – P. 1734749. https://doi.org/10.3389/fmicb.2026.1734749.
23. Imlay JA. Pathways of oxidative damage / JA. Imlay // Annu Rev Microbiol. – 2003. – № 57. – P. 395-418. https://doi.org/10.1146/annurev.micro.57.030502.090938. PMID: 14527285.
24. Cold Plasma Inactivation of Bacterial Biofilms and Reduction of Quorum Sensing Regulated Virulence Factors / D. Ziuzina et al // PLoS One. – 2015/ – № 10(9). – P. e0138209. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0138209. PMID: 26390435; PMCID: PMC4577073.
25. Cold Plasma Inactivation of Bacterial Biofilms and Reduction of Quorum Sensing Regulated Virulence Factors / D. Ziuzina et al // PLoS One. – 2015. – № 10(9). – P. e0138209. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0138209. PMID: 26390435; PMCID: PMC4577073.
26. Gram positive and Gram negative bacteria differ in their sensitivity to cold plasma / A. Mai-Prochnow // Sci Rep. – 2016. – № 6. – P. 38610. https://doi.org/10.1038/srep38610. PMID: 27934958; PMCID: PMC5146927.
27. WHO. Guidelines for drinking-water quality. 4th ed. 2017.
28. EPA. Microbial contaminant standards for drinking water. 2018.
29. Resistance of bacterial biofilms to disinfectants: a review / A. Bridier et al // Biofouling. – 2011. – № 27(9). – P. 1017-32. https://doi.org/10.1080/08927014.2011.626899. PMID: 22011093.
30. Cold plasma technology: advanced and sustainable approach for wastewater treatment / P. Gururani et al // Environ Sci Pollut Res Int. – 2021. – № 28(46). – P. 65062-65082. https://doi.org/10.1007/s11356-021-16741-x. Epub 2021 Oct 7. PMID: 34617236; PMCID: PMC8494511.

Благодарность: *Авторы выражают благодарность Министерству высшего образования и науки Республики Казахстан, выделившему грантовый проект ИРН:BR27199301 «Разработка климатически-нейтральных новых материалов, передовых технологий и методов для защиты окружающей среды от антропогенных загрязнений и изменения климата.»*

А.Б. Джумагазиева[*], Ж.А. Искакбаева[1], У.Е. Жантикеев[2], К.С. Бексеитова[2], С. Азат[2]
[1]Микробиология зертханасы, «Жұқпалы ауруларға қарсы препараттар ғылыми орталығы» АҚ, 050013, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Сәтбаев к-сі, 22А
[2]Satbayev University,
050013, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Сәтбаев көш., 22
*e-mail: r_dawa@mail.ru

СУЫҚ ПЛАЗМА ӘДІСІМЕН СУДЫ ТАЗАРТУ: БАКТЕРИЦИДТІК ӘСЕРДІҢ ЭКСПЕРИМЕНТТІК БАҒАСЫ

Осы зерттеудің мақсаты бактериялық микрофлорамен контаминацияланған суды залалсыздандыру үшін суық плазма қондырғысының тиімділігін бағалау болды. CD Plasma эксперименттік қондырғысы өңделетін сұйықтықты алдын ала екі фазалы сұйық-газ ортасына айналдырып, оның бөлшектерін иондау арқылы суық плазма генерациялайды. Суық плазма реактивті оттек пен азот түрлерінің, ультракүлгін сәулеленудің және зарядталған бөлшектердің синергиялық ықпалы нәтижесінде айқын антимикробтық әсер көрсетеді; бұл әсер жасуша қабырғасының тотығулық зақымдануын, мембрананың тұтастығының бұзылуын, ақуыздардың инактивтелуін және микроорганизмдер ДНҚ-сының фрагментациясын туындатады. Сынақ нысандары ретінде санитарлық-көрсеткіш және шартты-патогенді микрофлора өкілдері – Escherichia coli және Pseudomonas aeruginosa бактериялары пайдаланылды. Суық плазмамен 5 минут әсер ету екі культура үшін де микробтық ластануды едәуір төмендететіні көрсетілді, алайда бұл әсер Pseudomonas aeruginosa қатысты неғұрлым айқын. Алынған нәтижелер химиялық реагенттерді қолданбай бактерияларды инактивтеу тұрғысынан суық плазманың жоғары тиімділігін көрсетеді және оны суды тазарту және залалсыздандыру технологияларында қолданудың болашағын айғақтайды.

Түйін сөздер: *суық плазма, суды залалсыздандыру, бактериялар, экологиялық таза технологиялар.*

A.B. Zhumagazieva*, Zh.A. Iskakbayeva[1], U.Ye. Zhantikeyev[2], K.S. Bexeitova[2], S. Azat[2]
[1]Laboratory of Microbiology, JSC «Scientific Center for Anti-Infective Drugs»,
050013, Republic of Kazakhstan, Almaty, Satpayev Street, 22A
[2]Satbayev University,
050013, Republic of Kazakhstan, Almaty, 22 Satpaeva St.
*e-mail: r_dawa@mail.ru

WATER PURIFICATION BY THE COLD PLASMA METHOD: AN EXPERIMENTAL EVALUATION OF BACTERICIDAL ACTION

The aim of this study was to assess the effectiveness of a cold plasma unit for the disinfection of water contaminated with bacterial microflora. The CD Plasma experimental setup generates cold plasma by ionizing particles of the treated liquid, which is preliminarily converted into a two-phase liquid – gas medium. Cold plasma exerts a pronounced antimicrobial effect due to the synergistic influence of reactive oxygen and nitrogen species, ultraviolet radiation, and charged particles, which cause oxidative damage to the cell wall, disruption of membrane integrity, inactivation of proteins, and fragmentation of the DNA of microorganisms. As test objects, the bacteria Escherichia coli and Pseudomonas aeruginosa were used as representatives of sanitary-indicator and opportunistic microflora. It was shown that exposure to cold plasma for 5 minutes provides a significant reduction in microbial contamination with respect to both cultures, however to a greater extent with respect to Pseudomonas aeruginosa. The obtained results indicate the high effectiveness of cold plasma in the inactivation of bacteria without the use of chemical reagents and point to the prospects of its application in water treatment and disinfection technologies.

***Key words**: cold plasma, water disinfection, bacteria, environmentally friendly technologies.*

Сведения об авторах

Ардак Бисенбаевна Джумагазиева* – PhD доктор, заведующий лабораторией микробиологии АО «Научный центр противоинфекционных препаратов», Республика Казахстан; e-mail: r_dawa@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8610-7321.

Жанар Алибаевна Искакбаева – заместитель заведующего лабораторией микробиологии АО «Научный центр противоинфекционных препаратов», Республика Казахстан; e-mail: zhanara_07_74@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7428-0074.

Улан Жантикеев – PhD-докторант кафедры «Материаловедение, нанотехнологии и инженерная физика», Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И.Сатпаева, Республика Казахстан; e-mail: nurlybekov.ulan@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1200-2340.

Калампыр Сунакбаевна Бексейтова – PhD доктор, научный сотрудник лаборатории инженерного профиля, Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева, Республика Казахстан; e-mail: kalampyr.bexeitovas@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/ 0000-0002-5014-9407.

Сейтхан Азат – профессор, руководитель лаборатории инженерного профиля, Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева, Республика Казахстан; e-mail: s.azat@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9705-7438.

Авторлар туралы мәліметтер

Ардак Бисенбаевна Джумагазиева* – PhD, АҚ «Инфекцияға қарсы препараттар ғылыми орталығы», микробиология зертханасының меңгерушісі», Қазақстан Республикасы; e-mail: r_dawa@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8610-7321.

Жанар Алибаевна Искакбаева – микробиология зертханасы меңгерушісінің орынбасары, АҚ «Инфекцияға қарсы препараттар ғылыми орталығы», Қазақстан Республикасы; e-mail: zhanara_07_74@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7428-0074.

Ұлан Ержанұлы Жантикеев – «Материалтану, нанотехнологиялар және инженерлік физика» кафедрасының PhD-докторанты; Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: nurlybekov.ulan@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1200-2340.

Қалампыр Сунақбайқызы Бексейтова – PhD - докторы, Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, инженерлік бейінді зертхананың ғылыми қызметкер, Республика Казахстан; e-mail: kalampyr.bexeitovas@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/ 0000-0002-5014-9407.

Сейтхан Азат – профессор, инженерлік бейінді зертхананың басшысы, Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: s.azat@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9705-7438.

Information about the authors

Ardak Bissenbayevna Jumagaziyeva* – PhD, Head of the Microbiology Laboratory, JSC «Scientific Center for anti-infectious drugs», Republic of Kazakhstan; e-mail: r_dawa@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8610-7321.

Zhanar Alibayevna Iskakbayeva – Deputy Head of the Microbiology LaboratoryJSC «Scientific Center for anti-infectious drugs», Republic of Kazakhstan; e-mail: zhanara_07_74@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7428-0074.

Ulan Yerzhanuly Zhantikeyev – PhD-student of the Department of «Materials Science, Nanotechnology and Engineering Physics», Kazakh National Technical University after K.I.Satpaev, Republic of Kazakhstan; e-mail: nurlybekov.ulan@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1200-2340.

Kalampyr Sunakbayeva Bexeitova – PhD, researcher of the Laboratory of Engineering Profile, Kazakh National Technical University after K.I. Satpaev, Republic of Kazakhstan; e-mail: kalampyr.bexeitovas@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/ 0000-0002-5014-9407.

Seitkhan Azat – Professor, Head of the Laboratory of Engineering Profile, Kazakh National Technical University after K.I. Satpaev, Republic of Kazakhstan; e-mail: s.azat@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9705-7438.

Поступила в редакцию 06.01.2026
Поступила после доработки 03.03.2026
Принята к публикации 05.03.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-78

МРНТИ: 31.25.15

BY 4.0
Check for updates

Н.Е. Жабаева[1]*, Ш.Н. Жумагалиева[1], Ж.А. Абилов[1], А.Д. Газизов[2]
[1]Казахский национальный университет имени аль-Фараби,
050040, Республика Казахстан, г. Алматы, проспект аль-Фараби, 71
[2]Научно-исследовательский центр экологии и окружающей среды
050060, Республика Казахстан, г. Алматы, проспект аль-Фараби, 75В
*e-mail: nurai_zhabaeva@mail.ru

БЕНТОНИТ И ГУМИНОВЫЕ ВЕЩЕСТВА: СОСТАВ, СВОЙСТВА И МЕДИЦИНСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

Аннотация. *В статье представлен систематический обзор состава, физико-химических свойств и биологической активности бентонитовых глин, включая бентониты Таганского месторождения, а также гуминовых веществ и их применения в медицине. Актуальность работы обусловлена уникальными адсорбционными и регенеративными свойствами этих природных материалов, что определяет их перспективность в детоксикации и терапии различных патологий. Проанализированы литературные данные о минералогическом составе бентонита (преимущественно монтмориллонита), его набухающих и сорбционных характеристиках, а также о химическом составе гуминовых и фульвокислот. Рассмотрены основные направления медицинского применения: бентонитовые энтеросорбенты для коррекции острых и хронических интоксикаций и диарей, наружные лекарственные формы (гели и мази) для заживления ожогов и ран, а также нутрицевтическое и иммуномодулирующее применение гуминовых веществ. Анализ экспериментальных и клинических данных свидетельствует о синергетическом эффекте совместного использования бентонита и гуминовых комплексов, проявляющемся в повышенной сорбционной способности, пролонгированном действии и снижении токсичности. Полученные данные демонстрируют научную значимость изучения взаимодействия этих природных компонентов и их фармакологического потенциала. Практическая ценность работы заключается в обосновании перспектив разработки природных энтеросорбентов и биологически активных добавок детоксикационного действия.*

Ключевые слова: *бентонит, монтмориллонит, Таганское месторождение, гуминовые вещества, гуминовые кислоты, адсорбция, энтеросорбент, детоксикация.*

©Н.Е. Жабаева, Ш.Н. Жумагалиева, Ж.А. Абилов, А.Д. Газизов, 2026

Введение

Бентонитовые глины и гуминовые вещества давно привлекают внимание исследователей как природные вещества с уникальными адсорбционными и биологическими свойствами. Восточно-Казахстанский регион, включая Таганское месторождение Зайсанской впадины, относится к числу наиболее изученных объектов смектитового сырья. По данным минералого-геохимических исследований, содержание монтмориллонита в продуктивных горизонтах достигает 90-98 %, что определяет высокие сорбционные и набухающие свойства глин [1-2]. Бентониты активно изучаются как низкозатратные сорбенты для очистки загрязнённой среды и в инженерных барьерах [3]. В медицине природные глины используются как энтеросорбенты и целебные «лечебные глины» (пелотерапия) при отравлениях, дисбактериозах, кожных заболеваниях и ранних инфекциях [4]. Параллельно растёт интерес к гуминовым веществам – натуральным полимерам из гумуса, известными своими антиоксидантными, противовоспалительными и иммуностимулирующими эффектами. Современные обзоры подчёркивают их потенциал в качестве нутрицевтиков и фармацевтических агентов для различных патофизиологических состояний [5]. В связи с этим целью настоящего обзора стало рассмотрение состава и свойств Таганского бентонита и гуминовых веществ, а также обобщение данных об их применении в медицине.

Состав и свойства бентонита.

Бентонит – природный неорганический полимер, содержащий глинистые минералы группы смектитов, который образуется в результате изменения вулканического пепла при его взаимодействии с водой. Термин «бентонит» был предложен W.C. Knight в 1898 году после выявления соответствующих глин в районе Форт-Бентона (окрестности Rock River, штат Вайоминг, США). Для бентонитовых глин характерны выраженные набухающие, адсорбционные и коллоидно-дисперсные свойства [6].

Бентонитовые глины широко распространены во многих странах мира, включая Россию, США, Францию, Германию, Японию и Венгрию. Казахстан также располагает значительными запасами бентонитового сырья, представляющего интерес для различных отраслей промышленности и медицины [7].

На территории Казахстана выявлен ряд месторождений бентонитовых глин, включая Шардаринское месторождение (Южный Казахстан), месторождения впадины Каракия на полуострове Мангышлак, Кушмурунское и Верхне-Убаганское месторождения (Костанайская область), а также Андреевское месторождение в области Жетысу. Кроме того, в восточных и южных регионах Казахстана распространены месторождения цеолитов. В Восточном Казахстане залежи природных алюмосиликатов Приманракской группы относятся к отложениям мелового и палеогенового возраста. В южной части Зайсанской впадины расположены Таганское, Манракское и Динозавровое месторождения бентонитов, а также Тайжузгенское месторождение цеолитов [8].

Природные бентонитовые глины и цеолиты Восточного Казахстана обладают рядом практических преимуществ, среди которых:

- высокие адсорбционные характеристики, подтверждённые результатами исследований;
- доступность сырьевой базы и близость к потребителям;
- сравнительно низкая себестоимость по отношению к реагентам, применяемым в технологиях очистки сточных вод;
- устойчивость к климатическим факторам при транспортировке, хранении и использовании.

Таганское месторождение бентонитов расположено на территории Восточно-Казахстанской области в пределах Зайсанской впадины. Геологоразведочные исследования показали, что глины данного месторождения относятся преимущественно к натриевым бентонитам и характеризуются высокой степенью дисперсности, значительной набухающей способностью и высоким содержанием обменных ионов натрия [2, 7, 9].

Для более полной оценки сырьевого потенциала бентонитовых глин необходимо учитывать различия в их минералогическом составе и физико-химических свойствах в различных регионах Казахстана. Сравнительный анализ глин различных месторождений показывает, что их свойства могут существенно различаться в зависимости от содержания смектитовой фазы, примесных минералов и состава обменных катионов. Так, бентониты

Таганского месторождения характеризуются высоким содержанием монтмориллонита и устойчивостью гидродисперсий, что обеспечивает формирование стабильных коллоидных систем и выраженные тиксотропные свойства суспензий [10-12].

В отличие от них, глины месторождений Келеса и Урангая могут содержать повышенные количества кварца и других минеральных примесей, что влияет на устойчивость водных дисперсий и их реологические свойства [10].

Для бентонитов Кызылординских месторождений характерна более выраженная склонность к седиментации, что связано с особенностями минералогического состава и природой обменных катионов. Эти различия оказывают влияние на сорбционные свойства глин и перспективность их использования при создании сорбционных материалов и медицинских технологий [10].

Таблица 1 – Сравнительная характеристика бентонитовых глин Казахстана [10-12]

Месторождение	Тип бентонита	Основные катионы	Минералогические особенности	Особенности гидродисперсий
Таганское	преимущественно щелочной	Na^+, Ca^{2+}	высокое содержание монтмориллонита	высокая устойчивость и тиксотропия
Келес	смешанный	Ca^{2+}	присутствие кварца и примесей	склонность к осаждению
Урангай	смешанный	Ca^{2+}	вариабельный состав	менее стабильные дисперсии
Кызылординские месторождения	щелочноземельный	Ca^{2+}, Mg^{2+}	различное содержание смектитов	повышенная седиментация

Природный (необогащённый) бентонит является многокомпонентной минеральной системой и может содержать кварц, кристобалит, полевые шпаты, цеолиты и различные глинистые минералы. Основным компонентом бентонита является монтмориллонит – минерал диоктаэдрического типа, относящийся к группе смектитов. Именно монтмориллонит в значительной степени определяет набухание и адсорбцию бентонитовых глин. Для медицинских и фармацевтических целей, как правило, требуется очищенная (обогащённая) монтмориллонитовая фаза, которую получают путём соответствующей переработки природного бентонитового сырья [13]. Бентониты относятся к высокодисперсным системам; их состав в обобщённом виде может быть представлен формулой: $Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot nH_2O$. Структуру и физико-химические характеристики бентонитовых глин определяет монтмориллонит как основной породообразующий компонент. Минералы группы монтмориллонита (смектиты) проявляют ряд свойств, характерных для природных наноструктурированных частиц, что обусловлено их слоистой организацией и развитой поверхностью [14].

Монтмориллонит представляет собой слоистый алюмосиликат со структурой типа 2:1, в которой два тетраэдрических кремнекислородных слоя окружают один октаэдрический слой (алюминия/магния). В результате изоморфных замещений ($Si^{4+} \rightarrow Al^{3+}$ в тетраэдрических слоях и $Al^{3+} \rightarrow Mg^{2+}$ в октаэдрическом слое) формируется суммарный отрицательный заряд кристаллических пакетов. Этот заряд компенсируется межслоевыми катионами (например, Li^+, Na^+, Ca^{2+}), которые способны обмениваться на другие органические и неорганические катионы. Указанная особенность обусловливает гидрофильность, способность к набуханию и высокую адсорбционную активность монтмориллонита [13, 15].

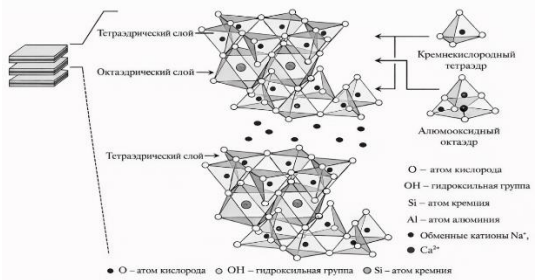


Рисунок 1 – Молекулярная (слоистая) структура монтмориллонита [16]

Свойства монтмориллонита существенно зависят от природы катионов межслоевого пространства (прежде всего Na^+ и Ca^{2+}). В промышленности широко распространены натриевая и кальциевая формы монтмориллонита, которые отличаются физико-химическими характеристиками и, соответственно, областями применения.

Натриевый монтмориллонит способен поглощать значительное количество воды и существенно увеличивать объём, проявляя высокую степень набухания. Благодаря выраженным коллоидно-реологическим свойствам он широко применяется в различных технологических процессах, включая буровые растворы и герметизирующие материалы [15].

Кальциевый монтмориллонит характеризуется меньшей набухающей способностью по сравнению с натриевой формой, однако может демонстрировать высокую адсорбционную активность по отношению к ряду растворённых соединений, что делает его перспективным компонентом сорбционных материалов, включая направления, связанные с детоксикационными технологиями [13, 17].

Классификация бентонитов по катионному составу, физико-химическим свойствам и направлениям применения приведена в таблице 2, что позволяет наглядно сопоставить основные типы бентонитовых глин и обосновать различия в их функциональном назначении.

Таблица 2 – Классификация бентонитов [18,19]

Тип бентонита	Химический состав	Физико-химические свойства	Области применения	Особенности
Щелочные бентониты	Монтмориллонит, $Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot nH_2O$	Многократное набухание в водных средах	Буровые растворы, связующие, катализаторы	Эффективны для получения энтеросорбентов
Щёлочноземельные бентониты	Монтмориллонит с высоким содержанием щёлочноземельных катионов Ca^{2+} и Mg^{2+}	Высокая адсорбционная и каталитическая активность	Фильтрация, очистка, рафинирование масел	Экологичность, высокая сорбционная ёмкость
Смешанные бентониты	Комбинация щелочных и щёлочноземельных катионов	Промежуточные свойства	Различные области в зависимости от состава	Сочетают свойства обеих групп

В соответствии с представленной классификацией Таганский бентонит относится преимущественно к щелочному типу бентонитовых глин, что определяет его высокую способность к набуханию, выраженные сорбционные свойства и значительную катионообменную ёмкость. Совокупность указанных характеристик делает данный вид бентонита перспективным для применения в медицинских и фармацевтических технологиях, включая разработку энтеросорбентов и биологически активных добавок детоксикационного действия.

Применение бентонита в медицине и фармации

Благодаря сочетанию высокой сорбционной способности, ионообменных свойств и биосовместимости бентонит получил широкое распространение в медицинской практике. Одним из наиболее изученных направлений является использование бентонита в качестве энтеросорбента для детоксикации организма при острых и хронических интоксикациях различного происхождения, включая пищевые отравления, микотоксикозы и воздействие тяжёлых металлов [4, 19].

Пероральное применение бентонита основано на его способности связывать токсичные вещества непосредственно в желудочно-кишечном тракте, предотвращая их всасывание в системный кровоток. Экспериментальные и прикладные исследования показали, что монтмориллонит эффективно адсорбирует микотоксины, бактериальные эндотоксины, вирусные частицы, а также ионы тяжёлых металлов, что делает его перспективным средством профилактики и коррекции интоксикационных состояний [20, 21].

Сорбционные свойства монтмориллонита по отношению к микотоксинам обусловлены его слоистой структурой типа 2:1, наличием отрицательного заряда слоёв и межслоевых обменных катионов, что определяет высокую удельную поверхность и катионообменную способность минерала. Взаимодействие микотоксинов с природным и модифицированным монтмориллонитом реализуется через совокупность физико-химических механизмов, вклад которых зависит от природы токсина и способа модификации глины. В частности, связывание

микотоксинов может происходить за счёт электростатических взаимодействий, водородных связей, гидрофобных эффектов, а также фиксации молекул на поверхности и в межслоевом пространстве минерала (интеркаляция). В результате снижается биодоступность токсинов в желудочно-кишечном тракте. Таким образом, монтмориллонит рассматривается как перспективный природный и модифицируемый сорбент для связывания микотоксинов [22].

Экспериментальные исследования также подтверждают высокую эффективность монтмориллонитовых глин при связывании различных микотоксинов. Показано, что кальциевая форма монтмориллонита способна эффективно адсорбировать афлатоксин B_1 в желудочно-кишечном тракте, снижая его биодоступность и токсическое воздействие на организм. Механизм защитного действия основан на адсорбции молекул токсина на активных поверхностях и в межслоевом пространстве минерала, что приводит к уменьшению концентрации свободного афлатоксина в кишечнике и снижению его всасывания в системный кровоток. Установлено, что модификация монтмориллонита органическими соединениями, такими как L-карнитин и холин, позволяет значительно повысить сорбционную ёмкость глины по отношению к афлатоксину. Частичная замена межслоевых катионов изменяет полярность поверхности минерала и создаёт более благоприятные условия для взаимодействия с гидрофобными молекулами токсина, что повышает эффективность его связывания [23].

Помимо микотоксинов, монтмориллонитовые глины проявляют высокую эффективность при связывании цианобактериальных токсинов. Установлено, что как кальциевые, так и натриевые формы монтмориллонита способны эффективно адсорбировать микоцистин (MC-LR). Процесс адсорбции хорошо описывается моделью Лэнгмюра, что свидетельствует о наличии ограниченного числа активных центров связывания на поверхности минерала. Основными механизмами взаимодействия являются электростатические взаимодействия и образование водородных связей между функциональными группами токсина и активными центрами монтмориллонита [24].

Биологические испытания на модельных организмах (Hydra vulgaris, Lemna minor и Caenorhabditis elegans) показали, что добавление небольших количеств монтмориллонитовых глин (0,05-0,1%) в среду значительно снижает токсическое действие микоцистина, обеспечивая защитный эффект до 60–80 %. Полученные результаты подтверждают перспективность применения монтмориллонитовых сорбентов для детоксикации природных токсинов [24].

Экспериментальные исследования подтверждают эффективность монтмориллонита в качестве энтеросорбента при интоксикациях металлами. В экспериментальной модели острой интоксикации железом у крыс интоксикацию моделировали пероральным введением сульфата железа ($FeSO_4$) в дозе 100 мг/кг массы тела. После этого животным вводили суспензию монтмориллонита перорально в дозах 0,5; 1,0 и 1,5 г/кг. Через 1 час после введения монтмориллонита определяли концентрацию железа в сыворотке крови. Установлено, что введение монтмориллонита в дозах 0,5 и 1,0 г/кг приводит к статистически значимому снижению уровня железа в сыворотке крови по сравнению с контрольной группой. Полученный эффект объясняется адсорбцией ионов Fe^{2+} на поверхности монтмориллонита и ионообменными процессами в желудочно-кишечном тракте, а также образованием защитного сорбционного слоя на слизистой оболочке кишечника, препятствующего всасыванию железа. Таким образом, монтмориллонит может рассматриваться как перспективный энтеросорбент для детоксикации при острых интоксикациях железом [25].

Особое место в клинической практике занимают препараты диоктаэдрического смектита, широко применяемые для лечения диареи различной этиологии. Установлено, что использование смектитсодержащих энтеросорбентов способствует снижению частоты и продолжительности диарейного синдрома, восстановлению защитного слизистого слоя кишечника и нормализации функции желудочно-кишечного тракта [26]. Эти препараты характеризуются высоким профилем безопасности и могут применяться как у взрослых, так и у детей.

Диосмектит относится к природным алюмосиликатным минералам группы смектитов и характеризуется высокой адсорбционной активностью, обусловленной его слоистой структурой и развитой удельной поверхностью. Благодаря этим свойствам он способен эффективно связывать бактерии, вирусы и их токсины, а также адсорбировать значительное количество воды и электролитов в желудочно-кишечном тракте. Установлено, что диосмектит

усиливает барьерные свойства слизистой оболочки кишечника, стабилизирует мукозный слой и способствует защите эпителиальных клеток от повреждающего действия патогенных факторов. Клинические исследования и метаанализы показывают, что применение диосмектита приводит к сокращению продолжительности диареи, уменьшению частоты и объёма стула, а также ускоряет восстановление функций желудочно-кишечного тракта. При этом препарат характеризуется хорошей переносимостью и высоким профилем безопасности, что подтверждает целесообразность его применения в комплексной терапии кишечных расстройств [27-29].

Особый интерес представляет использование бентонита и бентонитовых комплексов при лечении ожоговых поражений кожи. Экспериментальные модели показали, что бентонит оказывает выраженное регенеративное действие, ускоряя процессы эпителизации и восстановления дермальных структур. Бентонитовый комплекс обладает выраженным противовоспалительным действием. В тканях ожоговых ран отмечено статистически значимое снижение экспрессии провоспалительных цитокинов (IL-1β, TNF-α), а также ингибирование сигнального пути COX-2/PGE_2, играющего ключевую роль в поддержании воспалительной реакции. При этом уровень противовоспалительного цитокина IL-10, напротив, возрастал. Полученные данные указывают на то, что бентонит оказывает не только физико-адсорбционное, но и биологически активное противовоспалительное воздействие на клеточном уровне. [30]. Наружное применение бентонита основано на его способности адсорбировать экссудат, микроорганизмы и продукты воспаления. Бентонитовые гели, пасты и мази образуют на поверхности кожи защитный сорбционный слой, который снижает выраженность воспалительной реакции и создаёт благоприятные условия для репаративных процессов в тканях [30,31].

В последние годы активно развиваются исследования, направленные на создание полимерно-глинистых нанокомпозитов с использованием бентонита. В таких системах бентонит выполняет функцию не только сорбента, но и структурообразующего компонента, повышающего механическую прочность и стабильность лекарственных форм [32].

Современные системы доставки лекарственных веществ, в которых монтмориллонит – основной минералогический компонент бентонита – используется в сочетании с биосовместимыми полимерными матрицами, включая альгинат, хитозан, поливиниловый спирт и желатин. Показано, что формирование полимерно-глинистых гидрогелей и плёночных материалов обеспечивает эффективное включение лекарственных веществ за счёт процессов адсорбции, интеркаляции и иммобилизации в структуре композита. Установлено, что присутствие бентонита в полимерной матрице приводит к замедлению диффузии активных компонентов и позволяет целенаправленно регулировать кинетику их высвобождения. Данный эффект обусловлен ионообменными и сорбционными взаимодействиями между лекарственным веществом и монтмориллонитом, а также усложнением диффузионного пути внутри полимерно-глинистой структуры. В результате такие системы рассматриваются как перспективные основы для разработки лекарственных форм с контролируемым высвобождением [13, 33]. Полимерно-бентонитовые системы рассматриваются как перспективные носители для локальной доставки противовоспалительных, антимикробных и регенеративных препаратов. Такие системы находят применение в лечении ран, ожогов и хронических дерматологических заболеваний [33].

Несмотря на значительное количество исследований, посвящённых применению бентонита в медицине и фармации, перспективным направлением остаётся создание новых композиционных материалов на его основе с использованием природных биологически активных соединений. В частности, сочетание бентонита с гуминовыми веществами может привести к формированию функциональных сорбционных систем с улучшенными детоксикационными и биологическими свойствами. Однако данные о таких композициях остаются ограниченными, что обусловливает актуальность дальнейших исследований в данном направлении.

Гуминовые вещества: химический состав и свойства

Гуминовые вещества (ГВ) представляют собой сложную группу природных высокомолекулярных органических соединений, образующихся в результате процессов гумусообразования при биохимическом разложении растительных и животных остатков. Они широко распространены в почвах, торфяниках, бурых углях, сапропелях и природных водах и

играют ключевую роль в регуляции биогеохимических процессов и биологической активности природных систем [34].

Гуминовые вещества подразделяются на три основные группы: гуминовые кислоты – соединения с высоким молекулярным весом, содержащие карбоксильные (–COOH) и фенольные (–OH) группы, нерастворимые в воде, но растворимые в кислых или щелочных растворах; фульвокислоты (ФК) – низкомолекулярные, кислородсодержащие и высокобиоактивные соединения, растворимые в воде во всём диапазоне pH; и гумины (Г) – наиболее устойчивые и плохо растворимые компоненты, широко представленные в почвах и содержащие азот, серу и микроэлементы. Средний элементный состав гуминовых веществ характеризуется содержанием углерода 50-60%, водорода 3-6%, кислорода 30-40% и азота 1-5%, а также присутствием минеральных компонентов, таких как кальций, магний, калий и железо. Гуминовые вещества представляют собой высокомолекулярные гетерогенные соединения, формирующиеся в ходе биохимического окисления и гумфикации природного органического вещества [35].

Гуминовые вещества встречаются в различных природных источниках, включая почвы, торфяники, пелоиды и бурые угли. Их химический состав и физико-химические свойства могут существенно различаться в зависимости от геологического происхождения сырья. В научной литературе описаны гуминовые вещества, выделенные из различных природных источников и месторождений, включая пелоиды озера Тузколь, бурые угли Кендирликского, Кумускудукского и Ой-Карагайского месторождений, а также угли Кузнецкого бассейна [36-39].

Сравнительная характеристика гуминовых веществ из различных источников представлена в таблице 3. Как следует из данных, несмотря на сходную структурную организацию и наличие карбоксильных, фенольных и других кислородсодержащих функциональных групп, их содержание, молекулярная структура и реакционная способность могут различаться в зависимости от типа исходного сырья и условий формирования. Эти различия определяют вариативность сорбционных, ионообменных и биологически активных свойств гуминовых веществ.

Таблица 3 – Сравнительная характеристика гуминовых веществ различных месторождений

Месторождение	Тип природного сырья	Основные характеристики гуминовых веществ	Основные свойства	Источник
Тузколь (Алматинская область, Казахстан)	Пелоиды (лечебные грязи)	Гуминовые вещества представлены гуминовыми и фульвокислотами, содержащими карбоксильные и фенольные функциональные группы	Антиоксидантная активность, биологическая активность, сорбционные свойства	[36]
Кендирликское месторождение (Восточный Казахстан)	Бурый уголь	Высокое содержание гуминовых кислот, развитая ароматическая структура макромолекул	Сорбционная активность, способность к комплексообразованию с ионами металлов	[37]
Кумускудукское месторождение (Карагандинская область Казахстан)	Бурый уголь	Гуминовые вещества с развитой системой кислородсодержащих функциональных групп	Ионообменные и сорбционные свойства, способность связывать тяжелые металлы	[38]
Кузнецкое месторождение (Кемеровская область, Россия)	Бурый уголь	Гуминовые кислоты с выраженной макромолекулярной структурой и высоким содержанием функциональных групп	Высокая реакционная способность, сорбционные и комплексообразующие свойства	[38]
Ой-Карагайское месторождение (Алматинская область, Казахстан)	Бурый уголь	Гуминовые кислоты с ароматическими структурами и кислородсодержащими функциональными группами	Сорбционные и ионообменные свойства	[39]

Как следует из представленных данных, гуминовые вещества различных месторождений обладают сходной структурной организацией и характеризуются наличием карбоксильных, фенольных и других кислородсодержащих функциональных групп. Вместе с тем их содержание, молекулярная структура и реакционная способность могут изменяться в зависимости от типа исходного сырья и условий его формирования. Это определяет различия в сорбционных, ионообменных и биологически активных свойствах гуминовых веществ.

Применение гуминовых веществ в медицине

Разнообразие эффектов ГВ нашло отражение в медицинской практике и биологически активных добавках (БАД). В настоящее время ГК и ФК используются как нутрицевтики и адаптогены для улучшения обмена веществ, детоксикации и иммунной поддержки. Их вводят в состав пищевых добавок с целью стимуляции иммунитета и снятия окислительного стресса (надёжно повышая антиоксидантную защиту организма) [40]. При наличии заболеваний ЖКТ рекомендуют ГВ в виде пероральных препаратов: они нормализуют микробиоту и укрепляют слизистую желудочно-кишечного тракта. Так, на модельном эксперименте было показано, что лечение гуминовыми кислотами облегчает колит у мышей, восстанавливая повреждённую слизистую, снижая воспаление и нормализуя микробиоценоз кишечника [41].

В последние годы особое внимание уделяется применению гуминовых веществ в составе наружных лекарственных форм, что связано с их выраженными противовоспалительными и регенеративными свойствами. Впервые экспериментально оценена эффективность гуминовой кислоты в заживлении ран слизистой оболочки полости рта. Исследование выполнено на модели стандартных эксцизионных ран нёба у крыс линии Wistar, где гуминовую кислоту сравнивали с физиологическим раствором и хлоргексидина глюконатом как традиционным антисептическим средством. Гуминовую кислоту наносили местно в дозе 80 мг/кг ежедневно в течение семи дней с последующим наблюдением в течение трёх недель. Оценку эффективности проводили с использованием морфометрического анализа площади раны и гистологического исследования тканей на различных этапах заживления. Результаты показали, что гуминовая кислота достоверно ускоряет закрытие раневой поверхности уже на первой и второй неделях по сравнению с контрольной группой. На третьей неделе заживление в группе гуминовой кислоты было значительно более выраженным не только по сравнению с физиологическим раствором, но и по сравнению с хлоргексидином. Гистологически это проявлялось снижением выраженности воспалительной инфильтрации, формированием зрелой грануляционной ткани и полноценной эпителизацией раневой поверхности. Авторы связывают выявленный эффект с сочетанием антибактериальных и противовоспалительных свойств гуминовой кислоты, а также её способностью модулировать процессы регенерации тканей [42].

Результаты подтверждают целесообразность использования гуминовых веществ в составе наружных лекарственных форм и согласуются с данными, свидетельствующими о широком применении гуминовых и фульвокислот в виде гелей, кремов и мазей при воспалительных и аллергических поражениях кожи, включая дерматиты, экзему, псориаз и акне. Известно, что фульвокислотосодержащие препараты способствуют ускорению заживления ран, уменьшению зуда и гиперемии, что связывают с их противовоспалительным и регенеративным действием. В экспериментах *in vitro* на линии человеческих кератиноцитов показано, что предварительное воздействие гуминовых кислот снижает экспрессию провоспалительных цитокинов IL-1β и IL-6 и повышает жизнеспособность клеток при воспалительном стрессе, индуцированном урбанистическими загрязнителями. Установлено, что биологическая активность гуминовых кислот определяется их молекулярным составом и конформационной организацией, что обосновывает перспективы их применения в дерматологии в качестве природных противовоспалительных и защитных средств [43].

Некоторые гуминовые препараты вводят инъекционно, в первую очередь при аутоиммунных и воспалительных заболеваниях суставов. Экспериментальные исследования показали, что гуминовые кислоты обладают выраженным противовоспалительным и иммуномодулирующим действием при аутоиммунных патологиях. В работе, выполненной на модели адъювантно-индуцированного полиартрита у крыс, установлено, что развитие воспаления сопровождается лейкоцитозом, повышением уровня провоспалительных цитокинов и нарушением соотношения Т-лимфоцитарных субпопуляций. Введение гуминовых кислот приводило к снижению выраженности системного воспаления,

нормализации иммунологических показателей и восстановлению баланса клеточного иммунитета [44].

Помимо терапевтических форм, гуминовые вещества используются в фармацевтических препаратах в качестве вспомогательных веществ. Благодаря своему полисахаридоподобному строению и поверхностно-активным свойствам гуминовые вещества применяются при разработке лекарственных носителей. Показано, что гуминовые кислоты могут наноситься на поверхности полимеров для получения наночастиц лекарственных препаратов. Полученные наночастицы гуминовых кислот проявляют фунгицидную активность и представляют интерес для применения в косметической и фармацевтической промышленности. В работе [45] показана возможность получения pH-чувствительных наночастиц на основе гуминовых кислот путём контролируемой протонизации их функциональных групп. Установлено, что изменение кислотности среды приводит к формированию коллоидно стабильных частиц наноразмерного диапазона, биологическая активность которых существенно зависит от конформационного состояния и поверхностного заряда. Экспериментально доказано, что протонированные формы гуминовых кислот проявляют выраженную противогрибковую активность, что подтверждает перспективность использования модифицированных гуминовых кислот в качестве основы для разработки наружных и наноструктурированных лекарственных форм с антимикробным и дерматологическим действием.

В фармацевтической отрасли ГВ рассматриваются как функциональные ингредиенты для создания новых форм лекарств. Благодаря их стабилизирующим, детоксицирующим и мембраностабилизирующим свойствам, создаются препараты на основе гуматов для местного и системного применения. Например, существуют фармпрепараты с гуматами натрия и калия для терапии желудочно-кишечных заболеваний и дерматозов (снимая воспаление и убирая отёк). В состав некоторых БАДов для людей входят экстракты лигнитов и сапропелей как источники гуминовых кислот.

Поскольку гуминовые вещества обладают профилактическим и терапевтическим потенциалом в отношении широкого спектра заболеваний, в настоящее время на рынке представлен ряд пищевых добавок на их основе, предназначенных для применения у человека (см. таблицу 4). Наиболее распространённой формой таких добавок являются капсулы, однако также применяются суспензии, характеризующиеся более высокой биодоступностью и обеспечивающие более удобное введение активных компонентов.

Таблица 4 – Биологически активные добавки на основе гуминовых веществ и их формы выпуска [35]

Название продукта	HA (мг)	FA (мг)	Hu (мг)	Форма применения	Назначение (по данным производителя)	Производитель
Detox Fulvic/Humic Foot Soak	800	50	-	порошок	Детоксикация; минеральная поддержка; уход за кожей	The Natural Edge
Fulvic/Humic Minerals, Inner Vitality	2.2	8.3	-	суспензия	Поддержка желудочно-кишечного тракта; иммуномодулирующее и детоксикационное действие	Morning Star Minerals
HUMAC® Nativ	460	-	180	капсула	Сорбция токсинов; антиоксидантное действие; восполнение микроэлементов	HUMAC®
HUMINIQUM Sirup	20	48	-	сироп	Антиоксидантное и детоксикационное действие; иммунная поддержка	HYMATO PRODUCTS Kft.

Примечание – HA (humic acids) – гуминовые кислоты; FA (fulvic acids) – фульвокислоты; Hu (humins) – гумины.

Совместное применение бентонита и гуминовых веществ в медицине

Совместное применение бентонита и гуминовых веществ представляет значительный интерес для медицинских и фармацевтических исследований, поскольку данные природные компоненты обладают комплементарными физико-химическими и биологическими свойствами.

Бентонит (прежде всего монтмориллонит) – это природная 2:1 алюмосиликатная глина с высокими сорбционными свойствами, обладающая накапливающим и набухающим эффектом благодаря отрицательному заряду слоёв и обменным катионам между ними.[13]

Гуминовые вещества (гуминовые и фульвокислоты) – высокомолекулярные органические комплексы, образующиеся при разложении растительных остатков и широко распространённые в почвах и водах [35]. Следует отметить, что свойства гуминовых веществ могут существенно различаться в зависимости от их природного происхождения (почвы, торф, бурый уголь и др.) и способа их выделения, что необходимо учитывать при анализе их биологических эффектов. Они содержат многочисленные карбоксильные, фенольные и азотсодержащие группы, придающие им биологическую активность (антиоксидантную, иммуномодулирующую, сорбционную). Комбинированное использование бентонита и гуминовых веществ оправдано синергией их функций: бентонит выступает жёсткой матрицей и универсальным сорбентом, а гуминовые вещества – биоактивным компонентом с широким спектром действия.

Совместное введение этих компонентов обычно приводит к значительному повышению общей сорбционной ёмкости по сравнению с их раздельным применением. Например, отмечено, что так называемые глино-гумусовые комплексы обладают большей сорбционной способностью в отношении органических веществ, чем чистые гуминовые соединения или отдельные глинистые минералы [46]. Это объясняется образованием дополнительных комплексов на поверхности бентонита с включением фрагментов гуминовых молекул: в исследованиях природных гуминовых веществ, выделенных из почвенных и природных органоминеральных систем, обнаружено, что полиметиленовые и алкиламмониевые участки гуминовых молекул естественным образом входят в межслоевое пространство монтмориллонита. На молекулярном уровне положительно заряженные фрагменты гуминовых веществ (например, аммониевые группы) электростатически взаимодействуют с отрицательно заряженной силикатной пластинкой бентонита, при этом гидрофобные участки гуминового полимера направлены вдоль поверхности глины [47]. Таким образом, образуются стабилизированные органоминеральные комплексы, усиливающие поглощение и связывание разнообразных токсинов и метаболитов. Механизмы связывания включают электростатические взаимодействия, водородные связи, π–π–стэкинг и гидрофобные эффекты между ароматическими фрагментами гуминовых кислот и поверхностью глины [48]. Обменные катионы монтмориллонита (Li^+, Na^+, Ca^{2+} и др.) также могут участвовать в комплексообразовании с органическими анионами гуминовых кислот, что дополнительно стабилизирует композицию [15, 48].

Комбинированные системы бентонит-гуминовые вещества демонстрируют пролонгированный эффект действия и смягчение токсических воздействий. Гуминовый компонент, адсорбированный на бентонитовой матрице, способен постепенно высвобождаться, обеспечивая длительное сорбционное и детоксикационное действие. Бентонит фиксирует гуминовые молекулы и токсины в желудочно-кишечном тракте, уменьшая их абсорбцию и обеспечивая более мягкое действие. Эффективность подобных систем в значительной степени зависит от происхождения гуминовых веществ и используемых глинистых минералов. Так, в одном из исследований [49] был получен композит на основе натриевого гумата, выделенного из природного сырья месторождений Wuhai и Erdos (Внутренняя Монголия, Китай), и активированного натриевого бентонита, исходным сырьём для которого служил кальциевый бентонит того же региона. Полученный гумат-бентонит-полимерный композит показал высокую эффективность удаления тяжёлых металлов из водных растворов, достигая 94,7% для Pb^{2+}, 90,9% для Ni^{2+} и 90,2% для Cd^{2+}.

Экспериментальные исследования на животных также подтверждают детоксикационный потенциал гуминовых веществ. В одном из исследований [50] использовалась коммерческая гуминовая кислота (препарат Enrich Feed, Пакистан), добавляемая в корм бройлеров в концентрациях 0,1-0,3%, что позволило снизить токсическое действие афлатоксина. Было отмечено улучшение биохимических показателей крови, снижение содержания афлатоксина B_1 в печени и уменьшение проявлений токсического поражения организма [50].

В токсикологических исследованиях также изучалась безопасность гуминовых препаратов различного происхождения. Так, в работе [51] исследовался препарат blk.333, представляющий собой смесь гуминовых и фульвовых кислот, полученных из окисленного

лигнита месторождения в Альберте (Канада). Проведённые испытания показали отсутствие генотоксичности и хорошую переносимость препарата при пероральном применении, что подтверждает перспективность гуминовых соединений для медицинских и пищевых применений [51].

Таким образом, комбинированные системы на основе бентонита и гуминовых веществ демонстрируют синергетические преимущества: повышенную сорбционную ёмкость, пролонгированное действие и снижение токсичности благодаря комплексообразованию, ионообменным процессам и многообразию физико-химических взаимодействий между функциональными группами гуминовых веществ и поверхностью глинистых минералов [49-51].

Комплексные системы бентонит-гуминовые вещества перспективны в качестве энтеросорбентов и пищевых добавок. Бентонитовые энтеросорбенты (на основе монтмориллонита) уже применяются в медицине для лечения острых отравлений, диареи и других нарушений ЖКТ благодаря сильной адсорбции токсинов и микробных метаболитов [13]. Дополнение подобных препаратов гуминовыми компонентами может усиливать детоксикационные свойства и нормализовать микрофлору кишечника. Аналоги гуминовых добавок в ветеринарии и пищевой промышленности показали эффективность в связывании пищевых токсинов и восстановлении функций ЖКТ (например, гуматы улучшают кислотно-щелочной баланс и формируют защитную слизистую плёнку в кишечнике, повышая устойчивость к интоксикации). Исследования на животных подтверждают пользу гуминовых веществ при интоксикациях: введение ГК в корм улучшало весовые параметры и снижало смертность кур при действии афлатоксинов [49-51].

На основе сочетания бентонита и гуминовых веществ создаются гибридные адсорбенты, обладающие расширенным спектром действия: они могут связать не только неорганические токсины, но и органические соединения благодаря функциональным группам гуминов, сохраняя при этом адсорбирующие свойства глины. Эти системы уже используются как безопасные БАДы и прототипы лекарственных энтеросорбентов, а их дальнейшая оптимизация (например, улучшение качества сырья, стандартизация экстрактов, разработка новых технологических форм) открывает широкие перспективы в профилактике и терапии различных патологий при минимальных рисках побочных эффектов.

Заключение

В заключение следует отметить, что бентонит, богатый монтмориллонитом, обладает выраженными набухающими и сорбционными свойствами, что делает его эффективным компонентом энтеросорбентов для коррекции острых и хронических интоксикаций. Гуминовые и фульвокислоты демонстрируют антиоксидантные, противовоспалительные и иммуномодулирующие свойства, способствуя нормализации микробиоценоза кишечника и регенерации повреждённых тканей. Совместное применение бентонита и гуминовых препаратов усиливает адсорбцию токсинов и обеспечивает пролонгированный терапевтический эффект при минимальных побочных проявлениях. Таким образом, результаты проведённого анализа литературных данных свидетельствуют о высокой перспективности создания новых адсорбционных лекарственных форм и пищевых добавок на основе бентонит-гуминовых композитов. Такие системы могут быть использованы в терапии и профилактике интоксикаций, а также воспалительных и дерматологических заболеваний, обеспечивая детоксикацию организма и поддержку иммунной функции.

Список литературы

1. Tagan Bentonite Company. Bentonite from Tagan deposit. https://tagbent.com/ (дата обращения: 16.12.2025).
2. Сапаргалиев Е.М. Особенности генезиса Таганского месторождения бентонитов в Зайсанской впадине / Е.М. Сапаргалиев, М.М. Кравченко // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. – 2007. – № 3. – С. 40-46.
3. Experimental studies on wastewater sorption treatment with subsequent disposal of used sorbents / G.K. Daumova et al // Chemical Engineering Transactions. – 2018. – Vol. 70. – P. 2125-2130. https://doi.org/10.3303/CET1870355.
4. Moosavi M. Bentonite Clay as a Natural Remedy: A Brief Review / M. Moosavi // Iranian Journal of Public Health. – 2017. – V. 46. № 9. – P. 1176-1183. https://doi.org/10.1007/s12272-010-0715-2.

5. Gvozdeva Y. Biomedical Applications of Humic Substances: From Natural Biopolymers to Therapeutic Agents / Y. Gvozdeva, P. Peneva, P. Katsarov // Antioxidants (Basel). – 2025. – Vol. 14. – № 9. – Art. 1139. https://doi.org/10.3390/antiox14091139.
6. Eisenhour D.D. Bentonite and Its Impact on Modern Life / D.D. Eisenhour, R.K. Brown // Elements. – 2009. – Vol. 5, № 2. – P. 83-88. https://doi.org/10.2113/gselements.5.2.83.
7. Гылымхан Н.Т. Возможности использования бентонитовых глин в медицине / Н.Т. Гылымхан, Ш.Н. Жумагалиева, Ж.А. Абилов // Вестник Казахского национального университета. Серия химическая. – Алматы, 2016. – № 4. – С. 48-54.
8. Sunakbaeva D.K. Development of nature protection measures on the basis of bentonite clays and products of utilization of sulfur-containing wastes / D.K. Sunakbaeva // Ecology. – Taraz: Dulaty University, 2009. – P. 20.
9. Сапаргалиев Е.М. Влияние вещественного состава сырья на технологические свойства бентонитов Таганского месторождения / Е.М. Сапаргалиев // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. – 2007. – № 2. – С. 77-81.
10. Chemical and mineralogical analysis of Kazakhstan clays and study of their hydrodispersive properties / A. Assanov et al // Reports of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. – 2025. – Vol. 2. – P. 182-205.
11. Quantitative assessment of the use of Kazakhstan montmorillonite clays as sorbent carriers for pharmaceutical substances / D. Bolatkan et al // Physical Sciences and Technology. – 2025. – Vol. 12. – P. 121-133.
12. Characterization of Kazakhstan's Clays by Mössbauer Spectroscopy and X-ray Diffraction / A. Shokanov et al // Minerals. – 2024. – Vol. 14. – Article 713. https://doi.org/10.3390/min14070713.
13. Application of montmorillonite in bentonite as a excipient in drug delivery systems Park J.-H., / H.-J. Shin et al // Journal of Pharmaceutical Investigation. – 2016. – Vol. 46, № 4. – P. 363-375. https://doi.org/10.1007/s40005-016-0258-8.
14. Вернигорова В.Н. Материаловедение полимеров и композиционных материалов на их основе : монография / В.Н. Вернигорова, С.М. Саденко. – Пенза : ПГУАС, 2013. – 420 с.
15. Önal M. Physicochemical properties of bentonites: an overview / M. Önal // Communications, Faculty of Sciences, University of Ankara. Series B: Chemistry and Chemical Engineering. – 2006. – Vol. 52, № 2. – P. 7-21. https://communications.science.ankara.edu.tr/index.php/commb/article/view/83.
16. Affaf N. Montmorillonite (MMT) nanoclay in smart coatings for corrosion protection of metal alloy: a brief review / N. Affaf, J. Alias, N. Alang // Journal of Physics: Conference Series. – 2024. – Vol. 2688. – Art. 012012. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2688/1/012012.
17. Effect of purified zearalenone with or without modified montmorillonite on nutrient availability, genital organs and serum hormones in post-weaning piglets / S.Z. Jiang et al // Livestock Science. – 2012. – Vol. 144. – P. 110-118. https://doi.org/10.1016/j.livsci.2011.11.004.
18. Evaluation of the void index method on the mechanical and thermal properties of compressed earth blocks stabilized with bentonite clay / S. Lahbabi et al // Construction and Building Materials.– 2023. – Vol. 393. – Art. 132114. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132114.
19. Investigating the influence of bentonite colloids on strontium sorption in granite under various hydrogeochemical conditions / F. Cai et al // Science of the Total Environment. – 2023. – Vol. 900. – Art. 165819. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165819.
20. Lagaly G. Colloid clay science / G. Lagaly // Developments in Clay Science. – 2006. – Vol. 1. – P. 141-245. 10.1016/S1572-4352(05)01005-6.
21. Adsorption and desorption effect of modified bentonite on soil heavy metal Pb/Cd and the feasibility assessment of reducing the ecotoxicity / X. Yang et al // Environmental Sciences Europe. – 2025. – Vol. 37. – Art. 105. https://doi.org/10.1186/s12302-025-01144-3.
22. Research progress on the raw and modified montmorillonites as adsorbents for mycotoxins: A review / Y. Li et al // Applied Clay Science. – 2018. – Vol. 163. – P. 299-311. https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.07.032.
23. Phillips T.D. Development of high-capacity enterosorbents for aflatoxin B1 / T.D. Phillips, S.L. Lemke, P.G. Grant // Journal of Agricultural and Food Chemistry. – 2002. – Vol. 50, No. 3. – P. 748-754. https://doi.org/10.1021/jf010916.
24. Application of edible montmorillonite clays for the adsorption and detoxification of microcystin / M. Wang et al // ACS Applied Bio Materials. – 2021. – Vol. 4, № 9. – P. 7254-7265. https://doi.org/10.1021/acsabm.1c00779.

25. Efficacy of orally administered montmorillonite for acute iron poisoning detoxification in rat / P.M. Moosavi et al // Applied Clay Science. – 2015. – Vol. 103. – P. 62-66. https://doi.org/10.1016/j.clay.2014.11.010.
26. Dupont C. Anti-diarrheal effects of diosmectite in the treatment of acute diarrhea / C. Dupont, B. Vernisse // Pediatric Drugs. – 2012. – Vol. 11, № 2. – P. 89-99. https://doi.org/10.2165/00148581-200911020-00001.
27. Das R.R. Efficacy and safety of diosmectite in acute childhood diarrhoea: a meta-analysis / R.R. Das, J. Sankar, S.S. Naik // Archives of Disease in Childhood. – 2015. – Vol. 100. – P. 1-9. https://doi.org/10.1136/archdischild-2014-307632.
28. Efficacy of Diosmectite (Smecta) in the Treatment of Acute Watery Diarrhoea in Adults: a multicentre randomized double-blind placebo-controlled study / F. Khediri et al // Gastroenterology Research and Practice. – 2011. – Article ID 783196. https://doi.org/10.1155/2011/783196.
29. Mechanism of action of diosmectite in gastrointestinal disorders // Journal of Gastroenterology. – 2017. https://doi.org/10.1007/s13099-017-0172-2.
30. Regenerative and anti-inflammatory effect of a novel bentonite complex on burn wounds / J.Y. Lee et al // Veterinary Medicine and Science. – 2022. – Vol. 8, № 3. – P. 2422-2433. https://doi.org/10.1002/vms3.908.
31. Clay therapy in wound healing: a brief review of the literature / C. Ovincy et al // Journal of Wound Management and Research. – 2024. – Vol. 20, № 1. – P. 1-8. https://doi.org/10.22467/jwmr.2023.02558.
32. Alexandre M. Polymer-layered silicate nanocomposites: preparation, properties and uses of a new class of materials / M. Alexandre, P. Dubois // Materials Science and Engineering . – 2000. – Vol. 28. – P. 1-63. https://doi.org/10.1016/S0927-796X(00)00012-7.
33. Bentonite-in hypromellose-poloxamer sol-gel for corneal application of trimetazidine: Study of rheology and ocular anti-inflammatory potential / R. Swain et al // International Journal of Biological Macromolecules. – 2023. – Vol. 242, Part 1. – Article 124628. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.124628.
34. Journey of humic substances in healthcare: Regulatory and development perspective / M. Mirza et al // Natural Resources for Human Health. – 2025. – Vol. 5, № 4. – P. 576-595. https://doi.org/10.53365/nrfhh/204288.
35. Humic Substances as a Versatile Intermediary / S. Hriciková et al // Life. – 2023. – Vol.13, № 4. – Art. 858. https://doi.org/10.3390/life13040858.
36. Physicochemical and antioxidant properties of humic acids of low-mineralized peloids of the Tuzkol deposit / Zh.K. Kairbekov et al // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series Chemistry and Technology. – 2021. – Vol. 3, № 447. – P. 48-53. https://doi.org/10.32014/2021.2518-1491.49.
37. Получение модифицированного сорбента из гуминовых веществ бурого угля Кендырлыкского месторождения / Б.С. Саурбаева и др. // Вестник ВКТУ. – 2023. – №1. – С. 204-210. https://doi.org/10.51885/1561-4212-2023-1-204.
38. Study of the properties of humic acids synthesized from brown coal of the Kuznetsk and the Kumuskuduk deposits / S. Tyanakh et al // Academic scientific journal of chemistry. – 2025. – Vol. 3, № 464. – P. 255-273. https://doi.org/10.32014/2025.2518-1491.315.
39. Оптимизация процесса выделения гуминовых кислот из угля Ой-Карагайского месторождения / Ж.К. Каирбеков и др. // Вестник КазНУ. Серия химическая. – 2012. – № 4(68). – С. 79-83.
40. Gvozdeva Y. Biomedical Applications of Humic Substances: From Natural Biopolymers to Therapeutic Agents / Y. Gvozdeva, P. Peneva, P. Katsarov // Antioxidants (Basel). – 2025. – Vol. 14, № 9. – Art. 1139. https://doi.org/10.3390/antiox14091139.
41. Humic acids alleviate dextran sulfate sodium-induced colitis by positively modulating gut microbiota / J. Huang et al // Frontiers in Microbiology. – 2023. – Vol. 14. – Art. 1147110. https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1147110.
42. Humic Acid Enhances Wound Healing in the Rat Palate / M. Çalışır et al // Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine. – 2018. – Vol. 2018. – Art. 1783513. https://doi.org/10.1155/2018/1783513.

43. Antiinflammatory activity and potential dermatological applications of characterized humic acids from a lignite and a green compost / M.V. Verrillo et al // Scientific Reports. – 2022. – Vol. 12. – Art. 2152. https://doi.org/10.1038/s41598-022-06251-2.
44. Жернов Ю.В. Влияние гуминовых кислот на аутоиммунное воспаление при адъювантного полиартрита / Ю.В. Жернов, Н.П. Аввакумова, М.Р. Хаитов // Российский журнал аллергологии. – 2017. – Т. 14, № 1S. – С. 44-45. https://rusalljournal.ru/raj/article/view/210.
45. Motta F.L. Deprotonation and protonation of humic acids as a strategy for the technological development of pH-responsive nanoparticles with fungicidal potential / F.L. Motta, B.A.G. Melo, M.H.A. Santana // New Biotechnology. – 2016. – Vol. 33. – P. 773-780. https://doi.org/10.1016/j.nbt.2016.07.003.
46. Федотов Г.Н. Аллелотоксичность почв и способы уменьшения ее негативного влияния на начальную стадию развития растений / Г.Н. Федотов, С.А. Шоба, И.В. Горепекин // Почвоведение. – 2020. – № 8. – С. 1007-1015. https://doi.org/10.31857/S0032180X20080067.
47. Соколовский Д.В. Природные гуминовые вещества в составе окружающего Bentonite humus system. – 2021. https://journals.eco-vector.com/0869-5652/article/view/13492 (дата обращения: 05.01.2026).
48. Therapeutic Efficiency of Humic Acids in Intoxications / J. Vašková et al // Life. – 2023. – Vol. 13, № 4. – Art. 971. https://doi.org/10.3390/life13040971.
49. Preparation of Humic Acid–Bentonite–Polymer Composite and Investigation of Its Efficiency for the Removal of Nickel, Cadmium and Lead Ions from Wastewater / E.L.M. Amutenya et al. – 2021. https://ssrn.com/abstract=3968030 (дата обращения: 05.01.2026).
50. Arafat R.Y. Evaluation of Humic Acid as an Aflatoxin Binder in Broiler Chickens / R.Y. Arafat, S.H. Khan, Saima // Annals of Animal Science. – 2017. – Vol. 17, № 1. – P. 241-255. https://doi.org/10.1515/aoas-2016-0050.
51. A toxicological evaluation of a fulvic and humic acids preparation / T.S. Murbach et al // Toxicology Reports. – 2020. – Vol. 7. – P. 1242-1254. https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2020.08.030.

References

1. Tagan Bentonite Company. Bentonite from Tagan deposit. https://tagbent.com/ (data obrashcheniya: 16.12.2025). (In English).
2. Sapargaliev E.M. Osobennosti genezisa Taganskogo mestorozhdeniya bentonitov v Zaisanskoi vpadine / E.M. Sapargaliev, M.M. Kravchenko // Vestnik RUDN. Seriya: Inzhenernye issledovaniya. – 2007. – № 3. – S. 40-46. (In Russian).
3. Experimental studies on wastewater sorption treatment with subsequent disposal of used sorbents / G.K. Daumova et al // Chemical Engineering Transactions. – 2018. – Vol. 70. – P. 2125-2130. https://doi.org/10.3303/CET1870355. (In English).
4. Moosavi M. Bentonite Clay as a Natural Remedy: A Brief Review / M. Moosavi // Iranian Journal of Public Health. – 2017. – V. 46. № 9. – P. 1176-1183. https://doi.org/10.1007/s12272-010-0715-2. (In English).
5. Gvozdeva Y. Biomedical Applications of Humic Substances: From Natural Biopolymers to Therapeutic Agents / Y. Gvozdeva, P. Peneva, P. Katsarov // Antioxidants (Basel). – 2025. – Vol. 14. – № 9. – Art. 1139. https://doi.org/10.3390/antiox14091139. (In English).
6. Eisenhour D.D. Bentonite and Its Impact on Modern Life / D.D. Eisenhour, R.K. Brown // Elements. – 2009. – Vol. 5, № 2. – P. 83-88. https://doi.org/10.2113/gselements.5.2.83. (In English).
7. Gylymkhan N.T. Vozmozhnosti ispol'zovaniya bentonitovykh glin v meditsine / N.T. Gylymkhan, Sh.N. Zhumagalieva, Zh.A. Abilov // Vestnik Kazakhskogo natsional'nogo universiteta. Seriya khimicheskaya. – Almaty, 2016. – № 4. – S. 48-54. (In Russian).
8. Sunakbaeva D.K. Development of nature protection measures on the basis of bentonite clays and products of utilization of sulfur-containing wastes / D.K. Sunakbaeva // Ecology. – Taraz: Dulaty University, 2009. – P. 20. (In English).
9. Sapargaliev E.M. Vliyanie veshchestvennogo sostava syr'ya na tekhnologicheskie svoistva bentonitov Taganskogo mestorozhdeniya / E.M. Sapargaliev // Vestnik RUDN. Seriya: Inzhenernye issledovaniya. – 2007. – № 2. – S. 77-81. (In Russian).
10. Chemical and mineralogical analysis of Kazakhstan clays and study of their hydrodispersive properties / A. Assanov et al // Reports of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. – 2025. – Vol. 2. – P. 182-205. (In English).

11. Quantitative assessment of the use of Kazakhstan montmorillonite clays as sorbent carriers for pharmaceutical substances / D. Bolatkan et al // Physical Sciences and Technology. – 2025. – Vol. 12. – P. 121-133. (In English).
12. Characterization of Kazakhstan's Clays by Mössbauer Spectroscopy and X-ray Diffraction / A. Shokanov et al // Minerals. – 2024. – Vol. 14. – Article 713. https://doi.org/10.3390/min14070713. (In English).
13. Application of montmorillonite in bentonite as a excipient in drug delivery systems Park J.-H., / H.-J. Shin et al // Journal of Pharmaceutical Investigation. – 2016. – Vol. 46, № 4. – P. 363-375. https://doi.org/10.1007/s40005-016-0258-8. (In English).
14. Vernigorova V.N. Materialovedenie polimerov i kompozitsionnykh materialov na ikh osnove : monografiya / V.N. Vernigorova, S.M. Sadenko. – Penza : PGUAS, 2013. – 420 s. (In Russian).
15. Önal M. Physicochemical properties of bentonites: an overview / M. Önal // Communications, Faculty of Sciences, University of Ankara. Series B: Chemistry and Chemical Engineering. – 2006. – Vol. 52, № 2. – P. 7-21. https://communications.science.ankara.edu.tr/index.php/commb/article/view/83. (In English).
16. Affaf N. Montmorillonite (MMT) nanoclay in smart coatings for corrosion protection of metal alloy: a brief review / N. Affaf, J. Alias, N. Alang // Journal of Physics: Conference Series. – 2024. – Vol. 2688. – Art. 012012. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2688/1/012012. (In English).
17. Effect of purified zearalenone with or without modified montmorillonite on nutrient availability, genital organs and serum hormones in post-weaning piglets / S.Z. Jiang et al // Livestock Science. – 2012. – Vol. 144. – P. 110-118. https://doi.org/10.1016/j.livsci.2011.11.004. (In English).
18. Evaluation of the void index method on the mechanical and thermal properties of compressed earth blocks stabilized with bentonite clay / S. Lahbabi et al // Construction and Building Materials.– 2023. – Vol. 393. – Art. 132114. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132114. (In English).
19. Investigating the influence of bentonite colloids on strontium sorption in granite under various hydrogeochemical conditions / F. Cai et al // Science of the Total Environment. – 2023. – Vol. 900. – Art. 165819. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165819. (In English).
20. Lagaly G. Colloid clay science / G. Lagaly // Developments in Clay Science. – 2006. – Vol. 1. – P. 141-245. 10.1016/S1572-4352(05)01005-6. (In English).
21. Adsorption and desorption effect of modified bentonite on soil heavy metal Pb/Cd and the feasibility assessment of reducing the ecotoxicity / X. Yang et al // Environmental Sciences Europe. – 2025. – Vol. 37. – Art. 105. https://doi.org/10.1186/s12302-025-01144-3. (In English).
22. Research progress on the raw and modified montmorillonites as adsorbents for mycotoxins: A review / Y. Li et al // Applied Clay Science. – 2018. – Vol. 163. – P. 299-311. https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.07.032. (In English).
23. Phillips T.D. Development of high-capacity enterosorbents for aflatoxin B1 / T.D. Phillips, S.L. Lemke, P.G. Grant // Journal of Agricultural and Food Chemistry. – 2002. – Vol. 50, No. 3. – P. 748-754. https://doi.org/10.1021/jf010916. (In English).
24. Application of edible montmorillonite clays for the adsorption and detoxification of microcystin / M. Wang et al // ACS Applied Bio Materials. – 2021. – Vol. 4, № 9. – P. 7254-7265. https://doi.org/10.1021/acsabm.1c00779. (In English).
25. Efficacy of orally administered montmorillonite for acute iron poisoning detoxification in rat / P.M. Moosavi et al // Applied Clay Science. – 2015. – Vol. 103. – P. 62-66. https://doi.org/10.1016/j.clay.2014.11.010. (In English).
26. Dupont C. Anti-diarrheal effects of diosmectite in the treatment of acute diarrhea / C. Dupont, B. Vernisse // Pediatric Drugs. – 2012. – Vol. 11, № 2. – P. 89-99. https://doi.org/10.2165/00148581-200911020-00001. (In English).
27. Das R.R. Efficacy and safety of diosmectite in acute childhood diarrhoea: a meta-analysis / R.R. Das, J. Sankar, S.S. Naik // Archives of Disease in Childhood. – 2015. – Vol. 100. – P. 1-9. https://doi.org/10.1136/archdischild-2014-307632. (In English).
28. Efficacy of Diosmectite (Smecta) in the Treatment of Acute Watery Diarrhoea in Adults: a multicentre randomized double-blind placebo-controlled study / F. Khediri et al // Gastroenterology Research and Practice. – 2011. – Article ID 783196. https://doi.org/10.1155/2011/783196. (In English).
29. Mechanism of action of diosmectite in gastrointestinal disorders // Journal of Gastroenterology. – 2017. https://doi.org/10.1007/s13099-017-0172-2. (In English).

30. Regenerative and anti-inflammatory effect of a novel bentonite complex on burn wounds / J.Y. Lee et al // Veterinary Medicine and Science. – 2022. – Vol. 8, № 3. – P. 2422-2433. https://doi.org/10.1002/vms3.908. (In English).
31. Clay therapy in wound healing: a brief review of the literature / C. Ovincy et al // Journal of Wound Management and Research. – 2024. – Vol. 20, № 1. – P. 1-8. https://doi.org/10.22467/jwmr.2023.02558. (In English).
32. Alexandre M. Polymer-layered silicate nanocomposites: preparation, properties and uses of a new class of materials / M. Alexandre, P. Dubois // Materials Science and Engineering . – 2000. – Vol. 28. – P. 1-63. https://doi.org/10.1016/S0927-796X(00)00012-7. (In English).
33. Bentonite-in hypromellose-poloxamer sol-gel for corneal application of trimetazidine: Study of rheology and ocular anti-inflammatory potential / R. Swain et al // International Journal of Biological Macromolecules. – 2023. – Vol. 242, Part 1. – Article 124628. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.124628. (In English).
34. Journey of humic substances in healthcare: Regulatory and development perspective / M. Mirza et al // Natural Resources for Human Health. – 2025. – Vol. 5, № 4. – P. 576-595. https://doi.org/10.53365/nrfhh/204288. (In English).
35. Humic Substances as a Versatile Intermediary / S. Hriciková et al // Life. – 2023. – Vol.13, № 4. – Art. 858. https://doi.org/10.3390/life13040858. (In English).
36. Physicochemical and antioxidant properties of humic acids of low-mineralized peloids of the Tuzkol deposit / Zh.K. Kairbekov et al // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series Chemistry and Technology. – 2021. – Vol. 3, № 447. – P. 48-53. https://doi.org/10.32014/2021.2518-1491.49. (In English).
37. Poluchenie modifitsirovannogo sorbenta iz guminovykh veshchestv burogo uglya Kendyrlykskogo mestorozhdeniya / B.S. Saurbaeva i dr. // Vestnik VKTU. – 2023. – №1. – S. 204-210. https://doi.org/10.51885/1561-4212-2023-1-204. (In Russian).
38. Study of the properties of humic acids synthesized from brown coal of the Kuznetsk and the Kumuskuduk deposits / S. Tyanakh et al // Academic scientific journal of chemistry. – 2025. – Vol. 3, № 464. – P. 255-273. https://doi.org/10.32014/2025.2518-1491.315. (In English).
39. Optimizatsiya protsessa vydeleniya guminovykh kislot iz uglya Oi-Karagaiskogo mestorozhdeniya / Zh.K. Kairbekov i dr. // Vestnik KazNU. Seriya khimicheskaya. – 2012. – № 4(68). – S. 79-83. (In Russian).
40. Gvozdeva Y. Biomedical Applications of Humic Substances: From Natural Biopolymers to Therapeutic Agents / Y. Gvozdeva, P. Peneva, P. Katsarov // Antioxidants (Basel). – 2025. – Vol. 14, № 9. – Art. 1139. https://doi.org/10.3390/antiox14091139. (In English).
41. Humic acids alleviate dextran sulfate sodium-induced colitis by positively modulating gut microbiota / J. Huang et al // Frontiers in Microbiology. – 2023. – Vol. 14. – Art. 1147110. https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1147110. (In English).
42. Humic Acid Enhances Wound Healing in the Rat Palate / M. Çalışır et al // Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine. – 2018. – Vol. 2018. – Art. 1783513. https://doi.org/10.1155/2018/1783513. (In English).
43. Antiinflammatory activity and potential dermatological applications of characterized humic acids from a lignite and a green compost / M.V. Verrillo et al // Scientific Reports. – 2022. – Vol. 12. – Art. 2152. https://doi.org/10.1038/s41598-022-06251-2. (In English).
44. Zhernov Yu.V. Vliyanie guminovykh kislot na autoimmunnoe vospalenie pri ad"yuvantnogo poliartrita / Yu.V. Zhernov, N.P. Avvakumova, M.R. Khaitov // Rossiiskii zhurnal allergologii. – 2017. – T. 14, № 1S. – S. 44-45. https://rusalljournal.ru/raj/article/view/210. (In Russian).
45. Motta F.L. Deprotonation and protonation of humic acids as a strategy for the technological development of pH-responsive nanoparticles with fungicidal potential / F.L. Motta, B.A.G. Melo, M.H.A. Santana // New Biotechnology. – 2016. – Vol. 33. – P. 773-780. https://doi.org/10.1016/j.nbt.2016.07.003. (In English).
46. Fedotov G.N. Allelotoksichnost' pochv i sposoby umen'sheniya ee negativnogo vliyaniya na nachal'nuyu stadiyu razvitiya rastenii / G.N. Fedotov, S.A. Shoba, I.V. Gorepekin // Pochvovedenie. – 2020. – № 8. – S. 1007-1015. https://doi.org/10.31857/S0032180X20080067. (In Russian).
47. Sokolovskii D.V. Prirodnye guminovye veshchestva v sostave okruzhayushchego Bentonite humus system. – 2021. https://journals.eco-vector.com/0869-5652/article/view/13492 (data obrashcheniya: 05.01.2026). (In Russian).

48. Therapeutic Efficiency of Humic Acids in Intoxications / J. Vašková et al // Life. – 2023. – Vol. 13, № 4. – Art. 971. https://doi.org/10.3390/life13040971. (In English).
49. Preparation of Humic Acid–Bentonite–Polymer Composite and Investigation of Its Efficiency for the Removal of Nickel, Cadmium and Lead Ions from Wastewater / E.L.M. Amutenya et al. – 2021. https://ssrn.com/abstract=3968030 (data obrashcheniya: 05.01.2026). (In English).
50. Arafat R.Y. Evaluation of Humic Acid as an Aflatoxin Binder in Broiler Chickens / R.Y. Arafat, S.H. Khan, Saima // Annals of Animal Science. – 2017. – Vol. 17, № 1. – P. 241-255. https://doi.org/10.1515/aoas-2016-0050. (In English).
51. A toxicological evaluation of a fulvic and humic acids preparation / T.S. Murbach et al // Toxicology Reports. – 2020. – Vol. 7. – P. 1242-1254. https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2020.08.030. (In English).

Н.Е. Жабаева[1]*, Ш.Н. Жумагалиева[1], Ж.А. Әбілов[1], А.Д. Газизов[2]
[1]Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,
050040, Қазақстан Республикасы, Алматы қаласы, әл-Фараби даңғылы, 71
[2]Орталық Азия экология және қоршаған орта ғылыми-зерттеу орталығы,
050060, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., әл-Фараби даңғылы, 75В
*e-mail:nurai_zhabaeva@mail.ru

БЕНТОНИТ ЖӘНЕ ГУМИНДІК ЗАТТАР: ҚҰРАМЫ, ҚАСИЕТТЕРІ ЖӘНЕ МЕДИЦИНАДА ҚОЛДАНЫЛУЫ

Мақалада бентонит саздарының, соның ішінде Таган кен орнының бентониттерінің құрамы, физика-химиялық қасиеттері және биологиялық белсенділігі, сондай-ақ гуминдік заттар және олардың медицинадағы қолданылуы бойынша жүйелі шолу ұсынылған. Жұмыстың өзектілігі осы табиғи материалдардың ерекше адсорбциялық және регенерациялық қасиеттерімен байланысты, бұл олардың әртүрлі патологиялық жағдайларды детоксикациялау және емдеуде қолданылу перспективаларын айқындайды. Әдеби деректер негізінде бентониттің минералогиялық құрамы (негізінен монтмориллонит), оның ісіну және сорбциялық қасиеттері, сондай-ақ гумин және фульвоқышқылдардың химиялық құрамы талданды. Медициналық қолданудың негізгі бағыттары қарастырылды: жедел және созылмалы интоксикациялар мен диареяларды түзетуге арналған бентонитті энтеросорбенттер, күйіктер мен жараларды жазуға арналған сыртқы дәрілік түрлер (гельдер мен майлар), сондай-ақ гуминдік заттардың нутрицевтикалық және иммуномодуляциялық қолданылуы. Эксперименттік және клиникалық деректерді талдау бентонит пен гуминдік кешендерді бірге қолдану кезінде байқалатын синергетикалық әсерді көрсетеді, ол сорбциялық қабілеттің артуымен, әсерінің ұзартылуымен және уыттылықтың төмендеуімен сипатталады. Алынған нәтижелер осы табиғи компоненттердің өзара әрекеттесуін зерттеудің ғылыми маңыздылығын және олардың фармакологиялық әлеуетін дәлелдейді. Жұмыстың практикалық маңызы детоксикациялық әсері бар табиғи энтеросорбенттер мен биологиялық белсенді қоспаларды әзірлеу перспективаларын негіздеуде көрінеді.

Түйін сөздер: *бентонит, монтмориллонит, Таган кен орны, гуминдік заттар, гумин қышқылдары, адсорбция, энтеросорбент, детоксикация.*

N.E. Zhabayeva[1]*, Sh.N. Zhumagalieva[1], Zh.A. Abilov[1], A.D. Gazizov[2]
[1]Al-Farabi Kazakh National University,
050040, Republic of Kazakhstan, Almaty, 71 Al-Farabi Avenue
[2]Research Centre of Ecology and Environment of Central Asia,
050060, Republic of Kazakhstan, Almaty, 75V Al-Farabi Avenue
*e-mail:nurai_zhabaeva@mail.ru

BENTONITE AND HUMIC SUBSTANCES: COMPOSITION, PROPERTIES, AND MEDICAL APPLICATIONS

The article presents a systematic review of the composition, physicochemical properties, and biological activity of bentonite clays, including bentonites from the Tagan deposit, as well as humic substances and their applications in medicine. The relevance of the work is determined by the unique adsorption and regenerative properties of these natural materials, which define their prospects for use in detoxification and therapy of various pathological conditions. Literature data on the mineralogical composition of bentonite (predominantly montmorillonite), its swelling and sorption characteristics, as well as the chemical composition of humic and fulvic acids were analyzed. The main directions of medical application are considered, including bentonite enterosorbents for the correction of acute and chronic intoxications and diarrhea, topical dosage forms (gels

and ointments) for healing burns and wounds, as well as the nutraceutical and immunomodulatory use of humic substances. Analysis of experimental and clinical data indicates a synergistic effect of the combined use of bentonite and humic complexes, manifested in increased sorption capacity, prolonged action, and reduced toxicity. The obtained data demonstrate the scientific significance of studying the interaction of these natural components and their pharmacological potential. The practical value of the work lies in substantiating the prospects for the development of natural enterosorbents and biologically active additives with detoxifying effects.

Key words: *bentonite, montmorillonite, Tagan deposit, humic substances, humic acids, adsorption, enterosorbent, detoxification.*

Сведения об авторах

Нурай Еркиновна Жабаева* – магистрант кафедры «Химии и технологии органических веществ, природных соединений и полимеров», Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, Республика Казахстан; e-mail: nurai_zhabaeva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-1709-0130.

Шынар Нурлановна Жумагалиева – доктор химических наук, профессор кафедры «Химии и технологии органических веществ, природных соединений и полимеров», Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, Республика Казахстан; e-mail: shynarnur@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4110-678X.

Жарылкасын Абдуахитович Абилов – доктор химических наук, профессор кафедры «Химии и технологии органических веществ, природных соединений и полимеров», Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, Республика Казахстан; e-mail: abilovs51@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2665-2539.

Айдын Долдашевич Газизов – заведующий научно-исследовательской лабораторией, Научно-исследовательский центр экологии и окружающей среды Центральной Азии, г. Алматы, Республика Казахстан; e-mail: gaziz.aydin@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-8763-5632.

Авторлар туралы мәліметтер

Нурай Еркиновна Жабаева* – «Органикалық заттар, табиғи қосылыстар мен полимерлер» кафедрасының магистранты, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қаласы, Қазақстан Республикасы; e-mail: nurai_zhabaeva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-1709-0130.

Шынар Нурлановна Жумагалиева – химия ғылымдарының докторы, «Органикалық заттар, табиғи қосылыстар мен полимерлер» кафедрасының профессоры, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қаласы, Қазақстан Республикасы; e-mail: shynarnur@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4110-678X.

Жарылқасын Әбдуахитұлы Әбілов – химия ғылымдарының докторы, «Органикалық заттар, табиғи қосылыстар мен полимерлер» кафедрасының профессоры, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қаласы, Қазақстан Республикасы; e-mail: abilovs51@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2665-2539.

Айдын Долдашевич Газизов – ғылыми-зерттеу зертханасының меңгерушісі, Орталық Азия экология және қоршаған орта ғылыми-зерттеу орталығы, Алматы қаласы, Қазақстан Республикасы; e-mail: gaziz.aydin@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-8763-5632.

Information about the authors

Nuray Zhabayeva* – master's student of the department «Chemistry and technology of organic substances, natural compounds and polymers», Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: nurai_zhabaeva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-1709-0130.

Shynar Zhumagalieva – doctor of chemical sciences, professor of the department «Chemistry and technology of organic substances, natural compounds and polymers», Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: shynarnur@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4110-678X.

Jarylkasyn Abilov – doctor of chemical sciences, professor of the department «Chemistry and technology of organic substances, natural compounds and polymers», Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: abilovs51@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2665-2539.

Aidyn Gazizov – head of the scientific research laboratory of the Research Centre of Ecology and Environment of Central Asia, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: gaziz.aydin@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-8763-5632.

Поступила в редакцию 10.01.2026
Поступила после доработки 10.03.2026
Принята к публикации 10.03.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-79

CC BY 4.0
Check for updates

МРНТИ: 31.21.01

А.А. Каныкешова*, Е.Н. Есжан, Л.Н. Сеймуханова, М.С. Кунарбекова, Ж. Токтарбай
Satbayev University,
050013, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева 22
*e-mail: a.aslmasovna@gmail.com

АДСОРБЦИОННЫЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТНОГО СОРБЕНТА НА ОСНОВЕ АКТИВИРОВАННОГО УГЛЯ И ПРИРОДНОГО ЦЕОЛИТА ПРИ ОЧИСТКЕ ВОДЫ

Аннотация: *Синтезирован цеолит-углеродный сорбент на основе природного цеолита Шанханайского месторождения и биоугля, полученного из скорлупы грецкого ореха, предназначенный для очистки водных растворов от органических красителей. Композитный материал получен с применением кислотно-щелочной обработки и гидротермального воздействия, что обеспечило формирование пористой структуры и устойчивое сочетание минеральной и углеродной составляющих.*

Физико-химические и структурные характеристики синтезированного сорбента изучены методами сканирующей электронной микроскопии, рентгенофазового анализа и низкотемпературной адсорбции азота. Установлено, что в процессе синтеза сохраняется кристаллический каркас цеолита при одновременном развитии порового пространства, способствующего повышению доступности активных центров адсорбции и улучшению условий массопереноса.

Адсорбционные свойства цеолит-углеродного композита исследованы на примере извлечения метиленового синего из водных растворов в периодических условиях. Экспериментальные кинетические данные удовлетворительно описываются моделью псевдовторого порядка, что указывает на существенную роль химического взаимодействия между адсорбентом и адсорбатом. Равновесные данные адсорбции хорошо согласуются с моделью Ленгмюра, свидетельствуя о преимущественно монослойном характере адсорбционного процесса. Максимальная адсорбционная ёмкость синтезированного сорбента составила 26,17 мг·г $^{-1}$.

Полученные результаты подтверждают перспективность применения цеолит-углеродного сорбента для очистки водных сред от катионных органических загрязнителей.

Ключевые слова: *цеолит, композитный сорбент, адсорбция, метиленовый синий, очистка воды.*

Введение

Быстрая индустриализация, урбанизация и рост населения резко увеличили глобальный спрос на воду и другие ресурсы, усилив загрязнение воды и поставив под угрозу экосистемы и здоровье населения. Загрязнения, такие как красители, пестициды, фенолы и тяжелые металлы, в основном из промышленных сточных вод, сохраняются в водных системах, вызывая серьезные риски для здоровья, включая нейротоксичность и рак. Решение этой проблемы требует эффективных технологий удаления загрязняющих веществ [1].

В последнее время в глобальном масштабе возросла осведомленность о защите окружающей среды. После промышленной революции и быстрого развития новых технологий образовалось огромное количество отходов, вредных для окружающей среды и здоровья населения. Больше всего страдают водоемы, вода становится непригодной для потребления. Красители используются во многих отраслях промышленности, таких как текстильная, пищевая и косметическая, а также в медицинских целях, в том числе в качестве антисептических средств, что делает их распространенными загрязнителями воды. В процессе окрашивания в воду попадает множество химических веществ, влияющих на живые организмы, повреждающих почву и растения и отравляющих питьевую воду. Красители являются одними из наиболее значительных загрязнителей сточных вод, которые опасно выбрасываются в окружающую среду. Многочисленные исследования недавно обнаружили,

©А.А. Каныкешова, Е.Н. Есжан, Л.Н. Сеймуханова, М.С. Кунарбекова, Ж. Токтарбай, 2026

что глобальное потребление красителей и пигментов составляет примерно 7×10^5 тонн в год, при этом текстильный сектор потребляет примерно две трети всех красителей и пигментов [2]. По оценкам, ежегодно производится от 0,7 до 1,6 миллиона тонн красителей, при этом 10–15% их объема выбрасывается в виде промышленных сточных вод, что делает красители одним из наиболее значительных загрязнителей воды [3, 4]. Например, краситель метиленовый синий (МБ) представляет собой гетероциклическое ароматическое соединение, обозначаемое Международным союзом чистой и прикладной химии (IUPAC) как 3,7-бис(диметиламино)фенотиазин-5-иум хлорид ($C_{16}H_{18}ClN_3S$). Он определяется как биологически активное вещество и представляет собой катионный тиазиновый краситель, который при окислении имеет насыщенный синий цвет, но при восстановлении до лейкометиленового синего становится бесцветным. Более того, МБ имеет стабильную и сложную ароматическую структуру, которая затрудняет разложение в окружающей среде [5]. В различных дозах краситель МБ токсичен для животных, водных экосистем и человека; например, в высоких дозах он может вызывать боль в груди, одышку, беспокойство, тремор и повреждение пищеварительной и дыхательной систем человека [6]. Поэтому эффективное удаление МБ из воды по-прежнему остается важной темой для исследователей. Сообщалось о различных методах очистки сточных вод от красителей, таких как флокуляция [7], адсорбция, фотокаталитическая деградация электрохимические подходы и биоразложение и т.д. Среди них широко применяется адсорбция очистка сточных вод за преимущества экономической эффективности, простоты эксплуатации и высокой эффективности [8].

Современные методы очистки включают физические, химические и биологические подходы, каждый из которых имеет явные преимущества и ограничения. Среди них адсорбция широко предпочтительна из-за ее экономической эффективности и простоты эксплуатации. Механизмы адсорбции включают физисорбцию, хемосорбцию и электростатические взаимодействия с обычно используемыми адсорбентами, такими как активированный уголь, цеолиты и молекулярные сита [1]. В последние годы особый интерес вызвала разработка новых адсорбирующих материалов с целью повышения эффективности адсорбции и снижения экономических и экологических затрат на процессы подготовки материалов. Разнообразие адсорбирующих материалов для адсорбции красителя были разработаны сточные воды, такие как активированный уголь, цеолиты адсорбенты на основе глины упорядоченные мезопористым кремнезем и функционализированные адсорбенты. В частности, цеолиты привлекли широкое внимание благодаря благоприятным условиям структура пор высокая ионообменная способность и отличная селективность [9]. Природные цеолиты, характеризующиеся высокой катионообменной способностью, микропористостью и химической стабильностью, уже давно изучаются как эффективные адсорбенты [10]. А также одним из применений для оболочек отходов является преобразование в усовершенствованный активированный уголь (АС), который можно использовать для очистки воды, хранение метана и газообразного водорода, очистка сточных вод, и медицина, среди множества других приложений [11]. В многочисленных исследованиях сообщалось об использовании побочных продуктов сельского хозяйства для производства активированного угля. Для исследования использовались скорлупа грецкого ореха для адсорбции красителей метиленового синего в водных растворах [12].

Природный цеолит и активированный уголь из скорлупы грецкого ореха представляют собой два наиболее перспективных адсорбирующих материала для удаления красителей как метилен голубой. Уникальные структурные свойства и высокая площадь поверхности делают их исключительно эффективными для процессов адсорбции. Композит природного цеолита и активированного угля из скорлупы грецкого ореха создает синергетические эффекты, которые повышают общие показатели адсорбции [13]. Это улучшение является результатом дополнительных механизмов адсорбции: природного цеолит обеспечивают центр ионного обмена и однородные микропоры, в то время как активированный уголь из скорлупы грецкого ореха обеспечивает большую площадь поверхности и разнообразный размер пор [14].

2. Экспериментальная часть

2.1 Используемые материалы

В качестве минерального компонента использовали природный цеолит (Ze), добытый на Шанханайском цеолитовом месторождении, расположенном в Жетысуской области. В качестве углеродной составляющей применяли активированный уголь, полученный из скорлупы грецкого ореха после процесса карбонизации. Скорлупу грецкого ореха (АС)

предварительно измельчали до фракции 5-10 мм и просеивали для обеспечения однородности исходного сырья.

Соляная кислота (HCl) и гидроксид натрия (NaOH) использовались в аналитически чистом виде. Метиленовый синий (Methylene Blue) применяли без дополнительной очистки. Все остальные химические реагенты имели аналитическую чистоту. Растворы готовили с использованием дистиллированной воды.

2.2 Получение углеродного материала методом карбонизации

Карбонизацию подготовленного материала проводили в высокотемпературной вертикальной трубчатой печи BS-YTF-1200°C (Казахстан) в атмосфере инертного газа азота (N_2) при скорости потока 260 мл/мин. Термическую обработку осуществляли со скоростью нагрева 10°C/мин до температуры 500°C с последующей изотермической выдержкой в течение 1 ч. Далее температуру поддерживали ещё 1 ч для завершения процессов дегидратации и частичной графитизации углеродной основы.

2.3 Синтез композитного сорбента Ze–AC

Для синтеза композита предварительно полученные природный цеолит и активированный уголь на основе скорлупы грецкого ореха подвергали механическому измельчению с использованием аналитической мельницы (IKA A 11 basic Analytical mill (Germany)). Измельчение проводили в режиме ударного и режущего помола до получения однородного порошка.

Классификацию порошков по размеру частиц осуществляли с помощью лабораторного электрического вибросита (Lab-VIBSIEVE-6) с регулировкой скорости и таймером. Для дальнейших экспериментов отбирали фракцию с размером частиц ≤ 63 мкм. Отобранный природный цеолит подвергали предварительной кислотной обработке раствором соляной кислоты концентрацией 3 моль/л при соотношении твёрдой и жидкой фаз 15г:200мл. После кислотной обработки материал многократно промывали дистиллированной водой до полного удаления остатков кислоты.

После сушки промытый природный цеолит и активированный уголь смешивали в массовом соотношении 1:1, помещали в предварительно приготовленный раствор NaOH и подвергали гидротермальной обработке. Гидротермальный эксперимент проводили в микроволновом реакторе (YMW-HP 80) (рис. 1) при температуре 100 °C в течение 7 ч.

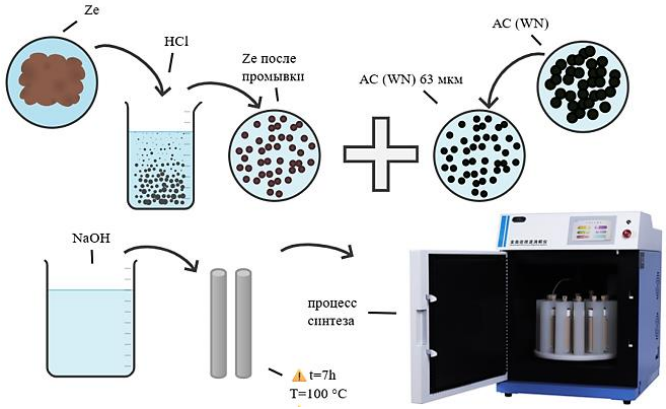


Рисунок 1 – Схема синтеза композитного сорбента на основе цеолита и активированного угля

После завершения гидротермальной обработки полученные образцы многократно промывали дистиллированной водой до достижения нейтрального значения pH ≈ 7, затем сушили в сушильном шкафу (DHG 9145A) при температуре 105°C до постоянной массы. Высушенные образцы дополнительно измельчали и просеивали через сито с размером ячеек 63 мкм. Полученный цеолит-углеродный композит обозначали как Ze–AC и использовали в последующих физико-химических и сорбционных исследованиях.

2.4 Приготовление раствора органического вещества

В качестве модельного органического загрязнителя использовали метиленовый синий. Маточный раствор метиленового синего с концентрацией 1000 мг/л готовили на основе

дистиллированной воды, после чего методом последовательного разбавления получали рабочие растворы заданных концентраций.

Кинетические исследования проводили при начальной концентрации метиленового синего 75 мг/л с использованием объёма раствора 100 мл и навески сорбента 0,335 г. Процесс адсорбции осуществляли в течение 5 часов, в течение которых наблюдалось снижение концентрации метиленового синего до значений, близких к нулю, что свидетельствует о высокой эффективности сорбционного процесса.

Изотермические исследования адсорбции проводили с использованием растворов метиленового синего с начальными концентрациями 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300 и 400 мг/л. Эксперименты осуществляли в периодических условиях при объёме раствора 40 мл и массе природный цеолит-углеродного композитного сорбента 0,05 г. Продолжительность эксперимента составляла 48 часов, что обеспечивало достижение адсорбционного равновесия и практически полное извлечение адсорбата из раствора.

После завершения экспериментов растворы отделяли от твёрдой фазы и анализировали методом ультрафиолетовой-видимой спектрофотометрии для определения остаточной концентрации метиленового синего.

2.4 Метод сканирующей электронной микроскопии (СЭМ)

Морфологию поверхности и микроструктурные особенности исходных и синтезированных цеолит-углеродных композитов (Ze–AC) исследовали методом сканирующей электронной микроскопии. Метод СЭМ основан на регистрации вторичных и обратно рассеянных электронов, возникающих при взаимодействии сфокусированного электронного пучка с поверхностью образца, что позволяет получать высокоразрешающие изображения с детальной визуализацией формы частиц, степени агломерации и характера пористой структуры.

2.5 Метод удельной поверхности и пористой структуры (BET)

Текстурные свойства синтезированных цеолит-углеродных композитов исследовали методом низкотемпературной адсорбции – десорбции азота. Метод основан на физической адсорбции молекул N_2 на поверхности твёрдого тела при температуре жидкого азота (77 K) и применяется для определения удельной площади поверхности и характеристик пористой структуры материалов.

Перед проведением измерений образцы подвергали предварительной дегазации в вакууме с целью удаления физически адсорбированной влаги и газообразных примесей. Удельную площадь поверхности рассчитывали по модели Брунауэра–Эммета–Теллера (BET) в линейной области изотермы адсорбции.

Общий объём пор определяли по количеству адсорбированного азота при относительном давлении, близком к насыщению. Характер пористой структуры оценивали на основании формы изотерм адсорбции–десорбции и типа петли гистерезиса, что позволяет идентифицировать особенности распределения пор по размерам и тип пористой структуры материала.

2.6 Методика UV-Vis анализа для исследования кинетики и изотерм адсорбции

Концентрацию метиленового синего в водных растворах ($\lambda = 664$ нм) до и после адсорбции определяли методом ультрафиолетовой–видимой спектрофотометрии (UV–Vis). Метод основан на измерении оптической плотности раствора при характерной длине волны поглощения красителя и позволяет количественно определить остаточную концентрацию адсорбата в растворе.

Для кинетических экспериментов образцы раствора отбирали через заданные промежутки времени в процессе адсорбции. Для построения изотерм адсорбции использовали серию растворов с различными начальными концентрациями метиленового синего при фиксированных условиях эксперимента. Перед измерением образцы отделяли от твёрдой фазы и анализировали спектрофотометрически.

Адсорбционную ёмкость сорбента в момент времени t рассчитывали по уравнению материального баланса:

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t)V}{m} \quad (1)$$

где, q_t– адсорбционная ёмкость в момент времени t (мг·г$^{-1}$),

C_0иC_t – начальная и текущая концентрации адсорбата (мг·л$^{-1}$),

V– объём раствора (л),

m – масса сорбента (г).

3 Результаты и их обсуждение

3.1 Результаты сканирующей электронной микроскопии (СЭМ)

Морфологические особенности синтезированного цеолит-углеродного композита были исследованы методом сканирующей электронной микроскопии. Анализ полученных микрофотографий показал, что материал характеризуется неоднородной поверхностью и наличием развитого порового пространства, сформированного в результате совокупного воздействия термической, химической и гидротермальной обработки исходных компонентов. На поверхности композита отчетливо различимы участки с различной морфологией, соответствующие углеродной матрице и вкраплениям минеральной фазы.

В структуре композита наблюдается совместное присутствие цеолитной и углеродной фаз, образующих устойчивую композитную систему без признаков выраженного фазового разделения. Углеродная составляющая формирует непрерывную матрицу, в объёме и на поверхности которой распределены цеолитные частицы неправильной формы. Такое распределение указывает на эффективное механическое и структурное взаимодействие компонентов, а также на прочную фиксацию минеральной фазы в углеродной основе. Поверхность материала представлена совокупностью пор, углублений и неровностей различного размера и конфигурации, формирующих развитый рельеф.

Выявленные морфологические особенности свидетельствуют о формировании иерархической пористой структуры, включающей микро- и мезопоры, а также межчастичные пустоты, образованные в результате агрегации частиц. Наличие пор различного масштаба обеспечивает благоприятные условия для диффузии молекул адсорбата и способствует повышению доступности активных центров адсорбции. Существенных дефектов, таких как трещины или разрушения структуры, способных негативно влиять на целостность и стабильность сорбента, не выявлено.

Полученные результаты СЭМ-анализа (рис. 2) находятся в хорошем согласии с данными текстурного анализа и подтверждают формирование пористой структуры, способствующей эффективной адсорбции органических загрязнителей из водных растворов.

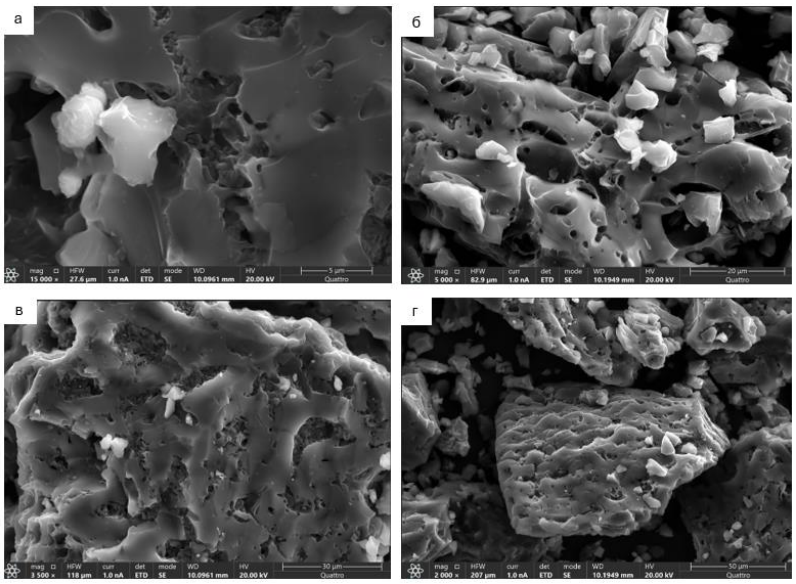


Рисунок 2 – СЭМ снимки синтезирванного композитного сорбента

На рисунке (а) при увеличении 15 000× выявлены элементы микропористой структуры углеродной матрицы с включениями минеральной фазы. Поверхность характеризуется наличием мелких пор и неровностей. Рисунок (б) при увеличении 5000× отражает общую морфологию композита и демонстрирует систему пор и полостей различного размера. Цеолитные частицы распределены в углеродной матрице без признаков выраженной агломерации. На СЭМ-снимке (в) при увеличении 3500× наблюдается шероховатая поверхность с межчастичными пустотами и порами нерегулярной формы. Рисунок (г) при

увеличении 2000× характеризует агрегированную структуру частиц с чередованием плотных и пористых участков.

3.2 Результаты удельной поверхности и пористой структуры (BET)

Полученные значения удельной площади поверхности указывают на сохранность цеолитного каркаса при одновременном включении углеродной фазы, что приводит к повышению связности порового пространства и увеличению шероховатости поверхности композита. Достаточно высокий объём пор создаёт благоприятные условия для диффузии молекул большого размера, в частности метиленового синего, доступ которых к активным центрам в микропористых цеолитах существенно ограничен (табл. 1).

Таблица 1 – Текстурные характеристики гибридного сорбента Ze–AC, определённые методом BET

Параметр	Значение
Удельная площадь поверхности, S_{BET}	26,17 м²·г⁻¹
Общий объём пор, Vp	4,35 см³·г⁻¹
Тип пор	Мезопористые (тип IV, H_3)
Температура анализа, T	77 K

Синтезированный цеолит-углеродный композит Ze–AC применяли в экспериментах по периодической адсорбции для удаления метиленового синего (МС) из водных растворов. В каждом опыте навеску сорбента массой 0,005 г добавляли к 40 мл раствора МС с начальным значением pH около 7. Адсорбционные эксперименты проводили при температуре 25°C при непрерывном встряхивании на лабораторном шейкере со скоростью 150 об/мин, что обеспечивало эффективный контакт твёрдой и жидкой фаз. Продолжительность эксперимента составляла 24 ч, что было достаточным для установления адсорбционного равновесия.

Экспериментальные равновесные данные аппроксимировали с использованием моделей Ленгмюра и Фрейндлиха (табл. 2). Более высокая степень соответствия была получена для модели Ленгмюра (R^2 = 0,991), что свидетельствует о преобладании монослойного механизма адсорбции на энергетически однородной поверхности сорбента.

Таблица 2 – Параметры изотерм адсорбции метиленового синего на Ze–AC

Модель	Параметр	Обозначение	Значение
Ленгмюр	Максимальная ёмкость	Q_{max} (мг·г⁻¹)	26,17
	Константа равновесия	KL (л·мг⁻¹)	0,0382
Фрейндлих	Адсорбционная константа	KF	25,76
	Фактор интенсивности	n	1,48

Согласно модели Ленгмюра, максимальная адсорбционная ёмкость составила Qmax = 26,17 мг·г⁻¹, а значение константы KL = 0,0382 л·мг⁻¹ указывает на выраженное сродство молекул метиленового синего к поверхности композита Ze–AC. Параметры модели Фрейндлиха (KF = 25,76, n = 1,48) также подтверждают благоприятный характер адсорбционного процесса ($1 < n < 2$), предполагая сочетание монослойных и многослойных механизмов связывания адсорбата.

Преобладание модели Ленгмюра свидетельствует о том, что активные центры Ze–AC энергетически однородны, а механизм связывания молекул МБ определяется электростатическими и π–π взаимодействиями между красителем и углеродно-цеолитной поверхностью.

Кинетические данные описывались моделями псевдопервого (PFO) и псевдовторого (PSO) порядка. Результаты показаны в таблице 3.

Таблица 3 – Кинетические параметры адсорбции метиленового синего на Ze–AC

Модель	Параметр	Обозначение	Значение
Псевдопервого порядка	Константа скорости	k_1 (мин⁻¹)	0,0498
	Равновесная ёмкость	q_e (мг·г⁻¹)	81,46
Псевдовторого порядка	Константа скорости	k_2 (г·мг⁻¹·мин⁻¹)	1,18
	Равновесная ёмкость	q_e (мг·г⁻¹)	29,28

Модель PSO демонстрирует почти идеальное совпадение (R^2 = 0,999), что указывает на химическую природу адсорбции, включающую обмен электронами между функциональными группами поверхности (–OH, –COOH, Si–O^-) и катионами МБ. Высокая константа скорости k_2 и близкие значения экспериментальной и расчётной ёмкости подтверждают быструю кинетику сорбции, обусловленную эффективным перемешиванием и открытой пористой структурой Ze–AC.

Изотерма Темкина и энергия адсорбции. Для анализа распределения энергии адсорбции использовалась модель Темкина. Полученные параметры – A = 4,18, BT = 1,38 Дж·моль$^{-1}$, R^2 = 0,992 – свидетельствуют о умеренной теплоте адсорбции и почти линейном распределении энергии по поверхности сорбента. Это указывает на смешанный физико-химический механизм, включающий как физнорбцию, так и хемосорбцию.

Комбинация природного цеолита и биоугля, обработанных в щелочной среде под действием микроволнового излучения, привела к формированию синергетического композита с улучшенными текстурными и химическими характеристиками. Углеродная фаза обеспечивает π–π взаимодействия с ароматическими кольцами МБ и повышает электропроводность, тогда как цеолитная матрица вносит ионообменные центры (Na^+, Ca^{2+}) и отрицательно заряженные участки Si–O^- и Al–O^-, ответственные за электростатическое связывание.

Мезопористая структура, подтверждённая данными BET, и SEM, способствует ускоренной диффузии адсорбата, а согласованность экспериментальных данных с моделями Ленгмюра и PSO подтверждает монослойный хемосорбционный механизм. Модель Темкина, отражающая умеренные значения энергии, подтверждает смешанный характер взаимодействий, включающий как физические (ван-дер-ваальсовы, π–π), так и химические (ионообменные, координационные) силы.

Максимальная адсорбционная ёмкость 26,17 мг·г$^{-1}$ сопоставима с показателями других цеолит-углеродных композитов, полученных гидротермальными методами, что подчёркивает эффективность микроволнового синтеза как быстрого и энергосберегающего подхода. Таким образом, гибридный сорбент Ze–AC характеризуется иерархической пористой структурой, высокой доступностью активных центров и комбинированным механизмом связывания, что делает его перспективным, экономичным и экологически безопасным адсорбентом для очистки воды от катионных красителей, таких как метиленовый синий.

Изотерма адсорбции–десорбции азота (рис. 13) для образца Ze–AC относится к типу IV с петлей гистерезиса H_3, характерной для мезопористых структур со щелевидными порами. Согласно анализу BET (табл. 1), удельная площадь поверхности композита составила 26,17 м^2·г$^{-1}$, а общий объём пор – 4,35 см^3·г$^{-1}$.

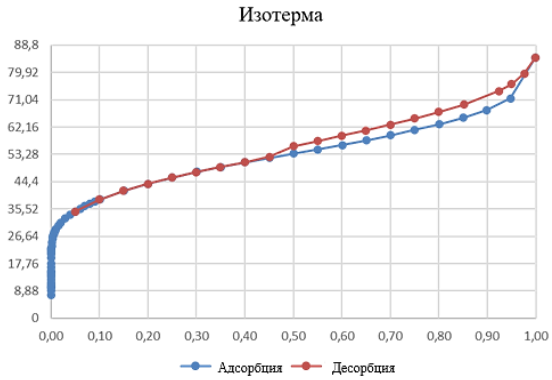


Рисунок 3 – Изотерма адсорбции–десорбции N_2 (тип IV, гистерезис H_3)

Изотермический профиль демонстрирует наличие развитой системы пор, включающей как мезо-, так и макропоры. Такая структура формируется вследствие процессов частичного растворения и рекристаллизации цеолитной матрицы при щелочной обработке под действием микроволнового излучения.

3.4 Результаты кинетических и изотермических исследований

Адсорбционные характеристики композитного сорбента на основе активированного угля и природного цеолита по отношению к метиленовому синему были изучены с

использованием УФ-Вид спектрофотометрии на основе кинетических и изотермических исследований.

Анализ кинетики адсорбции (рис. 4) показал, что процесс протекает с высокой скоростью на начальной стадии. В первые десятки минут наблюдается резкое снижение концентрации метиленового синего в растворе, что обусловлено наличием большого количества свободных активных центров на поверхности композитного сорбента. На данном этапе адсорбция, вероятно, контролируется внешней диффузией и быстрым взаимодействием молекул красителя с функциональными группами углеродной фазы. По мере заполнения адсорбционных сайтов скорость процесса снижается, и система постепенно достигает квазистационарного состояния. Практически полное удаление красителя из раствора указывает на высокую эффективность сорбента и его выраженную аффинность к катионным органическим молекулам.

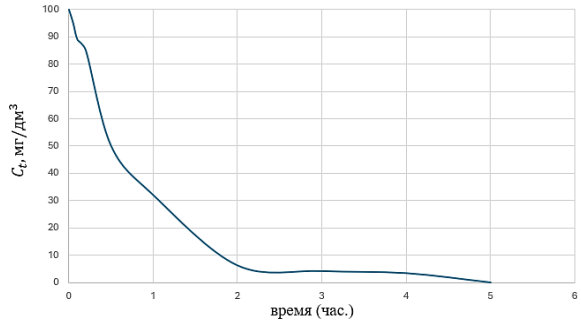


Рисунок 4 – Результаты кинетического исследования

Изотерма адсорбции метиленового синего (рис. 5), полученная при времени контакта t = 48 ч, характеризуется возрастающим участком при низких равновесных концентрациях и последующим выходом на плато при их увеличении. Такая форма изотермы свидетельствует о насыщении активных центров сорбента и ограниченной ёмкости поверхности. Достижение максимальных значений адсорбционной ёмкости порядка 210-220 мг/г подтверждает высокую сорбционную способность композитного материала и его конкурентоспособность по сравнению с известными углеродными и цеолитными сорбентами, описанными в литературе.

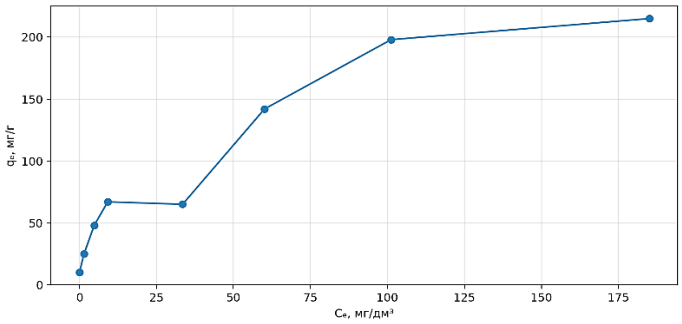


Рисунок 5 – Результаты изотермического исследования

Совместный анализ кинетических и изотермических данных указывает на синергетический характер взаимодействия компонентов композита. Активированный уголь обеспечивает развитую удельную поверхность и высокую пористость, способствующие физической адсорбции молекул метиленового синего, тогда как природный цеолит вносит вклад за счёт ионообменных взаимодействий и электростатического притяжения катионных форм красителя. Такое сочетание механизмов обуславливает как высокую скорость адсорбции, так и значительную равновесную ёмкость сорбента.

Таким образом, полученные результаты демонстрируют, что композитный сорбент на основе активированного угля и природного цеолита обладает благоприятными кинетическими характеристиками и высокой адсорбционной эффективностью, что делает его перспективным материалом для применения в процессах очистки воды от органических красителей, в частности метиленового синего.

Заключение

В ходе исследования синтезирован цеолит-углеродный композитный сорбент на основе природного цеолита и активированного угля из скорлупы грецкого ореха с использованием кислотно-щелочной обработки и гидротермального синтеза. Применённый метод получения обеспечил формирование устойчивой композитной структуры с развитым поровым пространством и стабильным сочетанием минеральной и углеродной фаз.

Комплексное изучение морфологических, структурных и адсорбционных характеристик подтвердило эффективность синтезированного материала при очистке водных растворов от катионных органических загрязнителей. Сформированная пористая структура способствует повышению доступности активных центров и улучшению условий массопереноса, что определяет перспективность использования цеолит-углеродного сорбента в технологиях водоочистки.

Список литературы

1. Raut Sh.S. Nano-Bioremediation via Biochar, Zeolite Nanocomposites for Water Quality Enhancement: A Review // Sh.S. Raut, A. Sharma, A. Mishra // Water Environment research. – 2025.
2. Mehra S. Adverse impact of textile dyes on the aquatic environment as well as on human beings. // S. Mehra, M. Singh, P. Chadha // Toxicol Int. – 2021. – № 28(2). – P. 165.
3. Aragaw TA Biomass-based adsorbents for removal of dyes from wastewater: a review / TA. Aragaw, FM. Bogale // Front Environ Sci. – 2021. – № 9. – P. 558.
4. Degradation of anionic azo dyes in aqueous solution using a continuous flow photocatalytic packed-bed reactor: Influence of water matrix and toxicity evaluation.// V. Vaiano et al // J Environ Chem Eng. – 2020. – № 8(6). – P. 104549.
5. Alhogbi B.G. An Investigation of a Natural Biosorbent for Removing Methylene Blue Dye from Aqueous Solution // B.G. Alhogbi, Gh.S. Al Balawi // Molecules. https://doi.org/10.3390/molecules28062785 .
6. Modification of coal fly ash and its use as low-cost adsorbent for the removal of directive, acid and reactive dyes / Hussain Z. et al // J. Hazard. Mater. – 2022. – № 422.
7. Tavčer P.F. Prelog Wastewater treatment using flocculation method and water reuse for dyeing of polyester fibers // P.F. Tavčer, K. Prelog // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2020. – № 827.
8. Synthesis of porous carbon/zeolite composites by low-temperature acid-alkaline leaching from coal gasification fine slag for adsorption of dye wastewater. Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2024. – Vol. 12, Issue 3.
9. Zeolite waste characterization and use as low-cost, ecofriendly, and sustainable material for malachite green and gethylene blue dyes removal: box–behnken design, kinetics, and thermodynamic / Imessaoudene A. et al // Appl. Sci. – 2022. – № 12(15).
10. Enhanced methylene blue adsorption capacity of 3D-printed zeolite/glycerol (3D-Ze/Gy) by sintering temperature optimalizations / Fitri A. Et al // Next Materials. – 2025. – Vol. 9.
11. Almond and Walnut Shell Activated Carbon for Methylene Blue Adsorption // McCaffrey Z. et al // ACS Sustainable Resource Management. – 2024.
12. Adsorption of congo red and methylene blue dyes on an ashitaba waste and a walnut shell-based activated carbon from aqueous solutions: Experiments, characterization and physical interpretations / Zichao Li et al // Chemical Engineering Journal. – 2020. – Vol. 388.
13. Removal of hazardous crystal violet dye by low-cost P-type zeolite/carbon composite obtained from in situ conversion of coal gasification fine slag / Wu Y.-H. et al // Microporous Mesoporous Mater. – 2021.
14. Sustainable zeolite/activated carbon nanocomposite for dual-dye adsorption, kinetic and thermodynamic studies, and urea electro-oxidation applications // Alawama A.S. et al // RSC Advances. – 2025.

Благодарность: *Данное исследование финансировалось Комитетом науки, Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № BR27199301).*

А.А. Қанықешова*, Е.Н. Есжан, Л.Н. Сеймуханова, М.С. Кунарбекова, Ж. Тоқтарбай
[1]Satbayev University,
050013, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Сәтпаев к-сі 22
*e-mail: a.aslmasovna@gmail.com

СУДЫ ТАЗАРТУДАҒЫ БЕЛСЕНДІРІЛГЕН КӨМІР МЕН ТАБИҒИ ЦЕОЛИТ НЕГІЗІНДЕГІ КОМПОЗИТТІК СОРБЕНТТІҢ АДСОРБЦИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІ

Шанханай цеолит кен орнынан алынған табиғи цеолит пен грек жаңғағы қабығынан алынған биокөмір негізінде органикалық бояғыштармен ластанған сулы ерітінділерді тазартуға арналған цеолит-көміртекті сорбент синтезделді. Композиттік материал қышқыл-сілтілік өңдеу және гидротермиялық әсер ету әдістерін қолдану арқылы алынып, минералдық және көміртекті құрамдастардың тұрақты байланысын және кеуекті құрылымның қалыптасуын қамтамасыз етті.

Синтезделген сорбенттің физика-химиялық және құрылымдық сипаттамалары сканерлеуші электрондық микроскопия, рентгенфазалық талдау және азоттың төмен температуралы адсорбциясы әдістерімен зерттелді. Синтез процесінде цеолиттің кристалдық қаңқасы сақталып, адсорбцияның белсенді орталықтарының қолжетімділігін арттыратын және массалмасу жағдайларын жақсартатын дамыған кеуекті кеңістіктің қалыптасатыны анықталды.

Цеолит-көміртекті композиттің адсорбциялық қасиеттері сулы ерітінділерден метилен көгін периодтық режимде бөліп алу мысалында зерттелді. Эксперименттік кинетикалық деректер псевдоекінші ретті модельмен қанағаттанарлық сипатталып, адсорбция процесінде адсорбент пен адсорбат арасындағы химиялық өзара әрекеттесудің маңызды рөл атқаратынын көрсетті. Адсорбцияның тепе-теңдік деректері Ленгмюр моделіне жақсы сәйкес келеді, бұл адсорбциялық процестің негізінен моноқабатты сипатта жүретінін дәлелдейді. Синтезделген сорбенттің максималды адсорбциялық сыйымдылығы 26,17 мг·г $^{-1}$ құрады.

Алынған нәтижелер цеолит-көміртекті сорбентті катиондық органикалық ластағыштардан сулы орталарды тазартуда қолданудың перспективалы екенін көрсетеді.

Түйін сөздер: *цеолит; композиттік сорбент; адсорбция; метилен көк; суды тазарту.*

A.A. Kanykeshova*, Y. Yeszhan, L.N. Seimukhanova, M.S. Kunarbekova, Zh. Toktarbay
Satbayev University,
050013, Republic of Kazahstan, Almaty, Satpayev street, 22
*e-mail: a.aslmasovna@gmail.com

ADSORPTION PROPERTIES OF A COMPOSITE SORBENT BASED ON ACTIVATED CARBON AND NATURAL ZEOLITE IN WATER PURIFICATION

A zeolite-carbon sorbent based on natural zeolite from the Shankhanay deposit and biochar obtained from walnut shells was synthesized for the purification of aqueous solutions from organic dyes. The composite material was obtained using acid-base treatment and hydrothermal action, which ensured the formation of a porous structure and a stable combination of mineral and carbon components.

The physicochemical and structural characteristics of the synthesized sorbent were studied using scanning electron microscopy, X-ray diffraction analysis, and low-temperature nitrogen adsorption. It was found that the synthesis process preserves the zeolite's crystalline framework while simultaneously expanding the pore space, increasing the availability of active adsorption sites and improving mass transfer conditions.

The adsorption properties of the zeolite-carbon composite were studied using the extraction of methylene blue from aqueous solutions under batch conditions. The experimental kinetic data are satisfactorily described by a pseudo-second-order model, indicating the significant role of chemical interaction between the adsorbent and adsorbate. The equilibrium adsorption data are in good agreement with the Langmuir model, indicating a predominantly monolayer nature of the adsorption process. The maximum adsorption capacity of the synthesized sorbent was 26.17 mg g $^{-1}$.

These results confirm the potential of using zeolite-carbon sorbents for the removal of cationic organic pollutants from aqueous media.

Key words: *zeolite; composite sorbent; adsorption; methylene blue; water purification.*

Авторлар туралы мәліметтер

Ақерке Алмасқызы Қанықешова* – Сәтбаев Университеті, Инженерлік-бейінді зертханасының ғылыми қызметкері; e-mail: a.aslmasovna@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-6517-6933.

Елриза Нұрәкімқызы Есжан – Сәтбаев Университеті, Инженерлік-бейінді зертханасының ғылыми қызметкері; e-mail: yelriza.yeszhan@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4523-1211.

Лаура Нурланқызы Сеймуханова – Сәтбаев Университеті, Инженерлік-бейінді зертханасының ғылыми қызметкері; e-mail: lauraseimuhanova@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009 0002-1438-6568.

Махаббат Сейт-Задаевна Кунарбекова – Сәтбаев Университеті, Инженерлік-бейінді зертханасының ғылыми қызметкері; философия докторы; e-mail: m.kunarbekova@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8640-0667.

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.

Сведения об авторах

Акерке Алмаскызы Каныкешова* – Сатбаев Университет, научный сотрудник лаборатории инженерного профиля; e-mail: a.aslmasovna@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-6517-6933.

Елриза Есжан – Сатбаев Университет, научный сотрудник лаборатории инженерного профиля; e-mail: yelriza.yeszhan@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4523-1211.

Лаура Нурланкызы Сеймуханова – Сатбаев Университет, научный сотрудник лаборатории инженерного профиля; e-mail: lauraseimuhanova@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-1438 6568.

Махаббат Сейт-Задаевна Кунарбекова – Сатбаев Университет, научный сотрудник лаборатории инженерного профиля, доктор философии; e-mail: m.kunarbekova@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8640-0667.

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.

Information about the authors

Akerke Almaskyzy Kanykeshova* – Satbayev University, researcher at the Engineering Laboratory; e-mail: a.aslmasovna@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-6517-6933.

Yelriza Yeszhan – Satbayev University, researcher at the Engineering Laboratory; e-mail: yelriza.yeszhan@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4523-1211.

Laura Nurlanovna Seimukhanova – Satbayev University, researcher at the Engineering Laboratory; e-mail: lauraseimuhanova@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-1438-6568.

Makhabbat Kunarbekova – Satbayev University, researcher at the Engineering Laboratory; e-mail: m.kunarbekova@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8640-0667.

Zhexenbek Toktarbay – Satbayev University, researcher at the Engineering Laboratory; e-mail: zhexenbek.toktarbay@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4502-5503.

Поступила в редакцию 05.01.2026
Принята к публикации 10.03.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-80

МРНТИ: 31.15.33

CC BY 4.0
Check for updates

Г.Е. Ергазиева[1,2*], І. Қуаныш[1,3]
[1]Институт проблем горения,
050012, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Богенбай батыра, 172
[2]Казахский Национальный университет им. аль-Фараби,
050040, Республика Казахстан, г. Алматы, пр. аль-Фараби, 71
[3]Казахстанско-Британский технический университет,
050000, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Толе би, 59
*e-mail:ergazieva_g@mail.ru

СИЛИКАТНЫЕ СОРБЕНТЫ ДЛЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО УЛАВЛИВАНИЯ CO_2: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Аннотация: *Силикатные сорбенты на основе щелочных металлов привлекают растущее внимание как перспективные материалы для высокотемпературного улавливания CO_2 из промышленных источников. Данный обзор систематизирует современные достижения в разработке и применении литиевых (Li_4SiO_4), натриевых (Na_2SiO_3, Na_4SiO_4) и калиевых силикатов для прямого улавливания CO_2 при температурах 500-750°C. Литиевые силикаты демонстрируют наивысшую сорбционную емкость (теоретическая 367 мг CO_2/г, практическая 30-35 масс.%) с*

©Г.Е. Ергазиева, І. Қуаныш, 2026

оптимальной рабочей температурой 550-650°C и более низкими температурами регенерации (700-850°C) по сравнению с кальциевыми аналогами. Сорбция протекает по двухстадийному механизму, быстрая поверхностная реакция с образованием Li_2CO_3 и Li_2SiO_3, сменяющаяся диффузионно-контролируемой стадией, лимитируемой переносом ионов через продуктовый слой. Наноструктурирование и допирование щелочными карбонатами (K_2CO_3, Na_2CO_3) эффективно ускоряют диффузию и улучшают циклическую стабильность до 200 циклов без потери емкости. Допирование переходными металлами (Ti, Ca) и содопирование K подавляют спекание и расширяют температурный диапазон эффективной сорбции. Использование промышленных отходов (летучая зола, металлургические шлаги, отработанные аккумуляторы) как источников прекурсоров снижает стоимость производства в 3-20 раз. Перспективные направления включают разработку бифункциональных сорбентов-катализаторов, применение вычислительного дизайна и машинного обучения для оптимизации состава, демонстрацию технологии в реальных промышленных условиях и интеграцию с возобновляемыми источниками энергии. При решении текущих вызовов силикатные сорбенты могут стать ключевой технологией для глубокой декарбонизации энергоемких секторов и достижения углеродной нейтральности.

Ключевые слова: *Li_4SiO_4, высокотемпературное улавливание CO_2, сорбенты, допирование, наноструктурирование, циклическая стабильность, интегрированное улавливание и конверсия*

Введение

Проблема антропогенных выбросов диоксида углерода в атмосферу является одним из ключевых вызовов современной энергетики и промышленности. Технологии улавливания, утилизации и хранения CO_2 рассматриваются как критически важные для достижения углеродной нейтральности к середине XXI века [1-2]. Среди различных методов улавливания CO_2 особое внимание привлекают твердофазные сорбенты, способные работать при высоких температурах (450-750°C), что позволяет их интегрировать непосредственно в высокотемпературные промышленные процессы без существенных энергетических потерь на охлаждение газовых потоков.

Силикатные сорбенты на основе щелочных металлов, особенно литиевые, натриевые и калиевые силикаты, демонстрируют выдающиеся характеристики по сорбционной емкости, кинетике поглощения CO_2 и циклической стабильности при умеренных температурах регенерации [3]. В отличие от широко изученных кальциевых сорбентов (CaO), которые требуют регенерации при температурах выше 900°C и страдают от быстрой деградации при циклировании, щелочные силикаты обеспечивают более низкие температуры регенерации (700-850°C) и лучшую циклическую стабильность.

Настоящий обзор систематизирует современные достижения в области разработки, характеризации и применения силикатных сорбентов для высокотемпературного улавливания CO_2, с акцентом на литиевые, натриевые и калиевые системы, механизмы сорбции, методы синтеза и модификации, а также перспективы промышленного применения.

2. Литиевые силикаты-лидирующий класс высокотемпературных сорбентов

Ортосиликат лития (Li_4SiO_4) признан наиболее перспективным материалом среди щелочных силикатов благодаря высокой теоретической сорбционной емкости 367 мг CO_2/г (36.7 масс. % или 8.34 ммоль/г), что существенно превышает емкость литиевых цирконатов (Li_2ZrO_3, 125 мг/г) и других керамических сорбентов. Обратимая реакция улавливания CO_2 описывается уравнением [4-5]:

$$Li_4SiO_4+CO_2\leftrightarrow Li_2SiO_3+Li_2CO_3 \qquad (1)$$

Термодинамический анализ показывает, что равновесие реакции зависит от температуры и парциального давления CO_2. Экспериментальная равновесная температура систематически превышает теоретические значения на 30-75°C из-за кинетических ограничений и массопереноса. При атмосферном давлении и концентрации CO_2 15-100 об. % оптимальный температурный диапазон сорбции составляет 500-650°C, тогда как десорбция эффективно протекает при 700-850°C. Процесс сорбции CO_2 на Li_4SiO_4 характеризуется двухстадийным механизмом (рис.1). На первой стадии происходит быстрая поверхностная химическая реакция между CO_2 и Li_4SiO_4 с образованием продуктового слоя из Li_2CO_3 и Li_2SiO_3 на внешней поверхности частиц. Эта стадия контролируется скоростью химической реакции и характеризуется высокими скоростями сорбции [6].

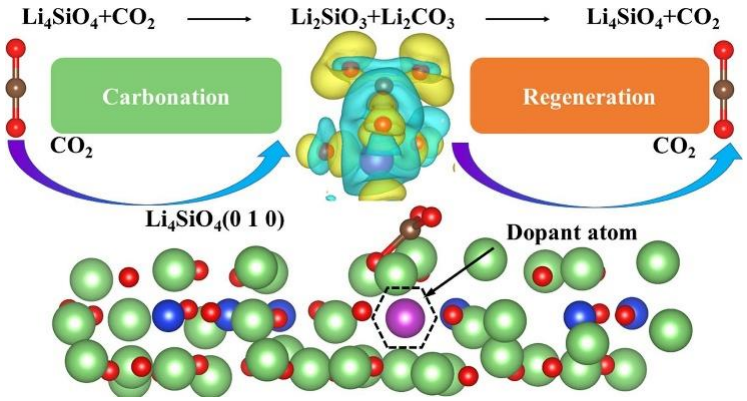


Рисунок 1 – Механизм сорбции диоксида углерода на ортосиликате лития [7]

На второй стадии процесс переходит в диффузионно-контролируемый режим, где ионы Li^+ и O^{2-} должны диффундировать через слои продуктов реакции (Li_2CO_3 и Li_2SiO_3), что существенно замедляет общую скорость поглощения CO_2. Формирование внешней карбонатной оболочки создает диффузионный барьер, который ограничивает доступ CO_2 к внутренним слоям Li_4SiO_4 и является основным фактором, лимитирующим достижение теоретической емкости [8-9]. Температурная зависимость сорбционной емкости демонстрирует характерный максимум. При температурах ниже 500°C диффузионные процессы кинетически заторможены, что приводит к низким скоростям и емкостям [10]. В диапазоне 550-650°C [11] наблюдается оптимальное сочетание кинетики диффузии и термодинамического равновесия, обеспечивающее максимальную сорбцию. При температурах выше 650-700°C кинетика десорбции CO_2 становится быстрее адсорбции, что снижает общую емкость [12].

Морфология частиц Li_4SiO_4 играет критическую роль в сорбционных характеристиках. Наноструктурированные формы демонстрируют существенное улучшение кинетики за счет увеличения удельной поверхности и сокращения диффузионных расстояний [13].

Наноструктурированные формы Li_4SiO_4 показывают выдающиеся результаты. Литиевые силикатные наношиты (LSN), синтезированные методом золь-гель, достигают сорбционной емкости 35.3 масс. % (96% от теоретической) при 650°C с ультрабыстрой кинетикой (0.22 г CO_2/(г·мин)) и сохраняют производительность на протяжении минимум 200 циклов без формирования толстой карбонатной оболочки [14-15]. Морфология наношитов обеспечивает эффективную диффузию CO_2 через весь объем материала, позволяя реагировать всей структуре, а не только поверхности.

Нанопроволоки Li_4SiO_4 также демонстрируют ультрабыструю кинетику сорбции благодаря высокому соотношению поверхности к объему и минимальным диффузионным путям [16]. Золь-гель синтез с использованием металлорганических каркасов (MOF) в качестве прекурсоров кремния приводит к образованию коралловидной морфологии с увеличенной контактной площадью между CO_2 и сорбентом [17]. Размер частиц критически влияет на доступность внутренних активных центров. Уменьшение размера частиц от микрометров до наномасштаба приводит к значительному ускорению процесса сорбции, так как уменьшается толщина продуктового слоя, через который должна происходить диффузия. Однако чрезмерно малые частицы могут агломерироваться, что негативно сказывается на сорбционных свойствах [18].

По сравнению с натриевыми и калиевыми аналогами, Li_4SiO_4 обладает превосходной теоретической сорбционной емкостью по CO_2 36,7 масс.% [22]. В то время как натриевые силикаты более эффективны в низкотемпературных диапазонах (30-60°C) [34], ортосиликат лития сохраняет высокую реакционную способность и структурную целостность в интервале 500-700°C, что делает его оптимальным для прямой интеграции в высокотемпературные промышленные газовые потоки [10, 22].

2. 1 Циклическая стабильность сорбентов и их допирование

Циклическая стабильность является критическим параметром для практического применения. Обычный Li_4SiO_4, полученный твердофазным синтезом, демонстрирует снижение сорбционной емкости с 30 до 26 масс. % за 16 циклов при относительно мягких условиях регенерации (700°C в N_2). Основные механизмы деградации включают спекание

частиц при высоких температурах, приводящее к снижению удельной поверхности и увеличению размера кристаллитов, формирование плотного карбонатного слоя, затрудняющего массоперенос в последующих циклах, структурные изменения кристаллической решетки при многократном циклировании [19]. В таблице 1 приведено сравнение циклической стабильности сорбентов на основе Li_4SiO_4.

Таблица 1 – Сравнение циклической стабильности сорбентов на основе Li_4SiO_4 при высокотемпературном улавливании CO2

Состав сорбента и метод синтеза	Условия сорбции (T, CO_2)	Начальная сорбционная ёмкость	Циклическая стабильность	Основные причины деградации / стабильности	
Li_4SiO_4 (микронный) Твердофазный синтез	600°C	28-32 масс.%	Умеренная деградация после 20-30 циклов	Диффузионные ограничения через продуктовый слой	[21]
Наноструктурированный Li_4SiO_4 Золь-гель	650°C	32-34 масс.%	Стабильность до 100 циклов	Уменьшенные диффузионные расстояния, высокая удельная поверхность	[22]
Li_4SiO_4-LSN (наношиты Золь-гель)	650°C	35.3 масс. % (≈96% теор.)	Без потери ёмкости ≥200 циклов	Отсутствие плотной карбонатной оболочки, смешанная фазовая модель	[14]
Li_4SiO_4 + K_2CO_3 (17–20 масс.%) Допирование карбонатом калия	600-670 °C	33-35 масс.%	≥100 циклов без деградации	Эвтектическая фаза Li_2CO_3–K_2CO_3, ускоренная диффузия	[23]
Li_4SiO_4 + Na ($Li_{4-x}Na_xSiO_4$) Эвтектический метод	600-650 °C	В 2.4 раза выше, чем у чистого	Улучшенная по сравнению с чистым Li_4SiO_4	Дефекты решётки, облегчённый перенос Li^+	[24]
Li_4SiO_4 + Ti (5 мол.%) + K Содопирование	600-650 °C, CO_2 15 об.%	~0.30 г CO_2/г	Высокая стабильность при низкой концентрации CO_2	Подавление спекания, фазовая стабилизация	[25]
Li_4SiO_4 из летучей золы Утилизация отходов + K_2CO_3	580-600 °C	до 32.4 масс.%	Лучше, чем у чистого Li_4SiO_4	Присутствие примесей, улучшение структуры	[26]
Li_4SiO_4 из Li-ионных АКБ Рециклинг	600-650°C, CO_2 15 об.%	~0.19 г/г	~80 циклов без значимой деградации	Самовосстановление структуры, экономичность	[27]

Наноструктурированные формы, особенно LSN, показывают выдающуюся стабильность без потери емкости или кинетики на протяжении 200 циклов, что объясняется механизмом смешанной фазовой модели поглощения CO_2, предотвращающим формирование непроницаемой карбонатной оболочки [28].

Введение щелочных карбонатов, особенно K_2CO_3 и Na_2CO_3, является наиболее эффективной стратегией улучшения сорбционных характеристик Li_4SiO_4. Механизм усиления связан с формированием низкотемпературных эвтектических смесей между Li_2CO_3 и щелочным карбонатом-допантом. K_2CO_3-допирование создает эвтектическую смесь Li_2CO_3-K_2CO_3 с температурой плавления около 500°C, что ниже температуры сорбции. Расплавленная эвтектика значительно облегчает диффузию CO_2 и ионов через продуктовый слой, существенно ускоряя медленную диффузионную стадию. Оптимальное содержание K_2CO_3 составляет 17-20 масс. % [29]. Допирование 20% K_2CO_3 увеличивает сорбционную емкость с 1.8 до 2.0 ммоль CO_2/г для натриевых силикатов на основе летучей золы и ускоряет скорости адсорбции/десорбции.

Систематическое исследование с применением методологии поверхности отклика (RSM) выявило, что максимальная сорбционная емкость 196.4 мг/г достигается при содержании K_2CO_3 около 17 масс. %, температуре синтеза 600°C и температуре адсорбции 662°C. Эвтектический механизм также способствует регенерации сорбента за счет ускоренной десорбции CO_2 [30].

Na-допирование проявляет себя иначе. Вместо простого физического смешивания, Na^+ может частично замещать Li^+ в кристаллической решетке Li_4SiO_4, формируя твердые растворы $Li_{4-x}Na_xSiO_4$. Замещение создает структурные дефекты и изменяет параметры решетки, что может как улучшить, так и ухудшить диффузию в зависимости от концентрации. Na-допированный Li_4SiO_4, полученный эвтектическим методом, демонстрирует сорбционную емкость в 2.4 раза выше недопированного материала.

Титановое допирование представляет инновационную стратегию, сочетающую три механизма усиления: эвтектическую промоцию, твердорастворное упрочнение и стабилизацию второй фазой. Li_4SiO_4, допированный 5 мол. % Ti и содопированный K, демонстрирует выдающуюся сорбционную емкость (0.30 г CO_2/г), быструю скорость сорбции (0.15 г CO_2/(г·мин)) и исключительную циклическую стабильность при низких концентрациях CO_2 (15 об. %). Ti-допирование подавляет спекание Li_4SiO_4 и улучшает структурную целостность в циклических процессах [31].

Содопирование K и Al увеличивает энергию адсорбции CO_2 на поверхности Li_4SiO_4 (010), усиливает гибридные пики и расширяет температурный диапазон эффективной сорбции. Квантово-химические расчеты показывают, что допирование различными валентными состояниями металлов (monovalentные K и Na, двухвалентные Be и Ca, трехвалентный Al) снижает энергию, необходимую для адсорбции CO_2, за счет усиления переноса заряда от поверхности к CO_2. Допирование кальцием через формирование Ca_2SiO_4 обеспечивает дополнительный механизм улавливания CO_2 и облегчает перенос CO_2 от поверхности Li_4SiO_4 к ядру частицы, снижая диффузионное сопротивление.

Использование альтернативных источников кремния вместо традиционных реагентов открывает возможности снижения стоимости и улучшения свойств. Металлургические шлаки, содержащие 20-40 масс. % SiO_2, успешно применяются для синтеза Li_4SiO_4. Силикаты, полученные из блочных отходов строительства, демонстрируют максимальную сорбционную емкость 183 мг CO_2/г при 580°C с PCO_2 = 0.2, что сопоставимо с материалами из коммерческих прекурсоров [32]. Летучая зола от сжигания угля, богатая SiO_2 (45-65 масс. %), также является перспективным сырьем. Li_4SiO_4 из летучей золы достигает сорбционной емкости 32.4 масс. % и демонстрирует лучшую циклическую стабильность по сравнению с чистым Li_4SiO_4 (22.1 масс. %). Присутствие примесей железа в форме $LiFeO_2$ может дополнительно улавливать CO_2 при специфических температурах около 550°C.

Использование отработанных литий-ионных аккумуляторов как источника лития и синтез Li_4SiO_4 с самовосстановлением анодным графитом позволяет снизить стоимость производства сорбента в 20-30 раз по сравнению с традиционными методами при сохранении отличной сорбционной емкости (0.19 г/г при 15 об. % CO_2) и циклической стабильности (80 циклов) [33].

Анализ циклической стабильности показывает, что ключевыми факторами долговечности Li_4SiO_4-сорбентов являются наноструктурирование и целенаправленное допирование. Особенно перспективными являются наношитовые структуры и системы с эвтектическими добавками K_2CO_3, демонстрирующие стабильную работу на протяжении ≥200 циклов без снижения сорбционной ёмкости.

Эффективность процесса сорбции внутренне ограничена формированием плотного двойного слоя продуктов Li_2CO_3 и Li_2SiO_3, который переводит реакцию из быстрого режима, контролируемого поверхностным взаимодействием, в медленную стадию, лимитируемую диффузией ионов через слой продукта [8, 20]. Кроме того, длительное воздействие высоких температур регенерации приводит к спеканию материала и потере активной удельной поверхности [55], а присутствие примесей, таких как SO_2, вызывает необратимую сульфатацию, конкурирующую с сорбцией CO_2 [6, 53].

3. Натриевые и калиевые силикаты

Метасиликат натрия (Na_2SiO_3) был первоначально исследован для низкотемпературного улавливания CO_2 (<130°C) в присутствии водяного пара согласно реакции:

$$Na_2SiO_3+2CO_2 \rightarrow 2NaHCO_3+SiO_2 \qquad (2)$$

Однако в сухих условиях при низких температурах емкость была незначительной (<0.25 ммоль CO_2/г). Последующие исследования продемонстрировали, что при высоких температурах (700°C) Na_2SiO_3 значительно повышает эффективность улавливания.

Материал, полученный методом горения, захватывает до 8.5 ммоль CO_2/г (эффективность 52%) при низких температурах в присутствии водяного пара, что является выдающимся результатом среди различных материалов [34].

Na-силикаты из летучей золы с мольным соотношением Na_2CO_3:SiO_2 = 1:1 поглощают 1.8 ммоль CO_2/г при 700°C, а при добавлении 20% Li_2CO_3 емкость возрастает до 2.0 ммоль CO_2/г с ускорением скоростей адсорбции/десорбции. Материал Na-FA (0.5:1) демонстрирует хорошую сорбционную емкость при условиях после сгорания (12.5% CO_2, 12% H_2O, 700°C) и сохраняет емкость после пяти циклов, что делает его сопоставимым с другими высокотемпературными сорбентами [35].

Ортосиликат натрия (Na_4SiO_4) редко изучался для высокотемпературного улавливания CO_2. Недавние исследования показали, что Na_4SiO_4 демонстрирует сорбционное поведение, сопоставимое с Li_4SiO_4, но с существенно более низкой стоимостью материала и производства CO_2-сорбции по сравнению с литиевыми аналогами. Стоимость натрия и его соединений значительно ниже, чем лития, что делает Na_4SiO_4 экономически привлекательной альтернативой для крупномасштабных приложений [36].

Ключевое преимущество натриевых силикатов – доступность и низкая стоимость натриевого сырья. Натрий примерно в 1000 раз более распространен в земной коре, чем литий, и его добыча не связана с серьезными геополитическими и экологическими проблемами, характерными для литиевой индустрии.

Калиевые силикаты исследованы в меньшей степени как самостоятельные CO_2-сорбенты, но находят применение в других ролях [37]. Силикат калия успешно используется как низкотемпературное связующее в 3D-печатных композитных сорбентах на основе активированного угля. Композит активированный уголь/силикат калия демонстрирует сорбционную емкость 0.76 ммоль CO_2/г при регенерации при 150°C, что почти втрое превышает емкость исходного порошка активированного угля (0.28 ммоль/г) [37].

Механизм сорбции в таких композитах включает комбинацию физисорбции в остаточных порах активированного угля и хемосорбции с образованием бикарбонатов калия ($KHCO_3$). In situ рентгеноструктурный анализ подтвердил присутствие $KHCO_3$, который при нагреве до 150°C полностью конвертируется в K_2CO_3. Неполная регенерация при комнатной температуре указывает на необходимость умеренного нагрева для восстановления всех хемосорбционных центров [38].

Силикат калия обеспечивает высокую механическую прочность, хорошую химическую и термическую стабильность 3D-печатных монолитов, а также однородное резистивное нагревание для джоулевой регенерации, что открывает перспективы для энергоэффективных циклических процессов.

4. Методы синтеза силикатных сорбентов

Твердофазный (керамический) метод является наиболее простым и масштабируемым подходом к получению Li_4SiO_4 и других щелочных силикатов. Метод заключается в механическом смешивании прекурсоров (карбонат или гидроксид лития, диоксид кремния) с последующим высокотемпературным спеканием [39]. На рисунке 2 показана схема твердофазного синтеза ортосиликата лития.



Рисунок 2 – Схема твердофазного синтеза ортосиликата лития

Типичные условия синтеза Li_4SiO_4-температура 600-900°C, продолжительность 4-10 часов на воздухе. Оптимальная температура синтеза составляет 800°C, так как при этой температуре формируются метастабильные фазы силиката натрия с улучшенной CO_2-сорбцией. Температура синтеза критически влияет на фазовый состав, морфологию и размер частиц. При 600°C наблюдается неполная конверсия прекурсоров с остаточным Li_2CO_3, тогда

как при 750-900°C происходит значительное спекание частиц с образованием неплотной морфологии и увеличением размера до 30-50 мкм.

Основные недостатки твердофазного метода – это большой размер частиц (десятки микрометров), низкая удельная поверхность, неоднородное распределение фаз при допировании, высокое энергопотребление. Преимущества: простота, масштабируемость, отсутствие растворителей, низкая стоимость.

Золь-гель синтез обеспечивает лучший контроль над морфологией, размером частиц и гомогенностью состава на молекулярном уровне. Метод включает гидролиз и поликонденсацию прекурсоров в растворе с образованием геля, последующую сушку и кальцинацию при более низких температурах (400-700°C) по сравнению с твердофазным синтезом. Золь-гель Li_4SiO_4 демонстрирует существенно улучшенные характеристики, более высокую удельную поверхность, меньший размер частиц, улучшенную морфологию с увеличенной пористостью. Наночастицы Li_4SiO_4 размером в нанометровом диапазоне показывают высокую скорость сорбции и достигают емкости 6.9 ммоль CO_2/г, соответствующей 82.4% конверсии Li_4SiO_4. Использование металлорганических каркасов (MOF) в качестве прекурсора кремния в золь-гель синтезе приводит к образованию коралловидной морфологии с существенно увеличенной контактной площадью между CO_2 и Li_4SiO_4, что превосходит материалы, полученные обычным твердофазным методом [39].

Метод полимер-производных керамик представляет инновационный подход, сочетающий преимущества золь-гель синтеза с упрощенным масштабированием [40]. В процессе органические полимерные сети, содержащие кремний и литиевые соли, пиролизуются при умеренных температурах (>400°C), трансформируясь в реакционноспособные неорганические источники, которые реагируют с активными наполнителями при относительно низких температурах синтеза.

Утилизация промышленных отходов, богатых кремнием, для производства силикатных сорбентов представляет двойную выгоду: решение проблемы обращения с отходами и снижение стоимости сорбентов. Летучая зола (45-65% SiO_2), металлургические шлаги (20-40% SiO_2), строительные отходы, рисовая шелуха (до 20% SiO_2 в золе) успешно применяются как источники кремния [41]. Li_4SiO_4, синтезированный из летучей золы с добавлением K_2CO_3, демонстрирует максимальную сорбционную емкость 28.2 масс. % при 600°C с быстрой кинетикой. Силикаты из бетонных отходов достигают CO_2-сорбции, начинающейся при 295°C, с двумя пиками поглощения и максимальной емкостью около 100 мг CO_2/г при 600°C. Преобразование отработанных литий-ионных аккумуляторов в Li_4SiO_4 представляет уникальную возможность замкнуть цикл материалов. Стоимость производства составляет лишь 1/20-1/3 от стоимости традиционных методов при сохранении превосходной емкости и стабильности. Этот подход не только промоутирует рециклинг аккумуляторов, но и значительно снижает стоимость подготовки сорбентов, что имеет большое значение для развития технологий улавливания CO_2.

5. Промышленные применения и интегрированные процессы

Силикатные сорбенты особенно перспективны для интеграции в высокотемпературные промышленные процессы, где охлаждение дымовых газов для применения традиционных низкотемпературных технологий (аминовая абсорбция) экономически нецелесообразно [42]. Цементная промышленность генерирует около 8% глобальных антропогенных выбросов CO_2 при температурах 300-400°C на выходе из печи. Кальциевое петлевание с использованием CaO рассматривается для улавливания CO_2 в цементных заводах, однако литиевые и натриевые силикаты предлагают преимущества в виде более низких температур регенерации и лучшей стабильности [42].

Сталелитейная промышленность производит отходящие газы доменных печей, содержащие 20-25% CO_2 при температурах около 300°C [43]. Прямое улавливание из этих потоков при высокой температуре может значительно снизить энергозатраты. ZnH-MFU-4l, металл-органический каркас, демонстрирует захват CO_2 при 300°C с эффективностью >90%, хотя щелочные силикаты также могут быть адаптированы для этих условий.

Производство водорода парово-риформингом метана или биогаза генерирует синтез-газ с высоким содержанием CO_2 при температурах 600-900°C. Процессы с улучшенной сорбцией интегрируют высокотемпературный сорбент непосредственно в реактор риформинга, что смещает равновесие в сторону образования водорода и одновременно улавливает CO_2.

Концепция улавливания и утилизации (ICCU) объединяет улавливание и каталитическую конверсию CO_2 в ценные продукты (CO, CH_4, углеводороды) в одном реакторе, используя бифункциональные материалы, сочетающие сорбционные и каталитические центры. Этот подход устраняет необходимость отдельной стадии регенерации и последующей конверсии, повышая общую энергоэффективность процесса [44].

Li_4SiO_4-содержащие бифункциональные материалы применяются для ICCU-DRM (сухой риформинг метана с интегрированным улавливанием CO_2). K_2CO_3-допированный Li_4SiO_4 в сочетании с Ni-катализатором обеспечивает стабильное соотношение $H_2/CO = 1 \pm 0.05$ на стадии до проскока CO_2, а продолжительность процесса увеличивается в 1.6 раза при циклических операциях. Синергетические эффекты между Li_4SiO_4 и катализатором промоутируют дегидрирование CH_4 и конверсию CO_2, предотвращая коксообразование [45].

CaO-$NaAlO_2$ бифункциональные сорбенты-катализаторы для интегрированного процесса CaL-RB (кальциевое петлевание – обратная реакция Будуара) демонстрируют 90% эффективность циклической конверсии CO_2 в CO через газификацию биоугля. $NaAlO_2$, производный от Na_2CO_3 и оксида алюминия, обеспечивает каталитическую активность, инертность к золе биомассы и сопротивление спеканию, преодолевая ограничения обычных щелочно-карбонатных катализаторов [46].

Структурированные кооперативные бифункциональные материалы, содержащие высокотемпературный сорбент и катализатор, могут быть изготовлены в виде монолитных контакторов для эффективной интеграции улавливания и конверсии CO_2 в одном реакторе при сохранении каталитической активности, сопоставимой с традиционными дегидрирующими катализаторами.

6. Технико-экономические аспекты

Экономическая целесообразность силикатных сорбентов определяется стоимостью материалов, синтеза, энергопотребления при регенерации и долговечности. Литиевые соединения (Li_2CO_3, LiOH) значительно дороже натриевых и калиевых аналогов из-за ограниченности ресурсов лития и растущего спроса со стороны аккумуляторной промышленности. Натрий примерно в 1000 раз более распространен, что делает Na_4SiO_4 и Na_2SiO_3 экономически привлекательными для крупномасштабных применений [47].

Валоризация промышленных отходов как источников кремния представляет собой стратегию «двойного выигрыша», одновременно снижающую стоимость сорбентов и решающую проблему обращения с отходами. Исследования демонстрируют, что получение силикатов из биомассы и сельскохозяйственных отходов (рисовая шелуха, рисовая солома, багасса, зола биомассы) снижает выбросы парниковых газов на 60-62% по сравнению с коммерческими силикатами и сокращает стоимость активатора на 50-70% [47].

Энергетическая эффективность регенерации сорбента является критическим фактором, определяющим операционные расходы систем улавливания CO_2. Расчетная потребность в тепле для регенерации полиэтиленимин/силикатных сорбентов составляет ~2.46 ГДж/т CO_2, что значительно ниже эталонного показателя для систем на основе моноэтаноламина (МЭА) в 3.9 ГДж/т CO_2 и оптимизированных МЭА-систем в 3.3 ГДж/т CO_2 [48]. Энергетические требования зависят от рабочей емкости сорбента, теплоты адсорбции, адсорбции влаги и степени рекуперации тепла, причем последние два фактора оказывают наиболее существенное влияние.

Интеграция установок улавливания CO_2 с промышленными источниками отходящего тепла может драматически улучшить экономику процесса. Для цементного завода с 90% степенью улавливания требуется приблизительно 70 МВт_тепл для процесса улавливания CO_2, при этом использование доступного отходящего тепла предприятия может обеспечить эти потребности, снижая стоимость улавливания CO_2 с 84.7 €/т до 48.0 €/т для МЭА-процесса и с 62.2 €/т до 35.6 €/т для твердофазных аминных сорбентов при максимальной рекуперации тепла. Интеграция установки улавливания с нефтеперерабатывающим заводом при степени улавливания ~60% потребует всего доступного остаточного тепла предприятия, однако значительное количество тепла может быть рекуперировано из установки улавливания для снабжения системы централизованного теплоснабжения. Системы рекуперации отходящего тепла в процессах улавливания CO_2 на основе аминов демонстрируют энергетическую

экономию от 12% до 24%, причем каскадные системы превосходят одноступенчатые системы на 50%. Для твердых сорбентов более низкие температуры регенерации открывают возможности для использования низкопотенциальных источников тепла, включая геотермальную энергию, промышленное отходящее тепло и концентрированную солнечную энергию [49].

Циклическая стабильность напрямую определяет экономическую эффективность сорбентов, поскольку частота замены существенно влияет на общие затраты. Недавние исследования демонстрируют, что оптимальное время замены сорбента зависит от баланса между уменьшающимися удельными затратами на сорбент и возрастающими капитальными и эксплуатационными расходами [50]. Для сорбентов, демонстрирующих 50% потерю емкости после одного года, оптимальная периодичность замены составляет ежегодно, тогда как для сорбентов с 10% потерей емкости оптимум составляет трехлетние интервалы.

Для достижения экономической конкурентоспособности силикатных сорбентов на рынке улавливания CO_2 необходимо одновременное улучшение по нескольким направлениям. Приоритетные области включают:

(1) разработку высокостабильных составов с циклической стабильностью >200-500 циклов при минимальной деградации емкости;

(2) оптимизацию температур регенерации для эффективной интеграции с промышленными источниками отходящего тепла (600-800°C для высокотемпературных процессов, <120°C для низкотемпературных систем);

(3) масштабирование производства сорбентов с использованием отходов как источников кремния для снижения материальных затрат на 70-90%;

(4) развитие модульных, масштабируемых конфигураций процессов для снижения капитальных затрат;

(5) интеграцию с возобновляемыми источниками энергии и схемами ICCU для минимизации энергетического штрафа и создания добавленной стоимости.

Использование промышленных отходов, таких как летучая зола [12, 35], металлургические шлаки [27, 32] и отработанные литий-ионные аккумуляторы [18, 33], в качестве прекурсоров позволяет снизить общую стоимость производства сорбентов в 3-20 раз. Данный экономический механизм основан на отказе от дорогостоящих высокочистых реагентов и использовании полезных примесей (например, Al, Fe, Ca), которые в отходах выступают в роли естественных допантов, повышающих структурную стабильность и предотвращающих спекание без дополнительных затрат на обработку [32, 42].

7. Вызовы и ограничения

Несмотря на выдающиеся характеристики, силикатные сорбенты сталкиваются с рядом фундаментальных и практических вызовов, которые необходимо преодолеть для широкого промышленного применения.

Формирование плотного карбонатного слоя (Li_2CO_3 для литиевых силикатов) на поверхности частиц создает существенный диффузионный барьер для переноса CO_2 и ионов Li^+/O^{2-} к внутренним реакционным центрам. Этот эффект является основной причиной, по которой практическая сорбционная емкость (20-35 масс. %) не достигает теоретической (36.7 масс.%). Диффузионно-контролируемая стадия значительно замедляет общую кинетику сорбции, особенно при более низких концентрациях CO_2 [51].

Стратегии преодоления включают наноструктурирование, допирование щелочными карбонатами, оптимизацию морфологии. Высокие рабочие температуры (500-850°C) и многократные термические циклы приводят к спеканию частиц Li_4SiO_4, росту кристаллитов и снижению удельной поверхности. Спекание ухудшает доступность активных центров и замедляет кинетику сорбции. Особенно чувствительны к спеканию материалы с высоким содержанием щелочных карбонатов-допантов. Добавление термически стабильных оксидов (Al_2O_3, ZrO_2, TiO_2) в качестве структурных стабилизаторов может подавить спекание. Ti-допирование, формирующее вторую фазу, эффективно предотвращает агломерацию и сохраняет структурную целостность в течение многих циклов.

Реальные промышленные дымовые газы содержат примеси (SO_2, NO_2, H_2O, O_2), которые могут взаимодействовать с силикатными сорбентами и влиять на их производительность [52].

Li_4SiO_4 необратимо реагирует с SO_2 с образованием Li_2SO_4, что снижает сорбционную емкость по CO_2. Активационная энергия сульфатации в кинетически контролируемой стадии (7.5 кДж/моль) значительно ниже, чем для сорбции CO_2 (13.9-27.1 кДж/моль), что означает, что Li_4SiO_4 легко сульфатируется. Присутствие O_2 ускоряет сульфатацию. Поэтому необходима предварительная очистка дымовых газов от SO_2 перед улавливанием CO_2 [53].

Для некоторых силикатов (Na_2SiO_3) водяной пар резко увеличивает сорбционную емкость при низких температурах за счет формирования бикарбонатов. Для Li_4SiO_4 влага может как положительно, так и отрицательно влиять на сорбцию в зависимости от условий [54].

Для применения в реакторах с псевдоожиженным или движущимся слоем сорбенты должны обладать достаточной механической прочностью, чтобы выдерживать истирание и атритцию. Нанопорошки и агрегаты с низкой прочностью подвержены распаду и образованию пыли, что приводит к потерям материала и проблемам с эксплуатацией. Формование сорбентов в гранулы, экструдаты или структурированные монолиты с использованием связующих (силикаты, оксиды алюминия) улучшает механические свойства. Однако добавление инертных связующих снижает массовую долю активного сорбента и общую сорбционную емкость на единицу массы композита [55].

8. Перспективы и будущие направления исследований

Будущие разработки силикатных сорбентов направлены на создание многофункциональных материалов, сочетающих сорбционные, каталитические и структурные функции в иерархически организованной архитектуре. Интеграция наноструктурированных активных центров в мезо- и макропористых матрицах обеспечит оптимальное сочетание высокой удельной поверхности и достаточной механической прочности.

Бифункциональные сорбенты-катализаторы для ICCU представляют трансформационную возможность перехода от простого улавливания к одновременной конверсии CO_2 в ценные химические продукты, замыкая углеродный цикл [56]. Рациональный дизайн таких материалов требует оптимизации пространственного распределения и близости сорбционных и каталитических центров, что может быть достигнуто методами атомно-слоевого осаждения, темплатного синтеза и 3D-печати.

Применение квантово-химических расчетов (DFT, ab initio) для предсказания энергии адсорбции, барьеров диффузии и оптимальных составов допирования открывает возможности направленного дизайна сорбентов с заданными свойствами. Расчеты могут идентифицировать наиболее перспективные комбинации допантов до экспериментального синтеза, значительно ускоряя разработку [57].

Машинное обучение на основе больших массивов данных о сорбционных характеристиках различных материалов может выявить неочевидные корреляции между составом, структурой, условиями синтеза и производительностью, предложить новые материальные решения и оптимизировать процессы. Интеграция экспериментальных, вычислительных и ML-подходов в замкнутый цикл ускоренной разработки может революционизировать область CO_2-сорбентов.

Большинство исследований силикатных сорбентов выполнено на лабораторном масштабе (миллиграммы-граммы материала). Для промышленного применения необходимо масштабирование синтеза до тонн при сохранении качества и воспроизводимости характеристик. Использование непрерывных процессов синтеза (вращающиеся печи, флюидизированные реакторы) вместо периодических может решить эту задачу.

Пилотные и демонстрационные установки в реальных промышленных условиях (цементные заводы, сталелитейные комбинаты, водородные установки) критически важны для валидации технологии, оценки долгосрочной стабильности (тысячи циклов), влияния реальных примесей и технико-экономической эффективности. Проекты EU H2020 Cemcap, Ascent и Stepwise уже демонстрируют высокотемпературные сорбенты в промышленных приложениях для улавливания CO_2.

Заключение

Силикатные сорбенты на основе щелочных металлов представляют высокоперспективный класс материалов для высокотемпературного улавливания CO_2, сочетающий высокую сорбционную емкость, умеренные температуры регенерации и потенциально хорошую циклическую стабильность. Литиевые силикаты, особенно Li_4SiO_4,

демонстрируют лучшие характеристики среди щелочных силикатов с теоретической емкостью 36.7 масс. % и оптимальной рабочей температурой 550-650°C. Наноструктурирование и допирование щелочными карбонатами и металлами эффективно преодолевают фундаментальные ограничения, связанные с диффузией через продуктовый слой и спеканием.

Натриевые силикаты предлагают экономически привлекательную альтернативу благодаря существенно более низкой стоимости и доступности натриевого сырья, хотя их сорбционные характеристики требуют дальнейшей оптимизации. Калиевые силикаты находят нишевые применения как связующие и промоторы в композитных сорбентах.

Методы синтеза из промышленных отходов (летучая зола, металлургические шлаки, отработанные аккумуляторы) значительно снижают стоимость производства сорбентов (в 3-20 раз) и способствуют циркулярной экономике. Комплексная характеризация с использованием XRD, SEM, TGA, TPD и спектроскопических методов необходима для установления взаимосвязей структура-свойство и направленной разработки.

Для установления четкой взаимосвязи «структура – свойство» необходим комплексный подход: метод РФА (XRD) используется для контроля фазовой чистоты и кристаллических переходов [4, 21], СЭМ (SEM) позволяет визуализировать эволюцию морфологии (например, формирование нанолистов или пористых сфер), определяющую доступность газа к активным центрам [13, 14, 15], а ТГА (TGA) обеспечивает количественную оценку сорбционной емкости и долгосрочной циклической стабильности в реальных термических условиях [10, 30].

Промышленные применения силикатных сорбентов охватывают улавливание CO_2 из высокотемпературных потоков цементной, сталелитейной и энергетической промышленности, а также интегрированные процессы улавливания и конверсии CO_2 в ценные продукты (ICCU). Бифункциональные сорбенты-катализаторы представляют трансформационную возможность для эффективной утилизации CO_2.

Основные вызовы включают диффузионные ограничения, спекание, чувствительность к примесям (SO_2) и необходимость масштабирования. Будущие направления исследований сфокусированы на разработке многофункциональных иерархически структурированных материалов, применении вычислительных методов и машинного обучения для направленного дизайна, демонстрации технологии в промышленном масштабе и интеграции с возобновляемыми источниками энергии.

При успешном решении текущих вызовов силикатные сорбенты могут стать ключевой технологией для глубокой декарбонизации энергоемких промышленных секторов и достижения целей по климатической нейтральности в ближайшие десятилетия. Комбинация фундаментальных исследований механизмов, инновационных подходов к синтезу и модификации материалов, и промышленной демонстрации проложит путь к широкомасштабному применению этих перспективных материалов для улавливания и утилизации CO_2.

Список литературы

1. Carbon capture and storage (CCS): the way forward / M. Bui et al // Energy & Environmental Science. – 2018. – Vol. 11. – P. 1062-1176. https://doi.org/10.1039/C7EE02342A.
2. The technological and economic prospects for CO_2 utilization and removal / C. Hepburn et al // Nature. – 2019. – Vol. 575. – P. 87-97. https://doi.org/10.1038/s41586-019-1681-6.
3. The role of alkaline/alkaline earth metal oxides in CO_2 capture: a concise review / E. Victor et al. // Journal of Energy Research and Reviews. – 2021. – Vol. 9, № 3. – P. 4-64. https://doi.org/10.9734/jenrr/2021/v9i330235.
4. Effect of a Li_2SiO_3 phase in lithium silicate-based sorbents for CO_2 capture at high temperatures / Y.M. Kwon et al // Separation and Purification Technology. – 2019. – Vol. 214. – P. 104-110. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.07.073.
5. Li_4SiO_4-based sorbents from expanded perlite for high-temperature CO_2 capture / S. Ni et al // Chemical Engineering Journal. – 2021. – Vol. 410. – Art. 128357. https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.128357.
6. Reaction mechanism and kinetics of the sulfation of Li_4SiO_4 for high-temperature CO_2 adsorption / W. Yuan et al // ACS Sustainable Chemistry & Engineering. – 2021. – Vol. 9, № 28. – P. 9386-9394. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c02528.

7. Adsorption mechanism of CO_2 on the single atom doped or promoted Li_4SiO_4 (010) surface from first principles / C. Zhang et al // Computational and Theoretical Chemistry. – 2021. – Vol. 1205. – Art. 113424. https://doi.org/10.1016/j.comptc.2021.113424.
8. Kinetic model for CO_2 capture by lithium silicates / A. Vallace et al // The Journal of Physical Chemistry C. – 2020. – Vol. 124, № 37. – P. 20506-20515. https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.0c04230.
9. Recent progress and prospects of Li–CO_2 batteries: mechanisms, catalysts and electrolytes / Y. Jiao et al // Energy Storage Materials. – 2021. – Vol. 34. – P. 148-170. https://doi.org/10.1016/j.ensm.2020.09.014.
10. Adsorption and desorption equilibrium of Li_4SiO_4-based sorbents for high-temperature CO_2 capture / S. Chen et al // Chemical Engineering Journal. – 2022. – Vol. 429. – Art. 132236. https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.132236.
11. Scalable synthesis of Li_4SiO_4 sorbent from novel low-cost orthoclase mineral for CO_2 capture / Y. Hu et al // Fuel. – 2022. – Vol. 324. – Art. 124492. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124492.
12. Harnessing ash for sustainable CO_2 absorption: current strategies and future prospects / W.Y. Wu et al // Chemistry – An Asian Journal. – 2024. – Vol. 19, № 12. – Art. e202400180. https://doi.org/10.1002/asia.202400180.
13. Enhanced high-temperature cyclic CO_2 capture on Li_4SiO_4 sorbent from two-dimensional SiO_2 nanomeshes / A. Guo et al // Chemical Engineering Journal. – 2024. – Vol. 485. – Art. 149943. https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.149943.
14. Lithium silicate nanosheets with excellent capture capacity and kinetics with unprecedented stability for high-temperature CO_2 capture / R. Belgamwar et al // Chemical Science. – 2021. – Vol. 12, № 13. – P. 4825-4835. https://doi.org/10.1039/D0SC06843H.
15. Hydrothermal-calcination synthesis of lithium orthosilicate microspheres for high-temperature CO_2 capture / X. Wang, et al // Carbon Capture Science & Technology. – 2024. – Vol. 13. – Art. 100303. https://doi.org/10.1016/j.ccst.2024.100303.
16. Textural properties determined CO_2 capture of tetraethylenepentamine loaded SiO_2 nanowires from α-sepiolite / J. Ouyang et al // Chemical Engineering Journal. – 2018. – Vol. 337. – P. 342-350. https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.12.109.
17. Gibridnye materialy na osnove proizvodnyh grafena i porfirinovyh metall-organicheskih karkasov / V.V. Arslanov, i dr. // Uspehi himii. – 2019. – T. 88, № 8. – S. 775-799. https://doi.org/10.1070/RCR4878. (In Russian).
18. Synthesis of high-performance Li_4SiO_4 sorbent for CO_2 capture using Li_2CO_3 extracted from spent lithium batteries / Y. Tan et al // *Separation and Purification Technology*. – 2025. – Vol. 353. – Art. 128605. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.128605.
19. Alkali metal (Na, Cs and K) promoted hydrotalcites for high-temperature CO_2 capture from flue gas in cyclic adsorption processes / A.C. Faria et al // Chemical Engineering Journal. – 2022. – Vol. 427. – Art. 131502. https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.131502.
20. High-temperature CO_2 capture in lithium orthosilicate packed fluidized bed: gamma ray densitometry based numerical model and its experimental validation / P.A. Dabhade et al // Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers. – 2023. – Vol. 151. – Art. 105106. https://doi.org/10.1016/j.jtice.2023.105106.
21. Grasso M.L. CO_2 capture properties of Li_4SiO_4 after aging in air at room temperature / M.L. Grasso, P.A. Larochette, F.C. Gennari // Journal of CO_2 Utilization. – 2020. – Vol. 38. – P. 232-240. https://doi.org/10.1016/j.jcou.2020.02.002.
22. Performance of Li_4SiO_4 material for CO_2 capture: a review / X. Yan et al // International Journal№of Molecular Sciences. – 2019. – Vol. 20, № 4. – Art. 928. https://doi.org/10.3390/ijms20040928.
23. Insights into adsorption mechanism and kinetic modeling of K_2CO_3-doped Li_4SiO_4 pellets for CO_2 capture at high temperature and low concentration / E. Stefanelli et al // Fuel. – 2025. – Vol. 380. – Art. 133161. https://doi.org/10.2139/ssrn.4877713.
24. Elucidating the promotion of Na_2CO_3 in CO_2 capture by Li_4SiO_4 / Z. Wang, et al // Physical Chemistry Chemical Physics. – 2021. – Vol. 23, № 47. – P. 26696-26708. https://doi.org/10.1039/D1CP04134E.
25. Doped Li_4SiO_4-based sorbents for CO_2 capture at high temperature / D. Rossi et al // Atti del Convegno – XIII Congresso Nazionale AICIng e II Congresso Nazionale della Divisione di Chimica per le Tecnologie della SCI. – EdiSES Edizioni Srl, 2023. – P. 94-95.

26. From low-cost mineral to high-performance Li_4SiO_4 for solar energy storage and CO_2 capture J. Yi et al // Separation and Purification Technology. – 2025. – Vol. 354. – Art. 129050. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.129050.
27. CO_2 capture utilizing Li_4SiO_4 from spent lithium-ion batteries and iron tailings offers eco-friendly benefits / T. Liao et al // Chemical Engineering Journal. – 2024. – Vol. 493. – Art. 152756. https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.152756.
28. Gharamaleki S.B. Taking dual function materials (DFM) from the laboratory to industrial applications: a review of DFM operation under realistic integrated CO_2 capture and utilization conditions / S.B. Gharamaleki, T.R. Reina, M.S. Duyar // Progress in Energy. – 2024. – Vol. 7, № 1. – Art. 012001. https://doi.org/10.1088/2516-1083/ad80f5.
29. Molten shell-activated, high-performance, un-doped Li_4SiO_4 for high-temperature CO_2 capture at low CO_2 concentrations / K. Wang, et al // Chemical Engineering Journal. – 2021. – Vol. 408. – Art. 127353. https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127353.
30. Optimization of high-temperature CO_2 capture by lithium orthosilicate-based sorbents using response surface methodology / E. Stefanelli et al // Atmosphere. – 2024. – Vol. 15, № 8. – Art. 908. https://doi.org/10.3390/atmos15080908.
31. Lee J.S. Enhanced sorption cycle stability and kinetics of CO_2 on lithium silicates using the lithium ion channeling effect of TiO_2 nanotubes / J.S. Lee, C.T. Yavuz // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2017. – Vol. 56, № 12. – P. 3413-3417. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.6b04918.
32. High-performance Li_4SiO_4 sorbents prepared from solid waste for CO_2 capture / C. Zhang et al // Separation and Purification Technology. – 2023. – Vol. 326. – Art. 124730. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.124730.
33. Niu B. Advances and challenges in anode graphite recycling from spent lithium-ion batteries / B. Niu, J. Xiao, Z. Xu // Journal of Hazardous Materials. – 2022. – Vol. 439. – Art. 129678. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129678.
34. Rodríguez-Mosqueda R. High CO_2 capture in sodium metasilicate (Na_2SiO_3) at low temperatures (30-60 °C) through the CO_2–H_2O chemisorption process / R. Rodríguez-Mosqueda, H. Pfeiffer // The Journal of Physical Chemistry C. – 2013. – Vol. 117, № 26. – P. 13452-13461. https://doi.org/10.1021/jp402850j.
35. Solid waste of fly ash toward energy-efficient CO_2 capture / L. Chen et al // ACS Sustainable Chemistry & Engineering. – 2023. – Vol. 11, № 22. – P. 8281-8293. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.3c00657.
36. High-temperature CO_2 capture performance and kinetic analysis of Na_4SiO_4 ceramics / C. Ling et al // Ceramics International. – 2022. – Vol. 48, № 22. – P. 33048-33057. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.07.237.
37. Potassium silicate as low-temperature binder in 3D-printed porous structures for CO_2 separation / B. Sutens et al // ACS Omega. – 2023. – Vol. 8, № 4. – P. 4116-4126. https://doi.org/10.1021/acsomega.2c07074.
38. Pinto D. Mechanistic insights into the CO_2 capture and reduction on K-promoted Cu/Al_2O_3 by spatiotemporal operando methodologies / D. Pinto, V. van der Bom Estadella, A. Urakawa // Catalysis Science & Technology. – 2022. – Vol. 12, № 17. – P. 5349-5359. https://doi.org/10.1039/D2CY00228K.
39. High-temperature capture of CO_2 on Li_4SiO_4 sorbents via a simple dry ball-milling coupled with K_2CO_3 physical addition / P. Zhao, et al // Carbon Capture Science & Technology. – 2024. – Vol. 13. – Art. 100255. https://doi.org/10.1016/j.ccst.2024.100255.
40. Zhou Y. Polymer-derived high-temperature nonoxide materials: a review / Y. Zhou, K. Lu // Advanced Engineering Materials. – 2023. – Vol. 25, № 9. – Art. 2200967. https://doi.org/10.1002/adem.202200967.
41. Utilizing rice husk-derived Si/C composites to enhance energy capacity and cycle sustainability of lithium-ion batteries / K. Askaruly et al // Diamond and Related Materials. – 2024. – Vol. 149. – Art. 111631. https://doi.org/10.1016/j.diamond.2024.111631.
42. CO_2 capture using lithium-based sorbents prepared with construction and demolition wastes as raw materials / A. Hernández-Palomares et al // Materials Today Sustainability. – 2023. – Vol. 24. – Art. 100491. https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2023.100491.
43. Wei X. Metal-organic framework for high-temperature CO_2 capture / X. Wei, D. Musikanth, S. Zhang // Energy Lab. – 2025. – Vol. 3, № 1. – Art. 240022.

44. High-purity hydrogen production by CO_2 addition for sorption-enhanced steam methane reforming at a temperature below 600°C / Y.Z. Chen et al // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2024. – Vol. 63, № 14. – P. 6169-6181. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.3c04463.
45. Integrated high-temperature CO_2 capture and conversion over mixed CaO–$NaAlO_2$ bifunctional sorbent–catalyst using a passivation strategy / P. Zhao et al // Chemical Engineering Journal. – 2025. – Art. 167165. https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.167165.
46. Performance and economic viability assessment of a novel CO_2 adsorbent for manufacturing and integration with coal power plants / A. Bellal et al // Chemical Engineering Journal. – 2024. – Vol. 498. – Art. 155604. https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.155604.
47. Techno-economic analysis of direct air carbon capture with CO_2 utilisation / T. Daniel et al // Carbon Capture Science & Technology. – 2022. – Vol. 2. – Art. 100025. https://doi.org/10.1016/j.ccst.2021.100025.
48. Cyclic performance evaluation of a polyethylenimine/silica adsorbent with steam regeneration using simulated NGCC flue gas and actual flue gas of a gas-fired boiler in a bubbling fluidized bed reactor / W. Zhang et al // International Journal of Greenhouse Gas Control. – 2020. – Vol. 95. – Art. 102975. https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2020.102975.
49. On the integration of CO_2 capture technologies for an oil refinery / V. Fetisov et al // Energies. – 2023. – Vol. 16, № 2. – Art. 865. https://doi.org/10.3390/en16020865.
50. Optimization of a natural gas power plant with membrane and solid sorbent carbon capture systems / F.B. Soepyan et al // Carbon Capture Science & Technology. – 2024. – Vol. 10. – Art. 100165. https://doi.org/10.1016/j.ccst.2023.100165.
51. Zhao Z. Probing lithium carbonate formation in trace-O_2-assisted aprotic Li–CO_2 batteries using in situ surface-enhanced Raman spectroscopy / Z. Zhao, Y. Su, Z. Peng // The Journal of Physical Chemistry Letters. – 2019. – Vol. 10. – P. 5654-5660. https://doi.org/10.1021/acs.jpclett.8b03272.
52. Narayanan P. Effect of SO_2 on the CO_2 capture performance of self-supported branched poly(ethyleneimine) scaffolds / P. Narayanan, R.P. Lively, C.W. Jones // Energy & Fuels. – 2023. – Vol. 37, № 7. – P. 5257-5269. https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.2c03846.
53. Understanding the competition between carbonation and sulfation of Li_4SiO_4-based sorbents for high-temperature CO_2 capture / W. Yuan, et al // Carbon Capture Science & Technology. – 2022. – Vol. 3. – Art. 100046. https://doi.org/10.1016/j.ccst.2022.100046.
54. Synergistic effects of CO_2 mixing and CO_2 curing in CO_2 uptake capacity of Portland cement / N. Kim, et al // Construction and Building Materials. – 2024. – Vol. 448. – Art. 138217. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138217.
55. Porous extruded-spheronized Li_4SiO_4 pellets for cyclic CO_2 capture / Y. Hu et al // Fuel. – 2019. – Vol. 236. – P. 1043-1049. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.09.072.
56. Ahmadov R. Dual functional materials: at the interface of catalysis and separations / R. Ahmadov, S.S. Michtavy, M.D. Porosoff // Langmuir. – 2024. – Vol. 40, № 19. – P. 9833-9841. – https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.3c03888.
57. Evaluation of Na_2CO_3-doped MCM-48–Li_4SiO_4 adsorbent for CO_2 capture: performance and DFT mechanism / X. Wang et al // Separation and Purification Technology. – 2025. – Vol. 354. – Art. 129417. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.129417.

Благодарность

Исследование проведено в рамках выполнения проекта AP26195295 финансируемого Министерством науки и высшего образования РК.

Г.Е. Ергазиева[1,2*], І. Қуаныш[1,3]
[1]Жану проблемалары институты,
050012, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Бөгенбай батыр,172
[2]Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,
050040, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., әл-Фараби, 71
[3]Қазақстан-Британ техникалық университеті,
050000, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Төле би, 59
*e-mail:ergazieva_g@mail.ru

CO_2-НІ ЖОҒАРЫ ТЕМПЕРАТУРАДА ҰСТАУҒА АРНАЛҒАН СИЛИКАТТЫ СОРБЕНТТЕР: ҚАЗІРГІ ЖАҒДАЙЫ ЖӘНЕ ДАМУ БАҒЫТЫ

Сілтілік металдар негізіндегі силикатты сорбенттер өнеркәсіптік көздерден CO_2-ні жоғары температурада ұстауға арналған материалдар ретінде қызығушылық тудыруда. Бұл шолу 500-750°C температура аралығында CO_2-ны тікелей ұстауға арналған литий (Li_4SiO_4), натрий (Na_2SiO_3, Na_4SiO_4) және калий силикаттарын әзірлеу мен қолданудағы заманауи жетістіктерді жүйелейді.

Литий силикаттары ең жоғары сорбциялық сыйымдылықты көрсетеді (теориялық мәні – 367 мг CO_2/г, практикалық – 30-35 масс. %), олардың оңтайлы жұмыс температурасы 550-650 °C, ал регенерация температуралары кальцийлі аналогтармен салыстырғанда төмен (700-850 °C). Сорбция екі сатылы механизм бойынша жүреді: алдымен Li_2CO_3 және Li_2SiO_3 түзілуімен жүретін жылдам беттік реакция, кейін өнім қабаты арқылы иондардың тасымалдануымен шектелетін диффузиялық-бақыланатын саты.

Наноқұрылымдандыру және сілтілік карбонаттармен (K_2CO_3, Na_2CO_3) легирлеу диффузияны тиімді түрде жеделдетіп, сыйымдылықтың төмендеуінсіз 200 циклге дейінгі циклдік тұрақтылықты қамтамасыз етеді. Өтпелі металдармен (Ti, Ca) легирлеу және калиймен қоса легирлеу синтерленуді тежеп, тиімді сорбцияның температуралық ауқымын кеңейтеді.

Өндірістік қалдықтарды (ұшпа күл, металлургиялық шлактар, пайдаланылған аккумуляторлар) шикізат көздері ретінде қолдану өндіріс құнын 3-20 есеге дейін төмендетеді. Перспективалы бағыттарға бифункционалды сорбент-катализаторларды әзірлеу, құрамды оңтайландыру үшін есептеуіш дизайн мен машиналық оқытуды қолдану, технологияны нақты өнеркәсіптік жағдайларда көрсету, сондай-ақ жаңартылатын энергия көздерімен интеграциялау жатады. Қазіргі қиындықтар шешілген жағдайда, силикатты сорбенттер энергия сыйымды секторларды терең декарбонизациялаудың және көміртекті бейтараптыққа қол жеткізудің негізгі технологиясына айналуы мүмкін.

Түйін сөздер: *Li_4SiO_4, CO_2-ны жоғары температурада ұстау, сорбенттер, легирлеу, наноқұрылымдандыру, циклдік тұрақтылық, интеграцияланған ұстау және конверсия.*

Г.Е. Ергазиева[1,2]*, І. Қуаныш[1,3]
[1]Institute of Combustion Problems,
050012,Republic of Kazakhstan, Almaty, str. Bogenbay batyr, 172
[2]Al-Farabi Kazakh National University,
050040,Republic of Kazakhstan, Almaty, str. al-Farabi, 71
[3]Kazakh-British Technical University,
050000,Republic of Kazakhstan, Almaty, str. Tole bi, 59
*e-mail:ergazieva_g@mail.ru

SILICATE SORBENTS FOR HIGH-TEMPERATURE CO_2 CAPTURE: CURRENT STATE AND FUTURE PERSPECTIVES

Alkali metal-based silicate sorbents are attracting increasing attention as promising materials for high-temperature CO_2 capture from industrial sources. This review systematizes recent advances in the development and application of lithium (Li_4SiO_4), sodium (Na_2SiO_3, Na_4SiO_4), and potassium silicates for direct CO_2 capture at temperatures of 500-750 °C. Lithium silicates exhibit the highest sorption capacity (theoretical value of 367 mg CO_2 g^{-1} and practical values of 30-35 wt.%), with an optimal operating temperature range of 550-650 °C and lower regeneration temperatures (700-850 °C) compared to calcium-based analogues. Sorption proceeds via a two-step mechanism: a rapid surface reaction forming Li_2CO_3 and Li_2SiO_3, followed by a diffusion-controlled stage limited by ion transport through the product layer. Nanostructuring and doping with alkali carbonates (K_2CO_3, Na_2CO_3) effectively accelerate diffusion and improve cyclic stability to up to 200 cycles without capacity loss. Doping with transition metals (Ti, Ca) and co-doping with potassium suppress sintering and broaden the temperature window for efficient sorption. The use of industrial wastes (fly ash, metallurgical slags, spent batteries) as precursor sources reduces production costs by 3-20 times. Promising research directions include the development of bifunctional sorbent-catalysts, the application of computational design and machine learning for composition optimization, demonstration of the technology under real industrial conditions, and integration with renewable energy sources. If current challenges are addressed, silicate sorbents may become a key technology for deep decarbonization of energy-intensive sectors and for achieving carbon neutrality.

Key words: *Li_4SiO_4, high-temperature CO_2 capture, sorbents, doping, nanostructuring, cyclic stability, integrated capture and conversion.*

Сведения об авторах

Гаухар Ергазиевна Ергазиева* – к.х.н., профессор, Институт проблем горения, заведующий лабораторией каталитических процессов, Алматы, Казахстан; e-mail: ergazieva_g@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9464-5317.

Інжу Қуаныш – инженер, Институт проблем горения, PhD докторант, Казахстанско-Британский технический университет, Алматы, Казахстан; e-mail: inzhu.2017@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-1773-2405.

Авторлар туралы мәліметтер

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.

Інжу Қуаныш – инженер, Жану проблемалары институты, PhD докторант, Қазақстан-Британ техникалық университеті, Алматы, Қазақстан; e-mail: inzhu.2017@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-1773-2405.

Information about the authors

Gaukhar Yergaziyeva* – c.c.s., Professor, Institute of Combustion Problems, Head of the Catalytic Processes Laboratory, Almaty, Kazakhstan; e-mail: ergazieva_g@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9464-5317.

Inzhu Kuanysh – Engineer, Institute of Combustion Problems,PhD student, Kazakh-British Technical University Almaty, Kazakhstan; e-mail: inzhu.2017@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-1773-2405.

Поступила в редакцию 26.01.2026
Поступила после доработки 27.02.2026
Принята к публикации 02.03.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-81

МРНТИ: 31.15.01

Д.Р. Мулдаш*, А.Р Кажмуратов, Ж.Т. Кули, А.Ж. Байменов, С. Азат
Satbayev University,
050013, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22
*e-mail: muldashevdias@gmail.com

ВЛИЯНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ КРЕМНИЙСОДЕРЖАЩИХ ДОБАВОК НА СИНТЕЗ И СТРУКТУРУ MAX-ФАЗЫ

Аннотация: *В данной научной работе исследовано влияние наноразмерных добавок элементарного кремния (nSi) и диоксида кремния (SiO_2) на процессы твёрдофазного синтеза MAX-фазы Ti_3AlC_2. Синтез осуществляли из порошковых смесей состава 2Ti/TiC/Al с введением 1 и 3 мас.% кремнийсодержащих добавок. Подготовка шихты включала механоактивацию в планетарной шаровой мельнице в течение 24 часов, обеспечивающую повышение реакционной способности исходных компонентов, после чего проводили реакционное спекание при температуре 1400°C в атмосфере аргона. Методами рентгенофазового анализа и сканирующей электронной микроскопии установлено, что введение nSi и SiO_2 оказывает существенное влияние на фазовый состав, дефектность и морфологию синтезируемых материалов, а также на кинетику фазообразования. Показано, что добавка 1 мас.% nSi способствует формированию более однородной MAX-фазной структуры Ti_3AlC_2 и снижению доли остаточного TiC за счёт интенсификации диффузионных процессов. Введение SiO_2 приводит к формированию дефектной и пористой структуры с возможным участием оксидных компонентов, что может ограничивать полноту образования целевой фазы. Полученные результаты демонстрируют перспективность использования кремнийсодержащих добавок для направленного управления структурой и свойствами материалов на основе MAX-фаз в процессе низкотемпературного твёрдофазного синтеза и оптимизации их эксплуатационных характеристик.*

Ключевые слова: *MAX-фаза, Кремний, Рисовая шелуха, Диоксид кремния, MXene.*

1 ВВЕДЕНИЕ

MAX-фазы (соединения вида Mn+1AXn) представляют собой тройные слоистые соединения, обладающие уникальным сочетанием металлических и керамических свойств.

©Д.Р. Мулдаш, А.Р Кажмуратов, Ж.Т. Кули, А.Ж. Байменов, С. Азат, 2026

Среди множества MAX-фаз наибольший интерес с точки зрения физико-химических характеристик вызывают титановые фазы (например, Ti_3AlC_2 и Ti_3SiC_2), обладающие высокой твердостью, жаропрочностью и электропроводностью [1]. В последние годы интерес к MAX-фазам резко возрос после открытия двумерных материалов MXene. Классическим примером стало получение Ti_3C_2Tx путём селективного травления слоя Al из Ti_3AlC_2, в результате чего образуется новая 2D-структура с выдающимися фототермическими, электрохимическими и поверхностными свойствами [2]. Перспектива использования MAX-фаз как прекурсоров для получения функциональных наноматериалов требует изучения способов модификации их структуры и состава.

Существуют различные методы модификации MAX-фаз с введением добавок. Так, легирование слоя A другими элементами позволяет формировать новые твёрдые растворы. Например, замещение Al на Si в Ti_3AlC_2 приводит к образованию твёрдого раствора Ti_3AlC_2-$xSixC_2$ с повышенной твердостью и термостойкостью [3]. Введение в реакционную смесь оксидов кремния также существенно меняет фазовый состав. При спекании Ti_3AlC_2 с добавкой кремниевого монооксида (SiO) происходит диффузия Si в структуру и формируется фаза Ti_3SiC_2 (аналог Ti_3AlC_2 с заменой Al на Si) с выделением Al_2O_3 [4]. Недавние работы предложили использовать газообразный SiCl4: в реакциях с MAX-фазами это ведёт к одновременному внедрению Si и образованию аморфного нано-Si, что позволяет синтезировать Si-легированные MAX-фазы и даже Si-покрытые MXene-композиты за один технологический шаг [5].

Кремний заметно влияет на морфологию и дефектность MAX-фаз. Добавка Si и его оксидов может привести к формированию мелкозернистой структуры с кремнийсодержащими фазами (Ti_3SiC_2, SiC) и образованию вакансий в слое A. При последующем травлении таких модифицированных MAX-фаз на поверхности получаемых MXene обнаруживаются наночастицы аморфного кремния [5]. Кроме того, более мелкая (нанометрическая) структура MAX-фазы облегчает процесс эксфолиации: показано, что получение субмикронных частиц Ti_3AlC_2 существенно сокращает время химического травления и увеличивает выход двухмерных листов Ti_3C_2Tx. Таким образом, внедрение Si/SiO_2 в Ti_3AlC_2 может быть полезно для тонкой настройки микроструктуры и дефектности исходного материала при подготовке к синтезу MXene, однако необходимо контролировать образование побочных фаз и дефектов, влияющих на чистоту и свойства конечного материала [6].

2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Материалы исследования: В качестве прекурсора для синтеза аморфных наноразмерных частиц диоксида кремния были использованы отходы производства риса – рисовая шелуха из Кызылординской области. Обосновано это высоким содержанием SiO_2 – 11,5% и сравнительно превосходящей аналоги пористостью, а соответственно и удельной поверхностью (в среднем 627 m2/g). [8] Основные компоненты рисовой шелухи составляют: сырое волокно, целлюлоза, лигнин, пентозаны, белки, экстрактивные вещества, диоксид кремния (SiO_2), фосфор, магний, калий, кальций, сера, цинк, молибден, кобальт и бор.

Для создания MAX-фаз использовались следующие реактивы: порошки титана (Ti, 99,5%, <45 мкм), алюминия (Al, 99,9%, <50 мкм) и карбида титана (TiC, 99%, <2 мкм). Дополнительно применялись порошки кремния (Si, наноразмерный, 99,9%) и аморфного диоксида кремния (SiO_2, 99,8%) в количествах 1 и 3 % от общей массы смеси для спекания. Следующие реагенты и дополнительные вещества использовались для остальных химических реакций: гидроксид натрия (NaOH, чистый, ≥ 98%), соляная кислота (HCl, 37%), дистиллированная вода.

2.1 Получение диоксида кремния из рисовой шелухи

Для экстракции SiO2 из сырья рисовой шелухи применялся метод выщелачивания, при котором воздействие раствора гидроксида натрия (NaOH) приводит к растворению аморфного диоксида кремния и одновременной деполимеризации органической матрицы (лигнина и целлюлозы), что сопровождается образованием темноокрашенного раствора. Для эксперимента было использовано 45 г предварительно промытой и высушенной рисовой шелухи. Подготовка сырья соответствовала распространённым в литературе подходам по влажной щелочной экстракции, при которых исходная биомасса очищается от лёгкоудаляемых загрязнений и высушивается перед дальнейшей обработкой [9].

Для проведения выщелачивания был приготовлен 0.25 М раствор гидроксида натрия (NaOH) объёмом 0.75 л. Стехиометрические расчёты, выполненные при молярной массе 40 г·моль$^{-1}$, показали, что для получения такого раствора необходимо 7.50 г NaOH. Приготовленный раствор NaOH помещали в термостойкую реакционную ёмкость и нагревали на лабораторной плитке до температуры ~60 °C. После стабилизации температуры в раствор вводили взвесь рисовой шелухи. Смесь нагревали далее до 90 °C и выдерживали при этой температуре в течение 2 ч при постоянном перемешивании магнитной мешалкой со скоростью 250 об/мин. Для предотвращения тепловых потерь реакционная колба была обёрнута алюминиевой фольгой, что обеспечивало равномерное поддержание температуры во всём объёме. В процессе щелочной обработки происходят несколько взаимосвязанных химико-технологических процессов. Основным является растворение аморфного диоксида кремния, содержащегося в структуре шелухи, под действием NaOH с образованием растворимого силиката натрия [7]. Одновременно с этим происходит частичная деполимеризация и растворение органической матрицы – лигнина, целлюлозы и гемицеллюлозы. Эти процессы приводят к образованию тёмноокрашенного щелочного раствора, в состав которого входят растворённые органические фрагменты, низкомолекулярные продукты термохимического распада, а также ионные формы кремния в виде моно- и полисиликатов натрия. Таким образом, в ходе щелочной экстракции происходит перевод большей части неорганического кремнезёма из твёрдой фазы в растворимую форму Na_2SiO_3, что является ключевым этапом в процессе получения высокочистого диоксида кремния [9].

По завершении реакции смесь охлаждали до комнатной температуры, после чего проводили фильтрацию через фильтровальную бумагу с размером пор 0.45 мкм для отделения нерастворимого остатка и получения прозрачного раствора силиката натрия. Далее полученный раствор использовался для стадии кислотного осаждения SiO_2, обеспечивающего выделение аморфного кремнезема высокой чистоты. Раствор подвергали кислотной обработке (подкислению) до значения pH ~7.6. При понижении pH растворимые анионы силикатов протонируются и образуют молекулы кремниевой (IV) кислоты, которые при перенасыщении полимеризуют и коагулируют в виде коллоидного геля [9]. Данный гель затем охлаждали и подвергали последовательному промыванию для удаления растворённых солей, органических продуктов и мелкодисперсных коллоидных примесей. В работе гель промывали несколько раз и подвергали центрифугированию при 3000 об/мин в течение 5 минут до получения визуально более прозрачной/очищенной гелевой фазы. Повторные циклы промывок/центрифугирования служат для снижения уровня ионов Na^+/Cl^- (или аналогичных) и органических остатков, что критично для получения высокочистого аморфного SiO_2 после сушки/кальцинации. [10]

2.2 Магниетермическое восстановление кремния

Порошок магния, предварительно промытый для удаления поверхностно-адсорбированных загрязнений и хранившийся в инертных условиях, взвешивали на аналитических весах, затем каждый образец помещали в реакционный сосуд, содержащий 1,0 М раствор соляной кислоты. Кислота использовалась как минимум в двукратном стехиометрическом избытке относительно содержания магния для обеспечения полного расходования металлической фракции и устранения кинетических ограничений. Выделяющийся водород количественно собирали методом вытеснения воды. На основании этих данных была рассчитана эффективная чистота металлического магния путем сравнения экспериментально измеренного выхода водорода с теоретическим выходом водорода, полученным непосредственно из взвеси магния.

В ходе изучения методики восстановления было выяснено, что добавление инертной соли (NaCl) служит как «теплоотвод», рассеивающий тепловой пик реакций, препятствующий спеканию и чрезмерному локальному росту зерен Si, и позволяющий лучше сохранить исходную морфологию наноструктур [11]. Соль была добавлена и смешана с образцами Mg и SiO2.

Далее образцы были помещены в горизонтальную трубчатую печь, с применением медленного линейного разогрева (5°C·мин$^{-1}$), который снижает вероятность внезапной быстрой экзотермии и даёт управляемую передачу тепла сквозь соль к частицам SiO_2/Mg. Атмосфера – аргон (Минимизирует окисление NaCl и Si и препятствует образованию

оксидных/оксигидратных фаз в газовой фазе) [12]. Нагрев осуществляли линейно со скоростью 5 градусов цельсия в минуту до целевой температуры 680 градусов цельсия, затем выдержка при 680 °C – 2 часа; затем контролируемое охлаждение в печи в течение ≈3 часов до комнатной температуры.

После охлаждения реакционной загрузки первичная обработка включала удаление NaCl промывкой в дистиллированной воде при 40°C в течение ~1 ч. Растворимые продукты ($MgCl_2$) удаляются последующими промывками до достижения нейтрального pH; затем материал уплотняли центрифугированием (3000 RPM, 5 минут) и сушили при 80°C перед отправкой на СЭМ-анализ.

2.3 Синтез MAX-фазы, модифицированной кремнием и диоксидом кремния

Исходные порошки титана (Ti), алюминия (Al) и карбида титана (TiC) смешивали согласно расчётным составам при исходном молярном соотношении 2:1:1 соответственно, и подвергали механоактивации в планетарной шаровой мельнице в атмосфере аргона.

Для изучения влияния кремния на процессы формирования и стабилизации MAX-структуры в исходную смесь дополнительно вводили кремний в количествах 1 и 3 мас.% от общей массы всех порошков и аморфный диоксид кремния (SiO_2). Выбор добавок кремния в количестве 1 и 3 % обусловлен необходимостью целенаправленного воздействия на дефектную структуру и морфологию MAX-фазы Ti_3AlC_2 без нарушения её фазовой устойчивости. Низкая концентрация Si (1 %) рассматривается как мягкий модификатор, обеспечивающий изоморфное внедрение кремния в A-слой и/или на границы зёрен с формированием дополнительных дефектов и нанокристаллической структуры при сохранении целостности MAX-фазной матрицы. Повышение содержания Si до 3 % позволяет усилить структурное упорядочение и развитие слоистой морфологии, характерной для хорошо сформированных MAX-фаз, что является критически важным для последующего селективного травления и получения MXene. Добавление 3 % SiO_2 выбрано с целью оценки влияния кислородсодержащего источника кремния на микроструктуру и элементное распределение, а также моделирования условий частичного окисления, способствующих формированию пористой и дефектной структуры. Таким образом, выбранные концентрации Si и SiO_2 обеспечивают контролируемую модификацию MAX-фазы и позволяют установить взаимосвязь между составом, дефектностью и морфологией материала.

Использование двух различных форм кремния позволяло проследить роль как элементарного Si с высокой реакционной способностью, так и аморфного SiO_2, характеризующегося возможностью восстановления и взаимодействия в условиях высокотемпературного синтеза. Все исходные порошки подвергались предварительному смешиванию в планетарной мельнице при 300 об/мин в течение 24 ч в среде аргона с целью обеспечения равномерного распределения компонентов и увеличения реакционной поверхности. Температурный режим синтеза составлял 1380 °C при скорости нагрева 5оС/мин выдержке 2 ч с последующим естественным охлаждением в инертной среде. Введение наноразмерного кремния обеспечивало его возможное внедрение в структуру MAX-фазы за счет частичной замены атомов алюминия и/или взаимодействия с TiC с образованием переходных соединений, что способствует образованию упорядоченной многослойной структуры Ti_3AlC_2(Si).

3 РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

3.1 Рентгенофазовый анализ

Рентгенофазовый анализ образцов (рис. 1) показал наличие чётких пиков, соответствующих MAX-фазе Ti_3AlC_2. На дифрактограммах для образцов с 1 % Si, 3 % Si и 3 % SiO_2 наблюдаются характерные рефлексы при 2θ ≈ 35,98°, 39,0-39,4°, 41,78-41,88° и 60,53-60,68°, которые соответствуют плоскостям (002), (101), (104) и (110) кристаллической решётки Ti_3AlC_2. Межплоскостные расстояния составляют 2,49 Å, 2,30-2,28 Å, 2,16 Å и 1,53 Å соответственно. Для всех образцов не наблюдается выраженных пиков оксидных фаз или свободного кремния, что указывает на их диспергированное состояние или изоморфное замещение. Однако при увеличении содержания добавки отмечается умеренное уширение пиков и снижение их интенсивности, что связано с ростом плотности дефектов решётки и формированием нанокристаллической структуры. Расчёты по формуле Шеррера показали средний размер кристаллитов 40-50 нм с разбросом от 12 до 65 нм, что свидетельствует о наноструктурированном состоянии материала.

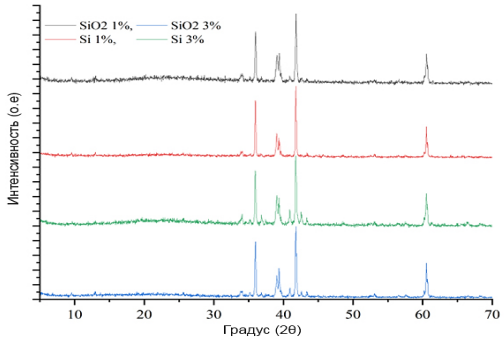


Рисунок 1 – Дифрактограмма полученных MAX-фаз после модификации

Что касается восстановленного кремния, в результате рентгенофазового анализа (рис. 2) образцов после спекания при температуре 680°C получена дифрактограмма с хорошо выраженными пиками, указывающими на образование кристаллических фаз, характерных для продуктов магниетермического восстановления диоксида кремния. Основной интенсивный рефлекс зафиксирован при 2θ ≈ 28,55°, что соответствует отражению от плоскости (111) элементарного кремния. Дополнительные пики в областях 47,39° и 56,33° подтверждают наличие кристаллического кремния с рефлексами от плоскостей (220) и (311), что указывает на успешное восстановление SiO_2 с образованием Si в поликристаллической форме.

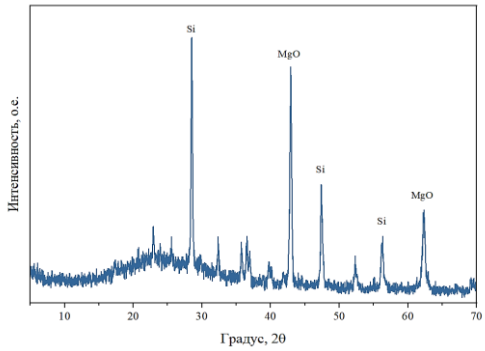


Рисунок 2 – XRD-шаблоны Si после восстановления SiO2 магнием

На дифрактограмме также присутствуют интенсивные пики в областях 42,95° и 62,38°, соответствующие кристаллической фазе MgO. Это полностью согласуется с реакцией восстановления SiO_2 магнием, в ходе которой образуется MgO как основной побочный продукт. Присутствие MgO после спекания объясняется тем, что при данных условиях он не вступает в дальнейшие реакции и может быть удалён на стадии кислотного травления.

3.2 Результаты сканирующей электронной микроскопии с элементным анализом (СЭМ-ЭДС)

На рисунке 3 показано СЭМ-изображение нано-SiO_2 при увеличении ×5 000 (масштаб 5 μm). На изображении видна рыхлая структура наноразмерного диоксида кремния, полученного из рисовой шелухи. Частицы имеют неправильную форму и объединяются в агрегаты различной величины, что типично для аморфного SiO_2, образующегося после выгорания органической матрицы биомассы.

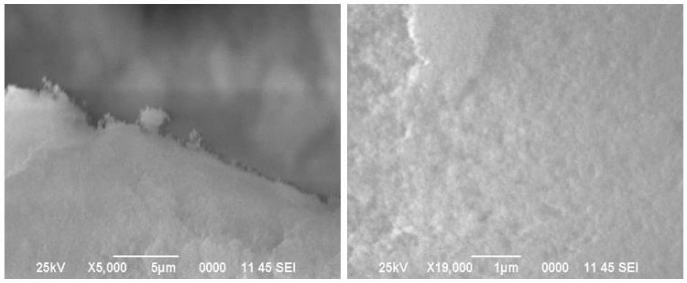


Рисунок 3 – СЭМ-изображения SiO2 полученного из рисовой шелухи

Поверхность выглядит губчатой, с выраженными микропорами и участками с более плотной упаковкой частиц. При более высоком увеличении можно наблюдать наноструктурированные агрегаты частиц с размером порядка 30-80 нм. Морфологические исследования методом сканирующей электронной микроскопии подтверждают, что полученный из рисовой шелухи диоксид кремния имеет наноразмерную структуру.

На СЭМ-изображениях восстановленного кремния (рис. 4) (увеличения ×200, ×750 и ×1000) показана морфология порошка кремния, полученного восстановлением наноразмерного диоксида кремния (SiO_2) магнием. Полученный материал имеет рыхлую, пористую структуру, состоящую из агрегированных частиц различной величины. При низком увеличении (×200) видно, что частицы формируют крупные конгломераты неправильной формы размером от нескольких десятков до сотен микрометров. Это связано с частичной агломерацией в процессе восстановления и последующего удаления MgO. На более детальном изображении наблюдается неровная зернистая поверхность, состоящая из частиц размером порядка 1-5 мкм. Такая морфология типична для продуктов магниетермического восстановления SiO_2, при котором выделяющийся кремний образует пористую структуру вследствие интенсивного газовыделения и роста кристаллитов на месте исходного оксида. При дальнейшем увеличении видна мелкие сферические зерна кремния, равномерно распределённые по поверхности. Наличие значительной пористости и шероховатости указывает на эффективное восстановление и частичное сохранение наноструктурной организации исходного SiO_2.

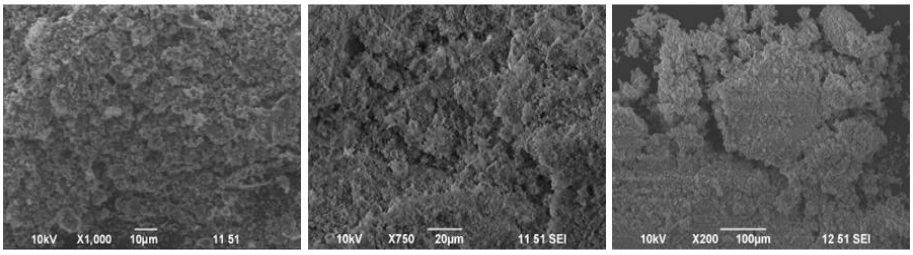


Рисунок 4 – СЭМ-изображения Si после восстановления SiO2 магнием

Микроструктурные исследования методом сканирующей электронной микроскопии в сочетании с энергодисперсионным анализом (СЭМ-ЭДС) позволили оценить распределение элементов в образце с добавлением 1% кремния. На электронно-микроскопическом изображении (рис. 5) наблюдается развитая рыхлая пористая поверхность с неравномерным рельефом, что указывает на формирование мелкодисперсной структуры при синтезе. Элементные карты распределения Ti, Al и C демонстрируют равномерное распределение данных элементов по всей поверхности, что свидетельствует об однородности сформировавшейся MAX-фазной матрицы. На карте Ti-K отчётливо видно интенсивное и сплошное распределение титана, подтверждающее, что основная структура представлена Ti-матрицей, характерной для MAX-фазы Ti_3AlC_2. Аналогично, сигналы Al-K и C-K распределены равномерно, без локализованных областей обогащения, что указывает на сохранение целостности A-слоя и углеродной подрешётки.

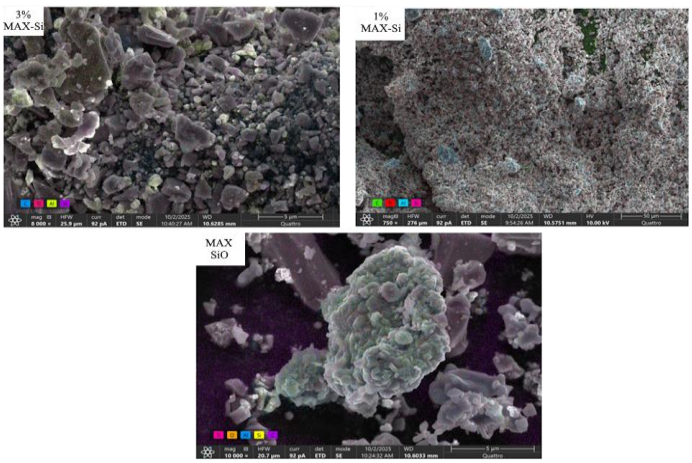


Рисунок 5 – СЭМ-ЭДС изображения модифицированных MAX-фаз

Особый интерес представляет распределение кремния. На Si-K карте зафиксирован слабый, но равномерно распределённый сигнал, что свидетельствует о диспергированном внедрении Si в структуру материала без образования выраженных вторичных фаз или агломератов. Такой тип распределения характерен для частичного изоморфного замещения алюминия в A-слое и/или формирования тонких оксидных включений на границах зёрен. Пористая структура поверхности и равномерность распределения элементов хорошо согласуются с рентгенофазовым анализом, где были зафиксированы основные пики Ti_3AlC_2 с увеличенной шириной и сниженной интенсивностью по сравнению с исходным образцом, что указывает на нанокристаллическое состояние материала (размер кристаллитов 40-50 нм) и повышенную дефектность решётки при повышенном содержании Si.

Для 3% Si показал, что полученный материал характеризуется развитой текстурой с хорошо выраженными кристаллитами слоистой морфологии, типичной для MAX-фаз на основе Ti_3AlC_2. На изображении при увеличении ×8000 наблюдаются пластинчатые и фрагментированные частицы с чётко выраженными гранями и неравномерным рельефом. Такая морфология характерна для хорошо сформированных MAX-фаз и указывает на наличие слоистых структур, что в дальнейшем благоприятно сказывается на травлении и получении MXene. Распределение элементов показывает чёткое совпадение зон Ti-K, Al-K и C-K сигналов, что свидетельствует об однородном распределении основных элементов матрицы и сохранении целостности кристаллической структуры Ti_3AlC_2. Титан и алюминий распределены равномерно по всей площади, что подтверждает отсутствие выраженных областей фазового разделения.

Для SiO2 выявлено чётко выраженные морфологические и элементные особенности, подтверждающие равномерное внедрение кремния в структуру MAX-фазы. Зафиксировано устойчивое распределение титана, отражающее формирование основной Ti-матрицы MAX-фазы Ti_3AlC_2. Карта Al-K демонстрирует плотное и равномерное распределение алюминия, а карта C-K подтверждает его присутствие в структуре карбида и на поверхности частиц.

Таблица 1 – Количественное содержание кремний модифицированных MAX-фаз

Образец	Элемент	Атм. %	Масс. %	Интенс. ед.	Атм. % ошиб.	Масс. % ошиб.
MAX-Si-1%	C	16.5	5.2	14 502	0.2	0.1
	Al	15.1	10.6	37 720	0.1	0.1
	Si	1.3	0.9	3 001	0.1	0.1
	Ti	67.1	83.3	63 323	0.4	0.5
MAX-Si-3%	C	33.3	12.1	22 738	0.3	0.1
	Al	11.2	9.1	21 208	0.1	0.1
	Si	2.3	2	4 196	0.1	0.1
	Ti	53.2	76.8	37 722	0.4	0.6
MAX-SiO2-3%	C	30.4	16.1	44 717	0.2	0.1
	O	36.7	25.8	26 446	0.7	0.5
	Al	11.2	13.2	47 556	0.1	0.1
	Si	1	1.3	4 082	0	0.1
	Ti	20.7	43.6	31 486	0.2	0.4

СЭМ и СЭМ-ЭДС исследования показали, что восстановленный кремний имеет высокопористую, иерархически организованную структуру, типичную для эффективного восстановления нано-SiO_2 с частичным сохранением исходной наноструктуры. Для модифицированных MAX-фаз Ti_3AlC_2 с 1-3 % Si/SiO_2 установлено равномерное распределение Ti, Al, C и Si без образования вторичных фаз, что указывает на изоморфное внедрение кремния и формирование дефектной, нанокристаллической структуры. При повышении содержания Si наблюдается более выраженная слоистая морфология и кристалличность MAX-фазы, потенциально благоприятная для последующего получения MXene.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследовано влияние элементарного кремния и диоксида кремния на формирование структуры и микроморфологии MAX-фазы Ti_3AlC_2. Предложен и реализован подход к модификации MAX-фаз путём введения малых количеств Si и SiO_2 (1-3 мас.%) на

стадии синтеза, направленный на управление дефектностью и структурным состоянием материала без нарушения его фазовой устойчивости. Показано, что диоксид кремния, полученный из рисовой шелухи методом щелочной экстракции и последующего кислотного осаждения, представляет собой аморфный наноразмерный материал с высокой пористостью. Магниетермическое восстановление SiO_2 в присутствии NaCl и в атмосфере аргона приводит к образованию пористого кристаллического кремния, что подтверждено данными рентгенофазового анализа и СЭМ.

В целом показано, что введение кремния и диоксида кремния в малых концентрациях является эффективным инструментом контролируемой модификации MAX-фазы Ti_3AlC_2, позволяющим управлять её дефектностью, морфологией и наноструктурным состоянием. Полученные результаты создают экспериментальную основу для дальнейшего селективного травления модифицированных MAX-фаз и получения MXene с улучшенными структурными и функциональными характеристиками.

Список литературы

1. Smetkin A.A. Svojstva materialov na osnove MAX-faz (obzor) / A.A. Smetkin, YU.K. Majorova // Vestnik PNIPU. Mashinostroenie, materialovedenie. – 2015. – № 4. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/svoystva-materialov-na-osnove-mah-faz-obzor (data obrashcheniya: 26.12.2025). (In Russian).
2. Sposoby sinteza MXenes iz MAX-faz: sravnitel'nyj obzor metodov travleniya i ih primeneniya / M. Әlipұly i dr. // Gorenie i plazmohimiya. – 2025. – T. 23, № 3. – S. 253-271. https://doi.org/10.18321/cpc23(3)253-271.3. Phase stability, elastic, electronic, thermal and optical properties of $Ti_3Al_1{-}xSi_xC_2$ ($0 \le x \le 1$): First principle study / M.S. Ali et al // Physica B: Condensed Matter. – 2012. – Vol. 407, № 21. – P. 4221-4228. https://doi.org/10.1016/j.physb.2012.07.007. (In Russian).
4. Formation mechanisms of $Ti_3(Si,Al)C_2/Al_2O_3$ composites from Ti_3AlC_2 and SiO via low-temperature sintering / Z. Zhang et al // Journal of Advanced Ceramics. – 2022. – Vol. 12. – P. 93-110. https://doi.org/10.26599/JAC.2023.9220669.
5. Si-substituted MAX phases and in-situ formation of Si-coated MXene composites via chlorosilane etching / X. Wang et al // arXiv. – 2025. – arXiv:2509.11380. https://doi.org/10.48550/arXiv.2509.11380.
6. The synthesis of high purity Ti_3AlC_2 MAX phase via molten salt method / L. Feng et al // Advanced Powder Technology. – 2023. – Vol. 34, № 1. – Art. 103920. https://doi.org/10.1016/j.apt.2022.103920.
7. Thermochemistry and kinetics of silica dissolution in NaOH solutions: Effect of the alkali concentration / M. Fertani-Gmati et al // Thermochimica Acta. – 2014. – Vol. 594. – P. 58-67. https://doi.org/10.1016/j.tca.2014.09.003.
8. Sustainable production of pure silica from rice husk waste in Kazakhstan / S. Azat et al // Journal of Cleaner Production. – 2019. – Vol. 217. – P. 352-359. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.142.
9. Sustainable biowaste-derived carbon aerogel/MXene composite for mercury removal from water / A. Nursharip et al // Materials Today Sustainability. – 2025. – Vol. 31. – Art. 101132. https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2025.101132.
10. Silica extraction from rice husk: Comprehensive review and applications / P.U. Nzereogu et al // Hybrid Advances. – 2023. – Vol. 4. – Art. 100111. https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2023.100111.
11. Efficient fabrication of nanoporous Si and Si/Ge enabled by a heat scavenger in magnesiothermic reactions / W. Luo et al // Scientific Reports. – 2013. – Vol. 3. – Art. 2222. https://doi.org/10.1038/srep02222.
12. Entwistle J. A review of magnesiothermic reduction of silica to porous silicon for lithium-ion battery applications and beyond / J. Entwistle, A. Rennie, S. Patwardhan // Journal of Materials Chemistry A. – 2018. – Vol. 6, № 38. – P. 18344-18356. https://doi.org/10.1039/C8TA06370B.

Благодарность: *Данное исследование финансировалось Комитетом науки, Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № BR24992873).*

Д.Р. Мулдаш*, А.Р. Кажмуратов, Ж.Т. Құли, А.Ж. Байменов, С. Азат
Satbayev University,
050013, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Сәтбаев көш., 22
*e-mail: muldashevdias@gmail.com

НАНОӨЛШЕМДІ КРЕМНИЙ БАР ҚОСПАЛАРДЫҢ MAX ФАЗАСЫНЫҢ СИНТЕЗІ МЕН ҚҰРЫЛЫМЫНА ӘСЕРІ

Бұл ғылыми жұмыста наноөлшемді элементтік кремний (nSi) мен кремний диоксиді (SiO_2) қоспаларының Ti_3AlC_2 MAX-фазасының қаттыфазалық синтез процестеріне әсері зерттелді. Синтез 2Ti/TiC/Al құрамындағы ұнтақ қоспаларынан 1 және 3 масс.% кремнийқұрамды қоспалар енгізу арқылы жүргізілді. Шихтаны дайындау бастапқы компоненттердің реакциялық қабілетін арттыратын 24 сағат бойы планетарлық шарлы диірменде механоактивациялауды қамтыды, содан кейін аргон атмосферасында 1400°C температурада реакциялық күйдіру жүргізілді. Рентгенфазалық талдау және сканерлеуші электрондық микроскопия әдістері nSi және SiO_2 енгізілуі синтезделген материалдардың фазалық құрамына, ақаулылық дәрежесіне, морфологиясына, сондай-ақ фазатүзілу кинетикасына айтарлықтай әсер ететінін көрсетті. 1 масс.% nSi қоспасының диффузиялық процестерді күшейту арқылы Ti_3AlC_2 MAX-фазасының неғұрлым біртекті құрылымын қалыптастыруға және қалдық TiC мөлшерін азайтуға ықпал ететіні анықталды. SiO_2 енгізу оксидтік компоненттердің ықтимал қатысуымен ақаулы және кеуекті құрылымның түзілуіне әкеледі, бұл мақсатты фазаның толық қалыптасуын шектеуі мүмкін. Алынған нәтижелер төмен температуралы қаттыфазалық синтез барысында MAX-фаза негізіндегі материалдардың құрылымы мен қасиеттерін бағытталған түрде басқару және олардың пайдалану сипаттамаларын оңтайландыру үшін кремнийқұрамды қоспаларды қолданудың перспективалы екенін көрсетеді.

Түйін сөздер: *MAX-фаза, кремний, күріш қауызы, кремний диоксиді, MXene.*

D.R. Muldash*, A.R. Kazhmuratov, Zh.T. Quly, A.Zh. Baimenov, S. Azat
Satbayev University,
050013, Republic of Kazakhstan, Almaty, Satpayev St., 22
*e-mail: muldashevdias@gmail.com

EFFECT OF NANOSIZED SILICON-CONTAINING ADDITIVES ON THE SYNTHESIS AND STRUCTURE OF MAX PHASE

This study investigates the effect of nanoscale additives of elemental silicon (nSi) and silicon dioxide (SiO_2) on the solid-state synthesis of the MAX phase Ti_3AlC_2. The synthesis was carried out using powder mixtures with a composition of 2Ti/TiC/Al containing 1 and 3 wt.% silicon-containing additives. Powder preparation included mechanical activation in a planetary ball mill for 24 hours, which enhanced the reactivity of the initial components, followed by reactive sintering at 1400°C in an argon atmosphere. X-ray diffraction and scanning electron microscopy revealed that the addition of nSi and SiO_2 has a significant effect on the phase composition, defect structure, and morphology of the synthesized materials, as well as on the kinetics of phase formation. It was shown that the addition of 1 wt.% nSi promotes the formation of a more homogeneous MAX-phase Ti_3AlC_2 structure and reduces the amount of residual TiC due to intensified diffusion processes. The introduction of SiO_2 leads to the formation of a defective and porous structure with possible involvement of oxide components, which may limit the completeness of target phase formation. The obtained results demonstrate the prospects of using silicon-containing additives for targeted control of the structure and properties of MAX-phase-based materials during low-temperature solid-state synthesis and optimization of their performance characteristics.

Key words: *MAX phase, silicon, rice husk, silicon dioxide, MXene.*

Авторлар туралы мәліметтер

Диас Рустемұлы Мулдаш* – Сәтбаев Университеті, Инженерлік бейінді зертханасының ғылыми қызметкері; e-mail: muldashevdias@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-2883-261X.

Айдын Рустемович Қажмуратов – Сәтбаев Университеті, Инженерлік бейінді зертханасының ғылыми қызметкері; e-mail: kazak4458@gmail.com.

Жансерік Тілеубердіұлы Құли – Сәтбаев Университеті, Инженерлік бейінді зертханасының ғылыми қызметкері; e-mail: kuliev.zhanserik@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-5726-7899.

Альжан Жулдасович Байменов – PhD, доцент, Сәтбаев Университеті, Инженерлік бейінді зертханасының аға ғылыми қызметкері; e-mail: a.baimenov@sci.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6509-2087.

Сейтхан Азат – PhD, профессор, Сәтбаев Университеті, Инженерлік бейінді зертханасының жетекшісі; e-mail: seytkhan.azat@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3858-9477.

Сведения об авторах

Диас Рустемулы Мулдаш* – Сатбаев Университет, научный сотрудник лаборатории инженерного профиля; e-mail: muldashevdias@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-2883-261X.

Айдын Рустемович Кажмуратов – Сатбаев Университет, научный сотрудник лаборатории инженерного профиля; e-mail: kazak4458@gmail.com.

Жансерик Тылеубердыулы Кули – Сатбаев Университет, научный сотрудник лаборатории инженерного профиля; e-mail: kuliev.zhanserik@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-5726-7899.

Альжан Жулдасович Байменов – PhD, Ассоциированный профессор, Сатбаев Университет, старший научный сотрудник лаборатории инженерного профиля; e-mail: a.baimenov@sci.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6509-2087.

Сейтхан Азат – PhD, профессор, Сатбаев Университет, руководитель лаборатории инженерного профиля; e-mail: seytkhan.azat@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3858-9477.

Information about the authors

Dias Rustemuly Muldash* – Satbayev University, Researcher, Engineering Profile Laboratory; e-mail: muldashevdias@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-2883-261X

Aydyn Rustemovich Kazhmuratov – Satbayev University, Researcher, Engineering Profile Laboratory; e-mail: kazak4458@gmail.com

Zhanserik Tileuberdiuly Kuli – Satbayev University, Researcher, Engineering Profile Laboratory; e-mail: kuliev.zhanserik@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-5726-7899.

Alzhan Zhuldasovich Baimenov – PhD, Associate Professor, Satbayev University, Senior Researcher, Engineering Profile Laboratory; e-mail: a.baimenov@sci.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6509-2087.

Seytkhan Azat – Satbayev University, Head of the Engineering Laboratory; e-mail: seytkhan.azat@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3858-9477.

Поступила в редакцию 05.01.2026
Поступила после доработки 05.03.2026
Принята к публикации 06.03.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-82

МРНТИ: 61.63.31

CC BY 4.0
Check for updates

А.О. Оразымбетова[1], Г.Ф. Сагитова[1]*, А.С. Сидиков[2], С.А. Сакибаева[1], А.Ж. Суйгенбаева[1]

[1]М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті,
160012, Казақстан Республикасы, Шымкент қ., Тауке хан даңғылы, 5
[2]И.М. Губкин. атындағы Ресей мемлекеттік мұнай және газ университетінің филиалы,
Өзбекстан Республикасы,Ташкент қ., Дурмон йули көшесі, 34
*e-mail: guzalita.f1978@mail.ru

ШАНҚАНАЙ КЕН ОРНЫ ЦЕОЛИТТЕРІН РЕЗИНА ӨНДІРІСІНДЕ ҚОЛДАНУ

Аннотация: *Бұл мақалада Шанқанай кен орнының табиғи және белсендірілген цеолиттерін резина қоспаларының толықтырғышы ретінде жүргізілген зерттеу нәтижелері ұсынылған. Минералды қоспалардың эластомерлердің қасиеттеріне әсерін талдауға бағытталған кең ауқымды ғылыми зерттеулердің нәтижелері зерттеудің осы саласының жоғары әлеуеті мен болашақта даму мүмкіндіктерін растайды. Стандартты жағдайда резина матрицасына минералды қоспаларды енгізу іс-жүзінде қолдану сипаттамаларын жақсартуға жағдай жасайды, яғни материалдың құнын төмендетуге, оның серпімділік және беріктік қасиеттерін жақсартуға және технологиялық қасиеттерін оңтайландыруға мүмкіндік береді. Бұл жұмыстың мақсаты – резина қоспаларының барлық қажетті қасиеттерін сақтай отырып, қымбат толықтырғыштарды қол жетімді баламалармен алмастыру. Беріктік, серпімділік, ескіруге төзімділік және басқа да маңызды көрсеткіштерін сақтай отырып алмастырғыштарды енгізу басты басымдық болып табылады, бұл өнім сапасын жоғалтпай шығындарды азайтуға мүмкіндік береді. Сондықтан, ұсынылған*

©А.О. Оразымбетова, Г.Ф. Сагитова, А.С. Сидиков, С.А. Сакибаева, А.Ж. Суйгенбаева, 2026

ингредиенттер дайын өнімнің стандартқа сәйкестігі мен қолдану талаптарын орындауы үшін ұқсас немесе жақсартылған қасиеттерді қамтамасыз етуі қажет. Бұл зерттеудің нысандары – Шанқанай кен орнынан алынған цеолиттер және диэлектрлік төсеніштерді өндіру үшін қолданылатын резиналар, олар жоғары электр оқшаулағыш қасиетке мен механикалық беріктікке ие болуы қажет.

Ұнтақталған цеолиттік үлгілердің элементтік құрамын анықтау үшін энергия дисперсиялық спектроскопия қолданылды. Бұл ақпарат өте маңызды, себебі ол бізге цеолиттердің резина өндірісінде толықтырғыш ретіндегі тиімділігін бағалауға мүмкіндік береді.

Эксперименттік зерттеу нәтижесі, ақ күйені (40 масс.б.) Шанқанай кен орнының табиғи және белсендірілген цеолитімен ішінара алмастыру арқылы алынған вулканизаттардың қанағаттанарлықтай физика-механикалық қасиеттерге ие екенін көрсетті. Бұл резина өндірісінде табиғи және белсендірілген цеолиттерді пайдаланудың жаңа мүмкіндіктерін ашады, яғни шығындарды азайтуға және вулканизат сапасын жақсартуға ықпал етеді.

Түйін сөздер: *толықтырғыш, табиғи цеолит, белсендірілген цеолит, ақ күйе, резина қоспасы, шартты беріктік, салыстырмалы ұзаруы.*

1 Кіріспе

Соңғы жылдары әртүрлі металдардың алюмосиликаттарымен үйлескен кремний диоксиді бар минералды толықтырғыштарды (бентониттер, волластониттер, цеолиттер) резина құрамында қолдануға қызығушылық айтарлықтай өсті [1].

Цеолиттердің ерекше қасиеттеріне байланысты олардың қолдану аясы өте кең. Толықтырғыштар резиналардың химиялық, технологиялық, физика-механикалық және экономикалық көрсеткіштерінің кешеніне тиімді әсер етуге мүмкіндік беретін резина қоспалары рецептінің маңызды компоненттерінің бірі болып табылады. Толықтырғыштардың бұл қатарында цеолит ерекше орын алады [2, 3].

Цеолиттер – SiO^4 және AlO^4 иондарынан тұратын тетраэдрлік кристалдық тормен ұсынылған ерекше құрылыммен сипатталатын микрокеуекті, табиғи немесе синтетикалық алюмосиликатты материалдар. Аталған минералдың құрамындағы кремний оксидінің көп мөлшерде болуы химиялық белсенділігін арттырады және олардың бірегей кеуекті қасиеттерінің арқасында әр түрлі салаларда қолданылады [4-6]. Ол сондай-ақ жоғары беттік белсенділікпен және қосымша байланыстарды қалыптастыру қабілетімен ерекшеленеді, бұл цеолиттің полифункционалды әрекеті резина ингредиенттері үшін тиімді әрі перспективалы болып табылады. Авторлар [7,8] Шанқанай кен орны цеолитін резина қоспасына толықтырғыш ретінде қолданып, нәтижелі көрсеткіштерін қарастырған.

Қазіргі уақытта резина қоспаларының кейбір дәстүрлі ингредиенттерін, мысалы, ақ күйені, цеолит сияқты қолжетімді және уыттылығы аз минералды толықтырғыштармен алмастыруды зерттеу маңызды [9]. Себебі қазіргі таңда резина өнеркәсібі күрделі техника – экономикалық қиындықтарға тап болып отыр, оларға өнім сапасын арттыру, шикізатты үнемдеу және еңбек жағдайларын жақсарту қажет [7].

Авторлардың [10-13] еңбектерінде цеолиттердің құрылымы мен құрамы, сондай-ақ олардың қолданылуы кеңінен қарастырылған.

«Бейорганикалық және мұнайхимия өндірістерінің технологиясы» кафедрасы цеолитті резина өнеркәсібінде толықтырғыш ретінде пайдалану бойынша көптеген зерттеулер жүргізген [9, 14, 15]. Зерттеудің мақсаты осы табиғи минералды әртүрлі өндірістік процестерде жиі қолданылатын дәстүрлі ұнтақ толықтырғыштар мен модификаторлардың орнына пайдаланудың мүмкіндігін анықтау болатын. Орындалған жұмыстардың қарқынды әрекеті өнімдердің функционалдық сипаттамаларын жақсартумен қатар, өндіріс шығындарын азайтуға бағытталады, сонымен қатар осы саладағы ғылыми дамуды қамтамасыз етеді.

Еңбек жағдайларын және өндірістің экологиялық тазалығын жақсартудың, атап айтқанда, өндірістік жағдайда шаңдануды азайтудың балама жолдарының бірі – Қазақстан Республикасының Шанқанай кен орындарынан алынған цеолитті пайдалану [7].

2. Эксперименттік бөлім

Зерттеу нысаны:

- табиғи цеолит (Шанқанай кен орны, Кербұлақ ауданы, Алматы облысы);
- белсендірілген цеолит (тұз қышқылымен өңделген, күйдірілген);
- диэлектрлік төсеніштер дайындауға арналған резина қоспасы «Эко-Шина» ЖШС.

Тәжірибелік ыдыстар мен қондырғылар: конустық колбалар 250 мл, шыны таяқша, сүзгі қағаздары, өлшеуіш колбалар, аналитикалық таразы, муфель пеші, електер (саңылаулары 0,07-0,08;), су моншасы.

Шанканай кен орнының цеолитін тазарту келесі әдістеме бойынша жүргізілді: 3 литрлік стакандарға салынған 1,25 мм (0,5 кг) цеолитке 2 литр дистилденген су бірнеше рет құйылып, шыны таяқшамен араластыру арқылы тазартылған цеолит сүзгі қағаз арқылы өткізілді (жуу ұзақтығы 1-2 күн).

Цеолиттерді термиялық және химиялық өңдеу олардың қасиеттерін мақсатты түрде өзгертуге мүмкіндік береді [4].

Цеолитті термиялық өңдеу дайындалған үлгілерді (жуылған және кептірілген цеолит) 100°С температурада күйдіру арқылы 400/410 муфель пешінде жүргізілді (Naberthem, Carl Stuart Group), бөлшектердің мөлшері 1,0-1,4 мм болатын цеолит үлгілері 100 г мөлшерінде ыстыққа төзімді дөңгелек түпті фарфор ыдыста муфель пешіне орналастырылды, статикалық жағдайда 100°С температурада 1 сағат бойы термиялық өңдеуден өтті, содан кейін термиялық өңделген цеолиттер толық салқындағанша $CaCl_2$ бар эксикаторларға орналастырылды [4].

Термиялық өңдеуден кейін цеолиттердің кеуектерінің ішін қоспалардан тазартып, арналарын кеңейту мақсатында 1,0 н тұз қышқылының ерітіндісімен өңдедік, процесс 1-1,5 сағат, 80-90^{0}С су моншасында жүзеге асырылды.

Өңделген цеолиттерді тазартып сүзу процесі сүзгі қағазында дистилденген сумен бірнеше рет шаю хлор атомынан тазарғанша жүргізілді (күміс нитратының ерітіндісі арқылы Cl^- атомынан тазаруын анықтадық), алдымен бөлме температурасында, содан соң 95^{0}С термошкафта кептірілді [4, 16-18].

Бұл жұмыстың мақсаты табиғи цеолитті термиялық және химиялық өңдеу арқылы полифункционалды әрекеттегі резина қоспасына арналған толықтырғыштар алу болып табылады.

Толықтырғыштар ретінде табиғи цеолит пен белсендірілген цеолит қолданылады. Термиялық және тұз қышқылымен өңделген цеолитті белсендірілген цеолит ретінде қарастырамыз.

Жұмыста зерттелетін үлгілердің физика-химиялық қасиетттерін анықтау үшін келесі құрылғылар қолданылды: Piketechnologies фирмасы, ShimadzuIRPrestige-21 сканерлейтін электронды микроскопия (Quanta 200i 3D, FEI Company, АҚШ) [4].

Табиғи, белсендірілген цеолиттерді толықтырғыш ретінде сынау үшін диэлектрлік төсеніштер жасауға арналған эталондық резина қоспалары қолданылды.

Диэлектрлік төсеніштер жасауға арналған қондырғылар: СМ 320 160/160 типті біліктеу машинасы, RDE 800х800 вулкандау пресі.

Зерттелетін резинаның параметрлік көрсеткіштері мен физика- механика-лық қасиеттері МЕСТ 270-84 бойынша анықталды:

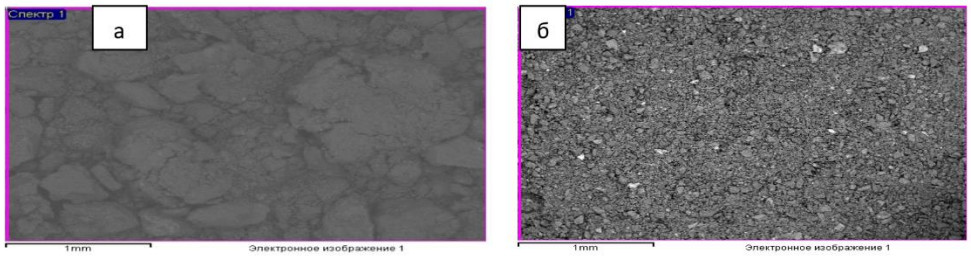
– Үлгілердің серпімді беріктік сипаттамалары МЕСТ 4997 бойынша РМИ – 60 үзу машинасында анықталды.

– Шор А бойынша қаттылығы (МЕСТ 4997).

3. Нәтижелер және талқылау

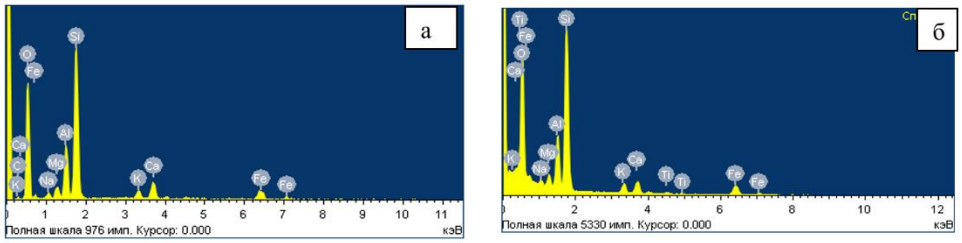
Цеолиттің физика-химиялық қасиеттерін зерттеу

Цеолиттер бетінің көрінісі сканерлеуші электронды микроскоп (СЭМ) арқылы алынды. СЭМ – талдау нәтижелеріне сәйкес, цеолиттер бетінде айтарлықтай өзгерістер байқалады (1 сурет), яғни табиғи цеолит пен белсендірілген цеолит (термиялық және химиялық өңделген цеолит) бетінің морфологиясы да өзгеріске ұшырағаны 1 суретте келтірілген.



Сурет 1 – Цеолиттердің микрофотографиясы:
а – табиғи цеолит, б – белсендірілген цеолит

Зерттелетін цеолит үлгілерінің энергия дисперсиялық спектрлері 2 суретте, ал элементтік құрамдары 1 кестеде келтірілген.



Сурет 2 – Цеолиттердің энергия дисперсиялық спектрлері:
а – табиғи цеолит, б – белсендірілген цеолит

2 суреттегі цеолиттердің энергия дисперсиялық спектрлері мен 2 кестедегі олардың элементтік құрамының сәйкестігі оларды элементтік талдау нәтижесін анықтауға мүмкіндік береді. Суреттерде а – үлгісінде табиғи цеолиттің құрамы: көміртегі оттегі, кремний, алюминий және темір элементтерінің үлкен пайыздық көрсеткішін, ал Na, Mg, K, Ca, Ti металдардың аз мөлшері болатыны анықталды.

Ал б – үлгісінде белсендірілген цеолит термиялық өңдеу нәтижесінде көміртегі атомы жойылғаны анықталды және қатардағы элементтердің мөлшері өзгеріске ұшырағаны байқалады.

Кесте 1 – Зерттелетін цеолит үлгілерінің элементтік құрамы

Табиғи цеолит		Белсендірілген цеолит	
Элемент	Салмақтық %	Элемент	Салмақтық %
C	4,89	-	-
O	50,84	O	52,43
Na	1,56	Na	1,16
Mg	1,95	Mg	1,80
Al	7,41	Al	7,34
Si	21,92	Si	25,86
K	1,61	K	1,81
Ca	3,98	Ca	2,80
Fe	5,84	Fe	6,15
-	-	Ti	0,65
Барлығы	100	Барлығы	100

Кесте 2 – Диэлектрлік төсеніштер жасауға арналған, құрамында табиғи цеолиті бар резина қоспаларының рецепті

Ингредиенттердің атауы	Каучуктың 100 масс. б. шаққандағы масс. б.					
	Эталон	1 нұсқа	2 нұсқа	3 нұсқа	4 нұсқа	5 нұсқа
СКМС – 30 АРКМ 15	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Техникалық күкірт	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
Сульфенамид Ц	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Тиурам	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Мырышты ақ күйе	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Стеарин	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Микровоск	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
ПН-6Ш майы	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0
Бор	110,0	110,0	110,0	110,0	110,0	110,0
Пигмент	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
Ақ күйе БС-120	40,0	30,0	20,0	10,0	-	5,0
Табиғи цеолит	-	10,0	20,0	30,0	40,0	45,0
Барлығы	290,0	290,0	290,0	290,0	290,0	300,0

ИҚ-спектроскопия зерттелетін сынаманың құрылымы мен басқа қасиеттері туралы сипаттайды және олардың өзгерісі туралы мәлімет береді. Шанқанай кен орны табиғи цеолитінің ИҚ-спектрі [3] мақалада келтірілген.

Жоғары беттік белсенділігі және қосымша байланыстар түзу қабілетіне байланысты цеолит тек толықтырғыш ретінде ғана емес, сонымен қатар белсенді компонент ретінде де

әрекет етеді, яғни резинаның физика-механикалық қасиеттерін жақсартады, атап айтсақ резинаның шартты беріктігін, тозуға төзімділігін және салыстырмалы ұзаруын, қаттылығын, сонымен қатар басқа да негізгі қасиеттерін жақсартуға, шығындарды азайтуға және соңғы өнімнің сапасын жоғарылатуға мүмкіндік береді.

Әртүрлі салаларда қолданылатын диэлектрлік төсеніштер жоғары беріктік пен механикалық зақымға төзімділікті талап етеді, сондықтан бұл зерттеу жұмысының маңызы өте зор. Цеолиттің толықтырғыш ретінде резинаға әсерін терең зерттеу жоғары сапалы және қауіпсіз өнімдер шығаруға бағытталады, бұл олардың тұтынушылық қасиеттерін жақсартып қана қоймай, сонымен қатар қоршаған орта қауіпсіздігіне де ықпал ететіні анық. Осылайша, осы саладағы ғылыми-зерттеу нәтижелері резина бұйымдарының сапасы мен қолжетімді құндылығын арттыру үшін жаңа жол ашуға мүмкіндік бередіі [9].

Диэлектрлік төсеніштерге арналған эталондық және сыналатын резина қоспаларының рецептілері 2, 3 кестелерде келтірілген.

Кесте 3 – Диэлектрлік төсеніштер жасауға арналған, құрамында белсендірілген цеолиті бар резина қоспаларының рецепті

Ингредиенттердің атауы	Каучуктың 100 масс. б. шаққандағы масс. б.					
	Эталон	1 нұсқа	2 нұсқа	3 нұсқа	4 нұсқа	5 нұсқа
СКМС –30 АРКМ 15	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Техникалық күкірт	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
Сульфенамид Ц	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Тиурам	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Мырышты ақ күйе	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Стеарин	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Микровоск	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
ПН-6Ш майы	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0
Бор	110,0	110,0	110,0	110,0	110,0	110,0
Пигмент	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
Ақ күйе БС-120	40,0	30,0	20,0	10,0	-	5,0
Белсендірілген цеолит	-	10,0	20,0	30,0	40,0	45,0
Барлығы	290,0	290,0	290,0	290,0	290,0	300,0

Диэлектрлік төсеніштерге арналған резина қоспаларын дайындау «Эко-Шина» ЖШС жүргізілді, Өндіріс стандартқа сай жұмыс жасайды, техника-қауіпсіздік ережелерін қатаң сақталады.

Резина қоспаларын араластыру екі кезеңде жүргізілді: онда басқа компоненттермен оңтайлы өзара әрекеттесуді қамтамасыз ету үшін бірінші араластыру кезеңінде цеолит қосылады, олар 20 минут бойы 65^0С температурада білікте араластырылады. Екінші кезеңде аталған температурада вулкандау агенттері қосылып араластыру ұзақтығы 5 минутты құрады.

Дайын болған резина қоспаларын вулкандау пресінде 155°С температурада 15-20 минут жүргізілді. Сыналатын үлгілердің (вулканизаттардың) физика-механикалық қасиеттерін «Эко-Шина» ЖШС анықталды.

Құрамында табиғи цеолиті бар вулканизаттардың физика-механикалық қасиеттері 4 кестеде келтірілген. Ал құрамында белсендірілген цеолиті бар вулканизаттардың физика-механикалық қасиеттері 5 кестеде келтірілген.

Кесте 4 – Құрамында табиғи цеолиті бар вулканизаттардың физика-механикалық қасиеттері (МЕСТ 4997)

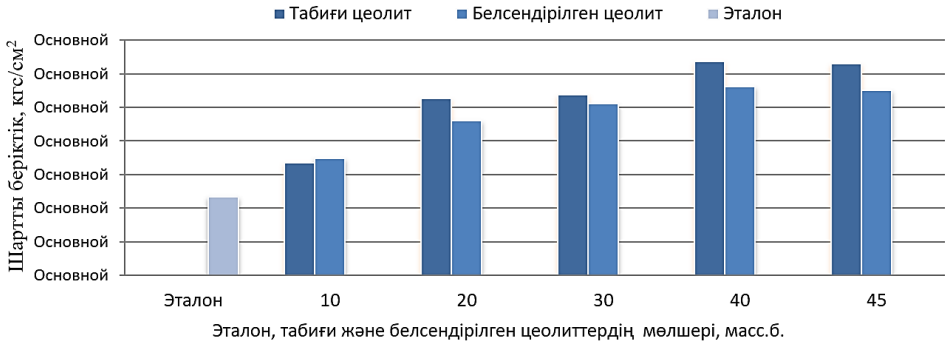
Көрсеткіштердің атауы	Үлгілердің түрлері						
	МЕСТ 4997 бо/ша нормасы	Эталон	1	2	3	4	5
1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*
Шартты беріктік, (кгс/см^2)	min. 55	66,34	67,35	69,27	69,37	70,37	70,31
Салыстырмалы ұзаруы, %	min. 250	290	283	280	280	277	273
Шор А бойынша қаттылығы, ш.б.	45-60	54	54	55	55	56	57
100°С температурада 24 сағат бойы ескіруден кейінгі шартты беріктік, (кгс/см^2)	-	51,04	53,02	55,13	54,22	54,16	54,29

1	2	3	4	5	6	7	8
100°С температурада 24 сағат бойы ескіруден кейінгі шартты беріктіктің өзгеруі, %	± 25%	-23%	-21%	-20%	-22%	-23%	-23%
100°С температурада 24 сағат бойы ескіруден кейінгі салыстырмалы ұзаруы, %	-	240	237	233	230	227	227
Резинаның электрлік беріктігі, кВ/мм	min. 10	16,6	16,3	16,0	15,8	15,5	15,2

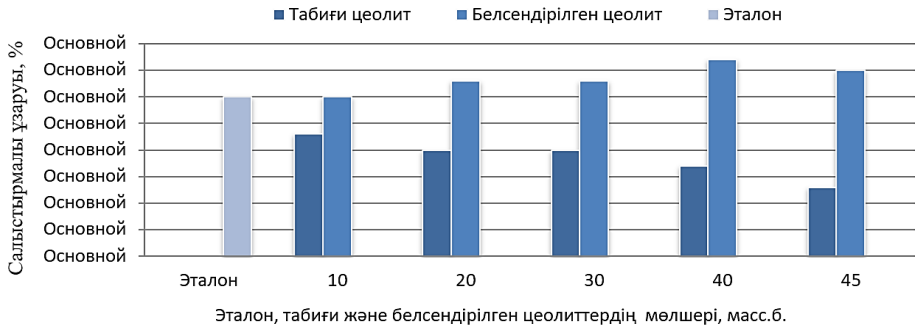
Кесте 5 – Құрамында белсендірілген цеолиті бар вулканизаттардың физика-механикалық қасиеттері (МЕСТ 4997)

Көрсеткіштердің атауы	Үлгілердің түрлері						
	МЕСТ 4997 бо/ша нормасы	Эталон	1	2	3	4	5
Шартты беріктік, (кгс/см^2)	min.55	66,34	67,49	68,61	69,11	69,62	69,51
Салыстырмалы ұзаруы, %	min. 250	290	290	293	293	297	295
Шор А бойынша қаттылығы, ш.б.	45-60	54	54	53	53	52	52
100°С температурада 24 сағат бойы ескіруден кейінгі шартты беріктік, (кгс/см^2)	-	51,04	55,56	55,70	58,61	59,44	59,10
100°С температурада 24 сағат бойы ескіруден кейінгі шартты беріктіктің өзгеруі, %	± 25%	-23%	-17%	-20%	-19%	-18%	-18%
100°С температурада 24 сағат бойы ескіруден кейінгі салыстырмалы ұзаруы, %	-	240	243	243	247	247	241
Резинаның электрлік беріктігі, кВ/мм	min.10	16,6	16,2	15,9	15,7	15,3	15,3

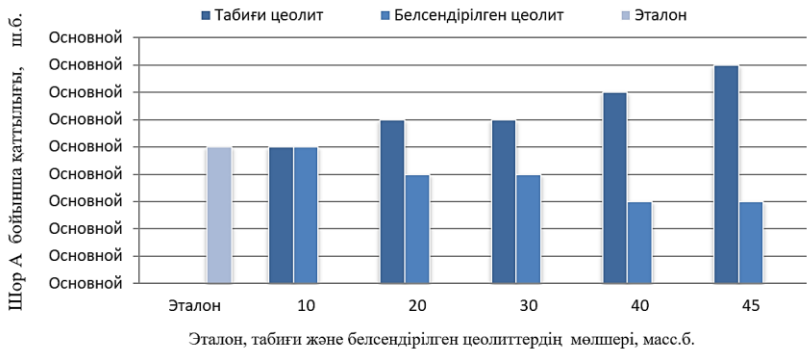
Құрамында табиғи және белсендірілген цеолиттері бар вулканизаттардың физика-механикалық қасиеттері диаграмма түрінде 3-6 және 8 суреттерде келтірілді. Диаграммадағы мәндер 4, 5 кестелердің мәндерімен сәйкес келеді.



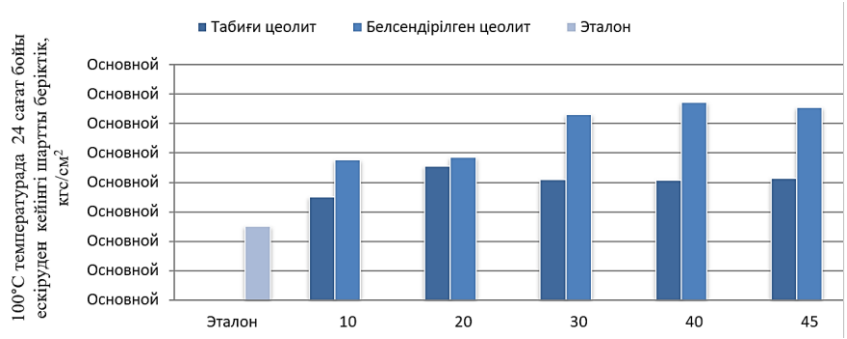
Сурет 3 – Шартты беріктіктің цеолит құрамына тәуелділігінің диаграммасы



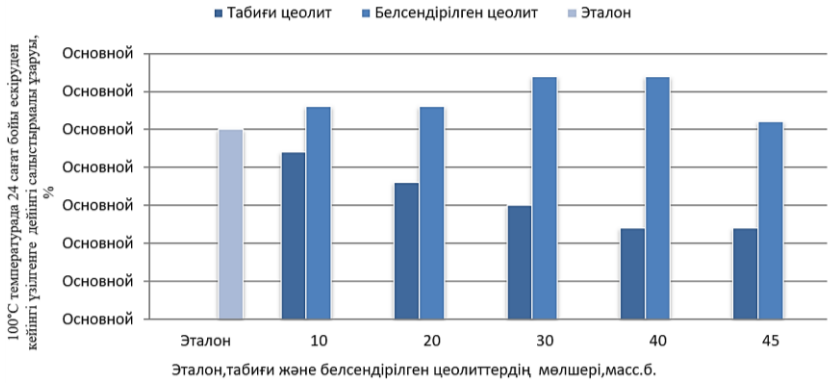
Сурет 4 – Салыстырмалы ұзарудың цеолит құрамына тәуелділігінің диаграммасы



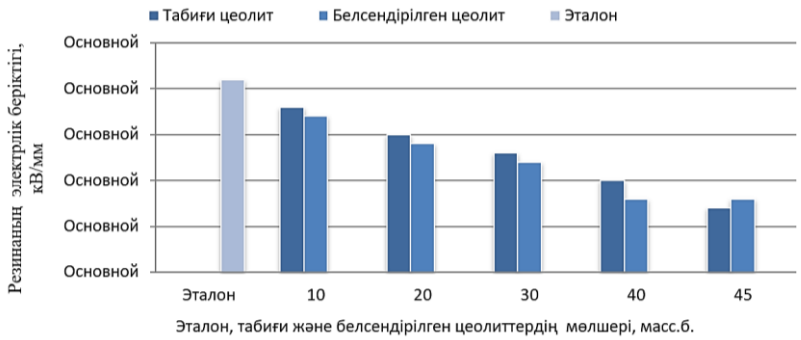
Сурет 5 – Шор А бойынша қаттылықтың цеолит құрамына тәуелділігінің диаграммасы



Сурет 6 – 100°С температурада 24 сағат бойы ескіруден кейінгі шартты беріктіктің цеолит құрамына тәуелділігінің диаграммасы



Сурет 7 – 100°С температурада 24 сағат бойы ескіруден кейінгі үзілгенге дейінгі ұзаруының цеолит құрамына тәуелділігінің диаграммасы



Сурет 8 – Резинаның электрлік беріктігінің цеолит құрамына тәуелділігінің диаграммасы

Диэлектрлік төсеніштер жасауға арналған, құрамында табиғи цеолиті бар вулканизаттардың физика-механикалық қасиеттері нәтижелі көрсеткіштерге ие болды. Яғни ақ күйенің орнын алмастырған табиғи және белсендірілген цеолиттерді резина қоспасының толықтырғышы ретінде қолданған кезінде шартты беріктіктің 67,35-70,37 кгс/см^2 және 67,49-

69,62 кгс/см^2 дейін өсуі 3 суретте айқын көрсетілген, бұл эталонмен салыстырғанда толықтырғыш – цеолиттердің оңтайлы мөлшері 40 масс.б., яғни ақ күйені толық алмастыру мүмкіндігіндігіне ие екенін растайды.

4 суретте салыстырмалы ұзарудың цеолит құрамына тәуелділігі көрсетілген. Мұнда табиғи цеолиттің мөлшерін көбейткен сайын резинаның салыстырмалы ұзаруы эталонмен салыстырғанда төмен көрсеткішті 283-273% көрсетіп тұр, бірақ 4,5 кестелерде көрсетілген стандартта (МЕСТ 4997) алынған резинаның нормаға сәйкестігін байқауға болады. Бұл оның алдағы уақытта өндірісте қолдануға болатынын растайды. Ал белсендірілген цеолитті толықтырғыш ретінде қолданғанда жоғары көрсеткішті байқаймыз, яғни салыстырмалы ұзару 290-297% дейін өсті мұнда белсендірілген цеолиттің оңтайлы мөлшері 40 масс.б., яғни ақ күйені толық алмастыру мүмкіндігіне ие.

5 суретте Шор А бойынша қаттылықтың цеолит құрамына тәуелділігі суреттелген. Мұнда табиғи цеолит қосылған резинаның Шор А бойынша қаттылығы 54-57 ш.б. дейін жоғарылайды, ал белсендірілген цеолитте 54-52 ш.б. төмендейді, бұл жоғарыдағы қарастырылған салыстырмалы ұзарудың жоғарылауы кезінде Шор А бойынша қаттылықтың төмендеуімен түсіндіріледі, яғни сынақтың нәтижесінде алынған көрсеткіштер ережелік талаптар мен нормаға сәйкестікті қамтамасыз етеді (4,5 кестелерде көрсетілген).

6 суретте 100°С температурада 24 сағат ішінде ескіргеннен кейінгі шартты беріктіктің цеолиттердің құрамына тәуелділігі қарастырылған, эталонмен салыстырғанда табиғи цеолит қосылған резинаның шартты беріктігі 53,02-55,13 кгс/см^2 аралығында жоғарылыды. Ал белсендірілген цеолит енгізілген резинаның шартты беріктігі өте жоғары көрсеткіштерге ие болды (55,56-59,44 кгс/см^2 дейін) мұнда толықтырғыш-белсенді цеолиттің оңтайлы мөлшері 40 масс.б. көрсетеді, бұл аталған нұсқада ақ күйені толық алмастыра алады.

7 суретте 100°С температурада 24 сағат ішінде ескіргеннен кейінгі салыстырмалы ұзарудың цеолиттердің құрамына тәуелділігі айқындалған. Мұнда табиғи цеолит қосылған резинаның салыстырмалы ұзаруы эталонға қарағанда төмен, бірақ МЕСТ бойынша нормаға сәйкес. Ал белсендірілген цеолит қосылған резинаның салыстырмалы ұзаруының көрсеткіші 243-247% эталоннан асып түсті. Бұл өндірістік жағдайда ақ күйенің орнын белсендірілген цеолитпен толық алмастыру кезіндегі жоғары қасиет көрсеткенін сипаттайды.

8 суретте резинаның электрлік беріктігінің цеолиттердің құрамына тәуелділігінің диаграммасы көрсетілген. Диаграммада көрсетілгендей табиғи және белсендірілген цеолиттердің мөлшерін жоғарылатқан сайы резинаның электрлік беріктігі 16,3-15,2 кВ/мм және 16,2-15,3 кВ/мм эталонмен салыстырсақ төмен көрсеткішті көрсетіп тұр, бірақ МЕСТ 4997 бойынша нормаға сәйкестігі зерттелген резинаның электрлік беріктігінің қасиеті жақсы көрсеткіш көрсеткенін айқындайды.

Демек, диэлектрлік төсеніштер жасауға арналған резина қоспасына толықтырғыш ретінде табиғи және белсендірілген цеолиттерді қолдануға болады, сонымен қатар оларды аз мөлшерде емес ақ күйені толық алмастыру мүмкін. Резинаның физика-механикалық қасиеттерін анықтай келе олардың жақсы оңтайлы мөлшері 40 масс.б. болатыны жете зерттелді. Материалдағы цеолит мөлшерін арттыру оның беріктігін арттырғанымен, жоғарыда айтылғандай қаттылығын да төмендетуі мүмкін (4,5 кестелер), бұл материалға қойылатын талаптарға байланысты ескерілуі қажет.

Қорытынды

Жүргізілген зерттеу жұмыстарының нәтижесі, Шанқанай кен орнының табиғи және белсендірілген цеолиттерін диэлектрлік төсеніштер алуға арналған резина қоспаларына толықтырғыш ретінде қолдану мүмкіндігін растады.

Аталған резинаның физика-механикалық қасиеттерін көп реттік сынау нәтижесі жаңа толықтырғыштардың оңтайлы мөлшері 40 масс.б. жоғары көрсеткіштерімен сипатталады: шартты беріктік 67,35-70,37 кгс/см^2 (табиғи цеолит) және 67,49-69,62 кгс/см^2 (белсендірілген цеолит); салыстырмалы ұзару 290-297% (белсендірілген цеолит); Шор А бойынша қаттылығы 54-57 ш.б. (табиғи цеолит) өсті.

Жалпы айтқанда цеолитпен толықтырылған резинаның термиялық төзімділігі мен электрлік беріктігі нормаға сәйкес, ол сондай-ақ жоғары шартты беріктік пен қаттылық және соққыға төзімділікті, үйкеліске қарсы қасиеттерді қамтамасыз етеді; цеолиттерді араластыру кезінде резина қоспасына оңай сіңіріледі, полимер ішінде таралу үшін аз энергия қажет; және цеолитті қолдану өндірістерде санитарлық-гигиеналық жағдайларды жақсартады, себебі

цеолит аз шаң шығарады. Осылайша, ақ күйені толықтырғыш ретінде цеолитпен толық алмастыру қоршаған ортаға оң әсер етеді, яғни экологиялық таза, қол жетімді отандық шикізат және еңбек жағдайларын жақсартады, сонымен қатар резинаның физика-механикалық қасиеттерін арттырады. Нәтижесінде өнім сапасы жақсарады, алдағы уақытта қолданылу мүмкіндігіне ие.

Әдебиеттер тізімі

1. Дик Д.С. Технология резины: Рецептуростроение и испытания. Научные основы и технологии / Д.С. Дик. – СПб, 2010. – 620 с. https://1lib.sk/book/16384671/c41d5d.
2. Цеолиттердің әр түрлі салаларда қолдану мүмкіндіктері (шолу) / А.О. Оразымбетова және т.б. // Bulletin of Shakarim University. Technical Sciences. – 2025. – 1(17). Б. 376-397. https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-1(17)-48.
3. Шанқанай кен орнындағы цеолиттердің физика-химиялық қасиеттерін зерттеу / А.О. Оразымбетова және т.б. // ҚР ҰҒА Хабарлары. Химия және технология сериясы. – 2024. – Т.2, № 459. – Б. 138-150. https://doi.org/10.32014/2024. 2518-1491.228.
4. Шанқанай кен орны табиғи минералын физикалық және химиялық модификациялау / А.О. Оразымбетова және т.б. // Вестник Университета Шакарима. Технические науки. – 2025. – № 2(18). – Б. 459-469.
5. Myrzalieva S.K. Wastewater treatment using natural zeolite materials / S.K. Myrzalieva, G.N.I.P. Pratama, A.G. Khamidulla // Complex Use of Mineral Resources. – 2021. – № 2(317). – P. 64-68.
6. Al-Waste-Based Zeolite Adsorbent Used for the Removal of Ammonium from Aqueous Solutions / R. Sanchez-Hernandez et al // International Journal of Chemical Engineering. – 2018. – P. 1-11.
7. Туребекова Г.З. Цеолит в резиновой промышленности / Г.З.Туребекова, Н.О. Джакипбекова, С.А. Сакибаева. – ЮКГУ им. М. Ауэзова, г Шымкент, http://www.dpzzz.com/en/publications/10.html.
8. Ескараева Г.З., Сакибаева С.А., Хлебова С.В., Таутанов Х.Б. Брекерная резиновая смесь. Описания изобретения к предварительному патенту. РК, 2001. – бюлл. № 5. https://kz.patents.su/patents/hlebova-svetlana-vasilevna.
9. Применение природных цеолитов в производстве диэлектрических ковриков / Б.Ш. Хасанходжаева и др. // Вестник университета Шакарима. Технические науки. – 2024. – № 4(16). – С.379-388.
10. Experimental Study on the Effect of Waste Rubber Powder and Zeolite Replacement on Cemented Sandy Soil / A. Karimi et al // AUT Journal of Civil Engineering. – 2024. https://ajce.aut.ac.ir/article_5541.html.
11. Molecular sieving effect of the zeolite-filled silicone rubber membranes in gas permeation / M. Jia et al // Journal of Membrane Science. – 1991. – V. 57, Issues 2-3. – P. 289-292. https://doi.org/10.1016/S0376-7388(00)80684-5.
12. Application Characteristics of Zeolite-Based Stuffing for Nanofluidic Packer Rubber / Y. Zhang et al // Energies. – 2022. – № 15(21). – P. 7962. https://doi.org/10.3390/en15217962.
13. Application of Organic Amine Modified Natural Zeolite in Filling Natural Rubber / X. Chen et al // Nanomaterials. – 2022 – № 12(16). – P. 2784. https://doi.org/10.3390/nano12162784.
14. Перспективы применения природного цеолита месторождения Даубаба (Казахстан) для наполнения полимеров / Г.Ф. Сагитова и др. // Технология текстильной промышленности. Известия высших учебных заведений. – 2021. – № 6(396). – С. 327-332.
15. Сагитова Г.Ф. Цеолитті қолдана отырып резина қоспаларына арналған құрама оқшаулаушы композицияларын әзірлеу: монография / Г.Ф. Сагитова. – Шымкент: Издательский центр «Асем», 2021. – 160 с.
16. Acid and heat modification of kazakhstani zeolite / V.G. Tsitsishvili et al // South Kazakhstan Science Herald. – 2025. – № 1(29). – P.63-76 .
17. Acid Resistance and Ion-Exchange Capacity of Natural Mixtures of Heulandite and Chabazite. / V. Tsitsishvili et al // Minerals. – 2023. – № 13. – P. 364. https://doi.org/10.3390/min13030364.
18. Acid treatment of Georgian, Kazakhstani and Armenian natural heulandite-clinoptilolites II / V. Tsitsishvili et al // Adsorption and porous structure. (Scientific Collection «InterConf+», 31(147): with the Proceedings of the 6th International Scientific and Practical Conference «International Scientific Discussion: Problems, Tasks and Prospects» (March 19-20, 2023; Brighton, United Kingdom), InterConf, 2023. – № 147. – P. 483-502. https://doi.org/10.51582/interconf.19-20.03.2023.052.

References

1. Dik D.S. Tekhnologiya reziny: Retsepturostroenie i ispytaniya. Nauchnye osnovy i tekhnologii / D.S. Dik. – SPb, 2010. – 620 s. https://1lib.sk/book/16384671/c41d5d. (In Russian).
2. Tseolitterdin ar tүrli salalarda koldanu mumkindikteri (sholu) / A.O. Orazymbetova zhane t.b. // Bulletin of Shakarim University. Technical Sciences. – 2025. – 1(17). B. 376-397. https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-1(17)-48. (In Kazakh).
3. Shankanai ken ornyndagy tseolitterdin fizika-khimiyalyk kasietterin zertteu / A.O. Orazymbetova zhane t.b. // KR UGA Khabarlary. Khimiya zhane tekhnologiya seriyasy. – 2024. – T.2, № 459. – B. 138-150. https://doi.org/10.32014/2024. 2518-1491.228. (In Kazakh).
4. Shankanai ken orny tabigi mineralyn fizikalyk zhane khimiyalyk modifikatsiyalau / A.O. Orazymbetova zhəne t.b. // Vestnik Universiteta Shakarima. Tekhnicheskie nauki. – 2025. – № 2(18). – B. 459-469. (In Kazakh).
5. Myrzalieva S.K. Wastewater treatment using natural zeolite materials / S.K. Myrzalieva, G.N.I.P. Pratama, A.G. Khamidulla // Complex Use of Mineral Resources. – 2021. – № 2(317). – P. 64-68. (In English).
6. Al-Waste-Based Zeolite Adsorbent Used for the Removal of Ammonium from Aqueous Solutions / R. Sanchez-Hernandez et al // International Journal of Chemical Engineering. – 2018. – P. 1-11. (In English).
7. Turebekova G.Z. Tseolit v rezinovoi promyshlennosti / G.Z.Turebekova, N.O. Dzhakipbekova, S.A. Sakibaeva. – YUKGU im. M. Auehzova, g Shymkent, http://www.dpzzz.com/en/publications/10.html. (In Russian).
8. Eskaraeva G.Z., Sakibaeva S.A., Khlebova S.V., Tautanov Kh.B. Brekernaya rezinovaya smes'. Opisaniya izobreteniya k predvaritel'nomu patentu. RK, 2001. – byull. № 5. https://kz.patents.su/patents/hlebova-svetlana-vasilevna. (In Russian).
9. Primenenie prirodnykh tseolitov v proizvodstve diehlektricheskikh kovrikov / B.Sh. Khasankhodzhaeva i dr. // Vestnik universiteta Shakarima. Tekhnicheskie nauki. – 2024. – № 4(16). – S.379-388. (In Russian).
10. Experimental Study on the Effect of Waste Rubber Powder and Zeolite Replacement on Cemented Sandy Soil / A. Karimi et al // AUT Journal of Civil Engineering. – 2024. https://ajce.aut.ac.ir/article_5541.html. (In English).
11. Molecular sieving effect of the zeolite-filled silicone rubber membranes in gas permeation / M. Jia et al // Journal of Membrane Science. – 1991. – V. 57, Issues 2-3. – P. 289-292. https://doi.org/10.1016/S0376-7388(00)80684-5. (In English).
12. Application Characteristics of Zeolite-Based Stuffing for Nanofluidic Packer Rubber / Y. Zhang et al // Energies. – 2022. – № 15(21). – R. 7962. https://doi.org/10.3390/en15217962. (In English).
13. Application of Organic Amine Modified Natural Zeolite in Filling Natural Rubber / X. Chen et al // Nanomaterials. – 2022– № 12(16). – R. 2784. https://doi.org/10.3390/nano12162784. (In English).
14. Perspektivy primeneniya prirodnogo tseolita mestorozhdeniya Daubaba (Kazakhstan) dlya napolneniya polimerov / G.F. Sagitova i dr. // Tekhnologiya tekstil'noi promyshlennosti. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. – 2021. – № 6(396). – S. 327-332. (In Russian).
15. Sagitova G.F. Tseolitti қoldana otyryp rezina қospalaryna arnalғan құrama oқshaulaushy kompozitsiyalaryn әzirleu: monografiya / G.F. Sagitova. – Shymkent: Izdatel'skii tsentr «Asem», 2021. – 160 s. (In Russian).
16. Acid and heat modification of kazakhstani zeolite / V.G. Tsitsishvili et al // South Kazakhstan Science Herald. – 2025. – № 1(29). – R.63-76. (In English).
17. Acid Resistance and Ion-Exchange Capacity of Natural Mixtures of Heulandite and Chabazite. / V. Tsitsishvili et al // Minerals. – 2023. – № 13. – R. 364. https://doi.org/10.3390/min13030364. (In English).
18. Acid treatment of Georgian, Kazakhstani and Armenian natural heulandite-clinoptilolites II / V. Tsitsishvili et al // Adsorption and porous structure. (Scientific Collection «InterConf+», 31(147): with the Proceedings of the 6th International Scientific and Practical Conference «International Scientific Discussion: Problems, Tasks and Prospects» (March 19-20, 2023; Brighton, United Kingdom), InterConf, 2023. – № 147. – R. 483-502. https://doi.org/10.51582/interconf.19-20.03.2023.052. (In English).

А.О. Оразымбетова[1], Г.Ф. Сагитова[1]*, А.С. Сидиков[2], С.А. Сакибаева[1], А.Ж. Суйгенбаева[1]
[1]Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова,
160012, Республика Казахстан г. Шымкент, пр. Тауке хана, 5
[2]Филиал Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина,
Республика Узбекистан, г. Ташкент, ул. Дурмон йули, 34
*e-mail: guzalita.f1978@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ЦЕОЛИТОВ ИЗ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЧАНКАНАЙ В ПРОИЗВОДСТВЕ РЕЗИН

В статье изложены результаты исследования природного и активированного цеолита месторождения Чанканай в качестве наполнителя для резиновых смесей. Результаты обширных научных исследований, направленных на анализ влияния минеральных добавок на свойства эластомеров, подтверждают высокий потенциал и дальнейшие перспективы развития данного направления. Введение минеральных добавок в резиновую матрицу в стандартных условиях приводит к улучшению ее эксплуатационных характеристик – снижение стоимости материала, улучшению его упруго-прочностных характеристик, оптимизация технологических свойств. Цель данной работы является замена дорогостоящих наполнителей на более доступные альтернативы, с целью сохранения всех требуемых характеристик резиновых смесей. Поддержание прочности, эластичности, стойкости к износу и других ключевых показателей становится главным приоритетом при поиске и внедрении заменителей, что позволяет сократить затраты без потери качества продукции. Следовательно, предлагаемые ингредиенты должны обеспечивать такие же или улучшенные свойства, чтобы готовый продукт соответствовал стандартам и требованиям эксплуатации. В рамках исследования объектами изучения являются цеолиты Чанканайского месторождения и резины, используемые для производства диэлектрических ковриков, которые должны обладать высокими электроизоляционными свойствами и механической прочностью.

С помощью энергодисперсионной спектроскопии были получены данные об элементном составе исследованных образцов цеолитовых порошков. Эти сведения критически важны, поскольку позволяют судить о том, насколько эффективно цеолиты могут использоваться в качестве наполнителей при производстве резины.

В результате экспериментальных исследований установлено, что вулканизаты, полученные при частичной заменой белой сажи (40 масс.ч.) на активированный цеолит Чанканайского месторождения, демонстрирует удовлетворительные физико-механические показатели. Это открывает новые перспективы для применения природных и активированных цеолитов в резиновой промышленности, способствуя как снижению затрат, так и улучшению качества полученного вулканизата.

Ключевые слова: *наполнитель, природный цеолит, активированный цеолит, белая сажа, резиновая смесь, условная прочность, относительные удлинение.*

A.O. Orazymbetova[1], G.F. Sagitova[1]*, A.S. Sidikov[2], S.A. Sakibayeva[1], A.Zh. Suigenbayeva[1]
[1]M. Auezov South Kazakhstan University,
160012, Shymkent, Republic of Kazakhstan, Tauke Khan ave., 5
[2]Branch of the Russian State University of Oil and Gas named after I.M. Gubkin,
Republic of Uzbekistan, Tashkent, 34 Durmon Yuli Street
*e-mail: guzalita.f1978@mail.ru

APPLICATION OF ZEOLITES FROM THE CHANKANAI DEPOSIT IN RUBBER PRODUCTION

This article presents the results of a study of natural and activated zeolite from the Chankanai deposit as a filler for rubber compounds. The results of extensive scientific research aimed at analyzing the effect of mineral additives on the properties of elastomers confirm the high potential and future prospects for this area of research. The introduction of mineral additives into the rubber matrix under standard conditions improves its performance characteristics, reducing the cost of the material, improving its elastic and strength properties, and optimizing its processing properties. The goal of this work is to replace expensive fillers with more affordable alternatives while maintaining all the required properties of rubber compounds. Maintaining strength, elasticity, wear resistance, and other key performance indicators is a top priority when searching for and implementing replacements, allowing for cost reductions without compromising product quality. Therefore, the proposed ingredients must provide the same or improved properties to ensure the finished product meets standards and operating requirements. The study focuses on zeolites from the Chankanai deposit and rubbers used to produce dielectric mats, which must possess high electrical insulating properties and mechanical strength. Energy-dispersive spectroscopy was used to obtain data on the elemental composition of the zeolite powder samples studied. This information is critical, as it allows us to assess the effectiveness of zeolites as fillers in rubber production. Experimental studies have shown that vulcanizates obtained by partially replacing

40 parts by weight of white carbon with activated zeolite from the Chankanai deposit exhibit satisfactory physical and mechanical properties. This opens up new prospects for the use of natural and activated zeolites in the rubber industry, contributing to both cost reduction and improved vulcanizate quality.

Key words: *filler, natural zeolite, activated zeolite, white carbon black, rubber compound, conditional strength, relative elongation.*

Авторлар туралы мәліметтер

Альмира Омаркызы Оразымбетова – «Бейорганикалық және мұнайхимия өндірістерінің технологиясы» кафедрасының PhD докторанты, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: almira.oao1976@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-5325-7673.

Гузалия Фаритовна Сагитова* – техника ғылымдарының кандидаты, «Экология» кафедрасының профессоры, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: guzalita.f1978@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7913-7453.

Абдужалол Сидикович Сидиков – Химия ғылымының докторы, «Жалпы химия, мұнай және газ химиясы» кафедрасының профессоры, И.М. Губкин атындағы Ресей мемлекеттік мұнай және газ университетінің филиалы, Ташкент қ., Өзбекстан Республикасы; e-mail: sidikov_a@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5393-8201.

Сауле Абдразаковна Сакибаева – техника ғылымдарының кандидаты, «Бейорганикалық және мұнайхимия өндірістерінің технологиясы» кафедрасының профессоры, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: sakibayeva.saule@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8697-9309.

Алия Жолдасбековна Суйгенбаева – техника ғылымдарының кандидаты, «Химия және фармацевтикалық инженерия» кафедрасының доценті, М.Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: syaljo@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9658-5001.

Сведения об авторах

Альмира Омаркызы Оразымбетова – PhD докторант кафедры «Технология неорганических и нефтехимических производств» Южно-Казахстанского университета им. М. Ауэзова, г. Шымкент, Республика Казахстан; e-mail: almira.oao1976@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-5325-7673.

Гузалия Фаритовна Сагитова* – кандидат технических наук, профессор кафедры «Экология» Южно-Казахстанского университета им. М. Ауэзова, г. Шымкент, Республика Казахстан; e-mail: guzalita.f1978@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7913-7453.

Абдужалол Сидикович Сидиков – доктор химических наук, профессор кафедры «Общая химия, химия нефти и газа» филиал Российского государственного университета нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, г. Ташкент, Республика Узбекистан; e-mail: sidikov_a@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5393-8201.

Сауле Абдразаковна Сакибаева – кандидат технических наук, профессор кафедры «Технология неорганических и нефтехимических производств» Южно-Казахстанского университета им. М. Ауэзова, г. Шымкент, Республика Казахстан; e-mail: sakibayeva.saule.@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8697-9309.

Алия Жолдасбековна Суйгенбаева – кандидат технических наук, доцент кафедры «Химия и фармацевтическая инженерия», Южно-Казахстанского университета им. М. Ауэзова, г. Шымкент, Республика Казахстан; e-mail: syaljo@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9658-5001.

Information about the authors

Almira Orazymbetova – PhD doctoral student of the chair «Technology of inorganic and petrochemical industries» of M. Auezov South Kazakhstan university, Shymkent, Republic of Kazakhstan; e-mail: almira.oao1976@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-5325-7673.

Guzaliya Sagitova* – Candidate of technical sciences, Professor of the chair «Ecology Ecology» of M. Auezov South Kazakhstan university, Shymkent, Republic of Kazakhstan; e-mail: guzalita.f1978@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7913-7453.

Abdujalol Sidikov – Doctor of Chemical Sciences, Professor, of the Department «General Chemistry, Chemistry of Oil and Gas» branch of the Gubkin Russian State University of Oil and Gas (NRU) branch in Tashkent, Tashkent, Republic of Uzbekistan; e-mail: sidikov_a@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5393-8201.

Saule Sakibayeva – Candidate of technical sciences, Professor of the chair «Technology of inorganic and petrochemical industries» of M. Auezov South Kazakhstan university, Shymkent, Republic of Kazakhstan; e-mail: sakibayeva.saule.@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8697-9309.

Aliya Suigenbayeva – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Chemistry and Pharmaceutical Engineering, of M. Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Republic of Kazakhstan; e-mail: syaljo@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9658-5001.

Поступила в редакцию 15.01.2026
Поступила после доработки 10.03.2026
Принята к публикации 10.03.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-83

МРНТИ: 61.51.37

CC BY 4.0
Check for updates

A. Ualikhanov*, B. Nurzhan, A. Sabitova, Z. Sharipkhan, N. Mukhamediyarov
Shakarim University,
071412, Republic of Kazakhstan, Semey, 20 A Glinka Street
*e-mail: a.a.ualikhanov@gmail.com

HYBRID MODIFICATION OF BITUMEN FOR DURABLE AND SUSTAINABLE ASPHALT PAVEMENTS

Abstract: *Asphalt aging is a critical factor affecting the long-term performance and durability of pavement structures, as it induces complex chemical, rheological, and microstructural transformations in asphalt binders and mixtures. Environmental and mechanical stressors, including temperature, oxygen exposure, ultraviolet radiation, moisture ingress, and traffic loading, accelerate oxidation processes, leading to binder stiffening, embrittlement, and reduced resistance to cracking and moisture damage. In response to increasing environmental concerns and resource limitations, sustainable materials such as reclaimed asphalt pavement, bio-based binders, recycled polymers, and industrial by-products have been increasingly incorporated into asphalt mixtures; however, their influence on aging mechanisms and long-term durability remains insufficiently understood. This study presents a comprehensive literature-based review of asphalt aging mechanisms, sustainable material modification strategies, and durability prediction approaches. A structured multi-stage review methodology was applied to classify and evaluate modification technologies based on performance effectiveness, environmental sustainability, economic feasibility, and applicability under diverse climatic and operational conditions. The review synthesizes experimental and modelling findings on chemical aging processes, microstructural evolution, aggregate – binder interactions, and multiphysics ageing simulations. An integrated conceptual framework linking environmental exposure conditions, material aging mechanisms, microstructural parameters, and rheological performance indicators is proposed to support durability-based and sustainable pavement design. Key research gaps and future research directions are identified, including the need for advanced aging simulation protocols, multiscale characterization approaches, and long-term field validation of sustainable modifiers. The findings of this review provide a scientific basis for developing resilient and environmentally sustainable pavement infrastructure.*

Key words: *modified bitumen, hybrid modification systems, engineered bitumen, recycling, ecology*

Introduction

Asphalt pavements are a fundamental element of modern transportation infrastructure, and their long-term performance is strongly controlled by the aging behavior of asphalt binders and mixtures. Asphalt aging is a complex time-dependent process governed by coupled environmental and mechanical factors, including temperature, oxygen exposure, ultraviolet radiation, moisture ingress, and traffic loading. These factors induce chemical and rheological transformations in asphalt binders, leading to increased stiffness, embrittlement, and reduced resistance to cracking and moisture-related damage, which are among the primary causes of premature pavement deterioration and increased maintenance costs worldwide [1, 2]. Standard laboratory aging protocols, such as the Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT) and Pressure Aging Vessel (PAV), are widely used to simulate short-term and long-term aging processes; however, numerous studies have reported significant discrepancies between laboratory-aged and field-aged binders, indicating that current accelerated aging methods do not fully reproduce real service conditions, particularly multiphysics phenomena such as thermal gradients, oxygen diffusion, ultraviolet exposure, and moisture transport through

©A. Ualikhanov, B. Nurzhan, A. Sabitova, Z. Sharipkhan, N. Mukhamediyarov, 2026

pavement layers [3-5]. In recent years, the pavement industry has increasingly adopted sustainable and circular material solutions to reduce greenhouse gas emissions, energy consumption, and reliance on virgin resources. Reclaimed asphalt pavement (RAP), bio-based binders, recycled polymers, and industrial by-products have been incorporated into asphalt mixtures to enhance sustainability and reduce construction costs [6-8]. Although these materials provide considerable environmental and economic benefits, their influence on aging mechanisms, microstructural evolution, and long-term durability remains insufficiently understood, and the interaction between sustainable modifiers and aging processes introduces additional complexity into pavement material behavior. Therefore, this study presents a comprehensive literature-based synthesis of asphalt aging mechanisms, sustainable material modification strategies, and predictive modelling approaches, with the objective of developing an integrated conceptual framework linking chemical aging, microstructural evolution, and rheological performance degradation to support durability-based and sustainable pavement design and to identify critical research gaps and future research directions in asphalt pavement engineering [9, 10].

Methods

The methodological framework of this study is based on a systematic and critical analysis of scientific literature on asphalt aging mechanisms, sustainable modification technologies, and durability prediction approaches. A comprehensive multi-stage review methodology was applied to ensure the completeness, objectivity, and scientific rigor of the analysis.

At the first stage, relevant modification and aging-related approaches were identified and classified according to predefined evaluation criteria. The primary criteria included performance effectiveness, environmental sustainability, economic feasibility, and applicability under diverse climatic and operational conditions. Performance effectiveness was defined as the ability of a modification strategy to improve key mechanical and durability-related properties of asphalt binders and mixtures, including stiffness, cracking resistance, rutting resistance, and fatigue performance. Environmental sustainability was assessed in terms of waste utilization, emission reduction potential, and the use of renewable or recycled materials. Economic feasibility reflected material availability, processing complexity, and scalability for practical implementation. Applicability was considered as the potential of the method to be used across different climatic regions and pavement structures. Based on this classification, the review focused on polymer and rubber modification, bio-based binders, recycled materials, mineral fillers, and studies related to laboratory and field aging of asphalt materials.

At the second stage, the selected approaches were evaluated based on experimental and modelling results reported in peer-reviewed publications. Key factors considered included testing conditions, reported performance indicators, and associated technological effects, such as mixing temperature, aging protocols, and material compatibility. Additionally, the selectivity of modification effects was analyzed, including aging resistance, phase stability, and retention of ductility, and potential trade-offs were documented. For instance, mineral fillers were reported to enhance stiffness but reduce fatigue resistance, rubber modification improved performance at low dosages but caused phase instability at higher contents, bio-based modifiers softened binders but reduced elasticity, while natural asphalt materials provided high residual strength and stability in warm mix technologies.

The final stage involved a comparative synthesis of the reviewed methods to identify advantages, limitations, and potential synergistic combinations. Strengths included improved durability and mechanical performance with polymer and nano-modifiers, environmental benefits associated with bio-based materials and recycled additives, and waste valorization through industrial by-product utilization. Identified limitations included reduced ductility in bio-modified binders, fatigue-related issues in mineral-filled systems, high costs of advanced modifiers, and phase instability at excessive rubber contents. Promising hybrid strategies were also identified, such as combining polymers with nanomaterials to achieve synergistic performance enhancement, integrating mineral and bio-based additives with polymer-modified binders to balance performance trade-offs, and using rejuvenators to mitigate aging and extend pavement service life.

Overall, the methodology adopts an interdisciplinary approach integrating knowledge from materials science, pavement engineering, environmental sustainability, and techno-economic analysis. The reviewed materials were obtained from peer-reviewed journals and international conference proceedings, ensuring the reliability and reproducibility of the synthesized findings. This

methodological approach provides a robust basis for evaluating existing asphalt modification strategies and supports the development of conceptual frameworks for durable and sustainable pavement design.

Bitumen Aging and Sustainability Challenges

Asphalt pavements are subjected to continuous environmental and mechanical loading conditions that progressively alter binder properties and reduce the structural integrity and service life of pavement systems. Among various degradation mechanisms, oxidative aging is widely acknowledged as the primary factor responsible for binder hardening, embrittlement, and increased susceptibility to cracking and moisture-related damage. To simulate aging processes in the laboratory, standardized short-term and long-term aging procedures, including the Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT) and Pressure Aging Vessel (PAV), have been widely implemented. However, numerous studies have reported that these laboratory protocols cannot fully reproduce the complex aging phenomena occurring in the field, particularly under multifactorial climatic conditions involving ultraviolet radiation, moisture penetration, and oxygen diffusion gradients through pavement layers. This discrepancy between laboratory and field aging highlights the need for improved aging simulation techniques and predictive frameworks that account for environmental exposure and in-service pavement conditions [1-3].

Simultaneously, the pavement industry is experiencing increasing pressure to reduce greenhouse gas emissions, minimize energy consumption, and decrease dependence on virgin raw materials [4]. Consequently, sustainable pavement engineering strategies have increasingly focused on the utilization of reclaimed asphalt pavement (RAP), industrial by-products, bio-based binders, and recycled polymeric materials. RAP has been recognized as one of the most promising sustainable alternatives due to its significant economic and environmental advantages; however, the presence of highly aged binder in RAP can substantially influence mixture rheology and performance characteristics. In addition, bio-based binders, including bio-oils and lignin, along with waste-derived modifiers, have been proposed as renewable substitutes for conventional petroleum-based binders, offering potential reductions in carbon footprint and production energy requirements. Nevertheless, the incorporation of these sustainable materials introduces additional complexity in binder aging behavior, chemical interactions, and mechanical performance, thereby necessitating advanced characterization techniques, mechanistic design approaches, and performance-based evaluation frameworks [5, 6].

Chemical and Rheological Mechanisms of Asphalt Aging

Recent advances in asphalt research have substantially improved the understanding of aging mechanisms through the combined application of chemical, microstructural, and rheological characterization techniques [7]. Aging has been associated with significant compositional transformations within the SARA fractions, characterized by a gradual conversion of aromatic components into more polar resins and asphaltenes, leading to increased molecular weight and polarity of the binder system. Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy has been extensively employed to quantify oxidative aging through carbonyl and sulfoxide functional group indices, which have been shown to exhibit strong correlations with aging severity and degradation of mechanical performance properties [8, 9].

Microstructural studies using atomic force microscopy (AFM) and time-of-flight secondary ion mass spectrometry (TOF-SIMS) have revealed pronounced morphological changes in binder microstructure during aging, including the evolution of characteristic «bee-like» structures, phase separation, and heterogeneity development, particularly in wax-containing binders. These microstructural transformations are closely linked to changes in binder rheology and durability [10-12].

Rheological investigations have demonstrated that aging leads to an increase in complex shear modulus and a reduction in phase angle, indicating a shift toward more elastic and brittle material behavior [13]. To bridge the gap between chemical aging and mechanical performance, chemo-mechanical correlations linking oxidation indices with rheological parameters have been proposed as predictive tools for durability assessment and performance-based binder evaluation. Nevertheless, conventional laboratory aging protocols frequently produce comparable aging levels across different binders, which limits their ability to capture binder-specific aging susceptibility associated with crude oil source, molecular structure, and chemical composition. This limitation highlights the necessity for advanced aging simulation techniques capable of differentiating material-specific aging behavior and improving long-term performance prediction [14-16].

Field Aging versus Laboratory Aging

Comparative investigations of field-aged and laboratory-aged asphalt binders have consistently revealed pronounced differences in oxidation levels, rheological behavior, and mechanical performance characteristics. Binders extracted from in-service pavements typically exhibit substantially higher stiffness, oxidation indices, and molecular transformation levels than those aged using conventional Pressure Aging Vessel (PAV) procedures, even after extended aging cycles. These discrepancies are primarily attributed to the complex environmental exposure conditions experienced in the field, including ultraviolet radiation, moisture ingress, oxygen diffusion gradients, and temperature fluctuations across pavement layers, which are not fully replicated by standard laboratory aging protocols [17-19].

To better approximate field aging behavior, advanced laboratory simulation techniques have been proposed, including extended PAV conditioning, reactive oxygen species (ROS)-based aging, and diffusion-reaction ageing models that incorporate oxygen transport and reaction kinetics. Although these approaches improve the representation of oxidative aging mechanisms, achieving quantitative equivalence between laboratory-aged and field-aged binders remains challenging due to the inherently multiphysics nature of pavement aging processes [20, 21].

Recent multiphysics modelling frameworks integrating heat transfer, oxygen diffusion, and oxidation kinetics have demonstrated enhanced capability in predicting aging gradients, oxidation profiles, and durability evolution throughout pavement depth. These models provide a mechanistic understanding of coupled environmental and material interactions and highlight the limitations of simplified single-physics aging simulations. Consequently, the development of next-generation aging protocols and predictive frameworks that incorporate environmental exposure, pavement structural characteristics, and binder material properties is essential for accurate long-term performance prediction and durability-based pavement design [22-24].

Sustainable Modifiers and Recycled Materials in Asphalt Systems

The literature widely documents the integration of recycled and bio-based materials in asphalt pavements as an effective strategy to enhance environmental sustainability and mechanical performance. Reclaimed asphalt pavement (RAP) has been extensively implemented in hot mix asphalt due to its significant economic and ecological advantages, including reduced consumption of virgin materials and lower production costs. However, high RAP contents have been reported to increase mixture stiffness and susceptibility to cracking, which necessitates the use of rejuvenators and careful binder selection to restore aged binder properties and achieve balanced mixture performance [25, 26].

In addition, bio-based modifiers, such as bio-oils and lignin, have been proposed as renewable alternatives or supplements to petroleum-based binders [27]. These materials have demonstrated the ability to improve binder workability, reduce mixing and compaction temperatures, and influence aging resistance depending on their dosage, molecular structure, and chemical composition. Despite their sustainability benefits, the performance of bio-based materials remains highly formulation-dependent, and their long-term durability under field conditions is still insufficiently understood [28-31].

Waste plastics, crumb rubber, and industrial by-products have also been incorporated into asphalt mixtures to enhance high-temperature performance and promote circular economy practices. Plastomeric and elastomeric modifiers have been shown to increase hybrid resistance, dynamic modulus, and mixture stiffness, thereby improving performance under heavy traffic and elevated temperatures. However, excessive polymer content may adversely affect low-temperature cracking resistance, highlighting the need for optimized formulation and performance-based mixture design [32].

Furthermore, industrial waste materials, including blast furnace slag, fly ash, and recycled glass, have demonstrated potential to improve mechanical performance while reducing environmental impacts. Nevertheless, variability in material properties, potential leaching of hazardous constituents, and uncertainties in long-term performance necessitate systematic characterization, environmental risk assessment, and life-cycle assessment (LCA) methodologies prior to large-scale implementation. Overall, these findings confirm that recycled and bio-based materials offer significant opportunities for sustainable pavement engineering, but their successful application requires integrated material design frameworks and rigorous performance evaluation strategies [33-35].

Aggregate Structure and Microstructural Performance Mechanisms

Aggregate structure has been widely recognized as a governing factor in asphalt mixture performance, as aggregates represent approximately 90-95% of the total mixture mass and form the primary load-bearing skeleton of pavement layers. Consequently, the mechanical response of asphalt mixtures is strongly controlled by aggregate characteristics, including mineralogical composition, particle size distribution, and packing structure [36, 37]. Rheology-based methodologies have been increasingly applied to quantify asphalt-aggregate interactions, demonstrating that aggregate mineral composition significantly affects adhesive bonding, interfacial chemistry, and viscoelastic behavior of asphalt mastics. For instance, calcium-rich fillers have been reported to exhibit stronger physico-chemical interactions with asphalt binders compared to silica-based fillers, resulting in enhanced stiffness, adhesion, and overall mechanical performance of asphalt mixtures [38, 39].

Recent advances in microstructural characterization have provided deeper insights into the internal structure of asphalt mixtures and its role in deformation and cracking mechanisms. Image-based techniques and discrete element modelling (DEM) have revealed that aggregate contact orientation, coordination number, and spatial distribution of mortar film thickness are critical microstructural parameters governing rutting and cracking behavior. Furthermore, the internal structural evolution of asphalt mixtures under repeated traffic loading has been shown to significantly influence load transfer mechanisms and damage accumulation processes. Analytical frameworks describing aggregate packing states, such as coarse pack, dense pack, and fine pack structures, offer quantitative tools for optimizing mixture gradation, predicting mechanical performance, and enhancing durability [40, 41].

These findings underscore the necessity of adopting multi-scale characterization approaches that integrate microstructural analysis with macroscopic mechanical testing. Linking aggregate-scale structural parameters to mixture-level rheological and fracture properties is essential for developing performance-based mixture design methodologies and improving the predictive capability of pavement durability models [42-44].

Modelling and Performance Prediction of Pavement Aging

Multiphysics modelling frameworks have been developed to simulate the progression of asphalt aging across pavement depth and over service time by integrating coupled thermal transport, oxygen diffusion, and oxidation reaction kinetics. These advanced models have demonstrated the capability to predict temperature distributions, oxygen concentration gradients, and the formation of oxidation products within pavement layers, and have been validated using field measurements and FTIR-based oxidation indices. Such frameworks confirm that asphalt aging is governed by interacting environmental and material processes, including heat transfer, oxygen ingress, and chemical reaction kinetics, which cannot be adequately captured by simplified single-physics ageing simulations. Consequently, multiphysics approaches provide a mechanistic basis for understanding aging gradients and for improving the reliability of long-term pavement performance prediction models [45, 46]

In parallel, mixture-based rheological evaluation methods have been proposed to assess cracking resistance and aging susceptibility at the mixture scale. Approaches such as Black space analysis and the Glover – Rowe parameter incorporate both stiffness and stress relaxation characteristics, enabling a more comprehensive representation of viscoelastic behavior compared to conventional binder-based indices [47]. Previous studies reported strong correlations between mixture-based rheological parameters and fracture-based performance indicators, demonstrating their potential for predicting cracking initiation and damage evolution. Furthermore, the integration of rheological master curves into performance-based mixture design frameworks has been recognized as a promising strategy for quantifying durability and supporting mechanistic-empirical pavement design [48]. Nevertheless, the application of these rheological indicators in routine design practice remains limited, and further research is required to establish standardized thresholds and field-validated performance criteria [49, 50].

Future Directions

Despite substantial progress in asphalt materials research, several critical knowledge gaps remain that limit the accuracy of durability prediction and the implementation of sustainable pavement technologies. Existing laboratory aging protocols, including RTFOT and PAV, do not adequately reproduce the combined effects of ultraviolet radiation, moisture ingress, and oxygen diffusion gradients that occur under real field conditions. As a result, laboratory-aged binders often

fail to capture the complex multiphysics aging mechanisms and spatial aging gradients observed in in-service pavements.

In addition, the long-term field performance of bio-based and waste-derived modifiers remains insufficiently documented. Although numerous laboratory studies have demonstrated promising mechanical and environmental benefits, the lack of long-term field validation and standardized performance evaluation frameworks hinders their widespread implementation. Moreover, the interactions among aggregate microstructure, binder aging processes, and mixture-level mechanical performance are not fully incorporated into current mechanistic-empirical pavement design methodologies. This limitation restricts the ability to predict performance based on microstructural and chemo-mechanical parameters.

Future research should prioritize the development of integrated aging simulation protocols that combine thermal, oxidative, ultraviolet, and moisture-related mechanisms. Multiscale characterization approaches linking molecular-scale transformations, microstructural evolution, and macroscopic mechanical performance are required to establish mechanistic durability models. Furthermore, multiphysics predictive frameworks that incorporate environmental, structural, and material properties should be integrated into performance-based pavement design methodologies. The establishment of unified durability frameworks that couple environmental exposure, material aging, and mechanical response represents a critical step toward next-generation resilient and sustainable pavement infrastructure.

Conceptual Framework

Based on the reviewed literature, an integrated conceptual framework is proposed to describe the coupled mechanisms governing asphalt aging and pavement durability under sustainable material scenarios. The framework links environmental exposure conditions, binder chemical aging processes, microstructural evolution of asphalt mixtures, and mechanical performance degradation across multiple spatial and temporal scales.

The conceptual model integrates key environmental drivers, including temperature, oxygen diffusion, ultraviolet radiation, and moisture ingress, with material-level aging mechanisms such as oxidation, molecular restructuring, and phase separation. At the microstructural level, aggregate packing structure, mortar film thickness distribution, and binder-aggregate interfacial interactions are incorporated as controlling parameters influencing stress distribution, crack initiation, and deformation mechanisms.

Furthermore, the framework incorporates rheological indicators (e.g., complex modulus, phase angle, Glover-Rowe parameter) and multiphysics modelling outputs (e.g., temperature gradients, oxygen concentration profiles, oxidation kinetics) to predict aging progression and durability evolution across pavement depth. Sustainable modifiers, including bio-based binders, recycled polymers, and industrial by-products, are embedded into the framework to evaluate their effects on aging resistance and long-term performance.

This integrated conceptual framework provides a holistic basis for performance-based pavement design and durability prediction, bridging the gap between material science, pavement engineering, and sustainability assessment.

Limitations of the Review

This review is subject to several limitations that should be acknowledged. First, the study is based exclusively on previously published laboratory, field, and modelling investigations and does not include original experimental validation. Consequently, the conclusions rely on the accuracy and consistency of reported data, which may vary due to differences in materials, testing protocols, and environmental conditions across studies.

Second, variations in binder source, aggregate properties, aging procedures, and characterization techniques may affect the comparability of reported results and introduce uncertainty in the synthesis. In particular, discrepancies between laboratory and field aging conditions and the lack of standardized evaluation protocols for sustainable modifiers limit the ability to derive universal conclusions.

Third, the review primarily focuses on technical and mechanistic aspects of asphalt aging and does not comprehensively address economic, social, and policy dimensions of sustainable pavement implementation. Nevertheless, the synthesized findings provide a comprehensive state-of-the-art overview of asphalt aging mechanisms, sustainable material modification strategies, and

predictive modelling approaches, and identify critical research gaps for future experimental and field investigations.

Conclusion

This study provides a comprehensive literature-based synthesis of asphalt aging mechanisms, sustainable material modification strategies, and durability prediction approaches for modern pavement engineering. The review demonstrates that asphalt aging is governed by coupled chemical, rheological, and microstructural processes, which are strongly influenced by environmental exposure conditions, material composition, and pavement structural characteristics. Significant discrepancies between laboratory and field aging highlight the limitations of conventional accelerated aging protocols and the necessity for advanced simulation frameworks that incorporate multiphysics environmental interactions.

The analysis confirms that sustainable materials, including reclaimed asphalt pavement, bio-based binders, recycled polymers, and industrial by-products, offer substantial environmental and economic benefits but introduce additional complexity in aging behavior and long-term performance. While polymer and nanomaterial modifiers enhance stiffness and durability, bio-based and recycled materials present trade-offs between sustainability, ductility, and fatigue resistance, requiring optimized hybrid modification strategies. Aggregate structure and microstructural parameters, such as packing characteristics and mortar film thickness, were identified as critical factors governing mechanical performance and cracking susceptibility.

Furthermore, multiphysics modelling and mixture-based rheological indicators were shown to provide promising tools for predicting aging gradients and pavement durability. Based on the synthesized findings, an integrated conceptual framework linking environmental drivers, material aging mechanisms, microstructural evolution, and mechanical performance was proposed to support performance-based and sustainable pavement design.

Future research should focus on developing standardized aging protocols that better replicate field conditions, long-term field validation of sustainable modifiers, and multiscale characterization approaches integrating microstructural and mechanical performance indicators. The integration of mechanistic durability models with sustainability assessment frameworks represents a critical step toward the development of resilient and environmentally sustainable pavement infrastructure.

References

1. Engineering bitumen for future asphalt pavements: A review of chemistry, structure and rheology / G. Pipintakos et al // Materials & Design. – 2024. – Vol. 244. – Article 113157. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2024.113157.

2. Performance of hot-mix asphalt using polymer-modified bitumen and marble dust as a filler / D. Khan et al // Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition). – 2023. – Vol. 10(3). – P. 385-398. https://doi.org/10.1016/j.jtte.2022.12.002.

3. Haroon W. Effect of low-content crumb rubber modification on the performance of bitumen and asphalt / W. Haroon, N. Ahmad // Engineering Research Express. – 2024. – Vol. 6. – Article 035116. https://doi.org/10.1088/2631-8695/ad7558.

4. Maha M.R.A. Full extraction of asbuton bitumen for binder replacement in warm mix asphalt / M.R.A. Maha, M.K. Idham, M.R. Hainin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2024. – Vol. 1369. – Article 012026. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1369/1/012026.

5. Optimization of bio asphalt derived from pyrolysis bio oil for bitumen modification / L. Gungat et al // MATEC Web of Conferences. – 2024. – Vol. 397. – Article 02002. https://doi.org/10.1051/matecconf/202439702002.

6. Evaluating the effect of plastomer modified asphalt mixture on high/low temperature performance / R. Ullah et al // Mehran University Research Journal of Engineering and Technology. – 2021. – Vol. 40(3). – P. 680-691. https://doi.org/10.22581/muet1982.2103.20.

7. A review of the use of reclaimed asphalt pavement for road paving applications / A. Milad et al // Jurnal Teknologi. – 2020. – Vol. 82(3). – P. 35-44. https://doi.org/10.11113/jt.v82.14320.

8. Jamshidi A. Evaluation of performance and challenges of use of waste materials in pavement construction: A critical review / A. Jamshidi, G. White // Applied Sciences. – 2020. – Vol. 10. – Article 226. https://doi.org/10.3390/app10010226.

9. Experimental and statistical analysis of bitumen's field ageing in asphalt pavements / H. Zhang et al // Transportation Research Record. – 2022. – Vol. 2676(7). – P. 495-511. https://doi.org/10.1177/03611981221079823.
10. Energy consumption and environmental impact of rubberized asphalt pavement / T. Wang et al // Journal of Cleaner Production. – 2018. – Vol. 180. – P. 139-158. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.086.
11. Riekstins A. Economic and environmental analysis of crumb rubber modified asphalt / A. Riekstins, V. Haritonovs, V. Straupe // Construction and Building Materials. – 2022. – Vol. 335. – Article 127468. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127468.
12. Influence of soft binder and rejuvenator on the mechanical and chemical properties of bituminous binders / G. Jacobs et al // Journal of Cleaner Production. – 2021. – Vol. 287. – Article 125596. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125596.
13. Milad A. A review of the utilisation of recycled waste material as an alternative modifier in asphalt mixtures / A. Milad, A.S.B. Ali, N.I.M. Yusoff // Civil Engineering Journal. – 2020. – Vol. 6 (Special Issue). – P. 42-60. https://doi.org/10.28991/cej-2020-SP(EMCE)-05.
14. Study on the effect of microwave processing on asphalt-rubber / J. Xu et al // Materials. – 2020. – Vol. 13. – Article 411. https://doi.org/10.3390/ma13020411.
15. Gunathilaka S. Using social and economic factors for ranking pavement maintenance and rehabilitation projects / S. Gunathilaka, N. Amarasingha // Asian Transport Studies. – 2020. – Vol. 6. – Article 100026. https://doi.org/10.1016/j.eastsj.2020.100026.
16. Mix design, development, production and policies of recycled hot mix asphalt: A review / A. Sharma et al // Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition). – 2022. – Vol. 9(5). – P. 765-794. https://doi.org/10.1016/j.jtte.2022.06.004.
17. Abo El-Naga, I., Ragab, M. Benefits of utilization the recycle polyethylene terephthalate waste plastic materials as a modifier to asphalt mixtures / I. Abo El-Naga, M. Ragab // Construction and Building Materials. – 2019. – Vol. 219. – P. 81-90. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.172.
18. Investigation of the internal structure change of two-layer asphalt mixtures during the wheel tracking test based on 2D image analysis / J. Jiang et al // Construction and Building Materials. – 2019. – Vol. 209. – P. 66-76. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.156.
19. Zhang R. Evaluation of the cracking and aging susceptibility of asphalt mixtures using viscoelastic properties and master curve parameters / R. Zhang, J.E. Sias, E.V. Dave // Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition). – 2022. – Vol. 9(1). – P. 106-119. https://doi.org/10.1016/j.jtte.2020.09.002.
20. Bio-based palm oil as an additive for asphalt binder: Chemical characterization and rheological properties / A.F.J. Uchoa et al // Construction and Building Materials. – 2021. – Vol. 285. – Article 122883. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122883.
21. Preparation process of bio-oil and bio-asphalt, their performance, and the application of bio-asphalt: A comprehensive review / H. Wang et al // Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition). – 2020. – Vol. 7(2). – P. 137-151. https://doi.org/10.1016/j.jtte.2020.03.002.
22. High-temperature rheological behavior and fatigue performance of lignin modified asphalt binder / J. Gao et al // Construction and Building Materials. – 2020. – Vol. 230. – Article 117063. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117063.
23. Parametric analysis and field validations of oxidative ageing in asphalt pavements using multiphysics modelling approaches / E.L. Omairey et al // International Journal of Pavement Engineering. – 2023. – Vol. 24(2). – Article 2020267. https://doi.org/10.1080/10298436.2021.2020267.
24. Distribution of mortar film thickness and its relationship to mixture cracking resistance / J. Jiang et al // International Journal of Pavement Engineering. – 2020. – Article. https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1774767.
25. Fadhli A. Preservation of roads and bridge using cold paving hot mix Asbuton asphalt mixture (CPHMA) / A. Fadhli, A.R. Meldi // Journal of Scientech Research and Development. – 2022. – Vol. 4(2). – P. 150-158.
26. Mixture-based rheological evaluation tool for cracking in asphalt pavements / C. Ogbo et al // Road Materials and Pavement Design. – 2019. https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1592010.

27. Analisis penerapan green building pada bangunan gedung klinik Universitas Pahlawan / H. Adeswastoto et al // Journal of Engineering Science and Technology Management. – 2023. – Vol. 3(1). – P. 37-43.
28. Using biochar to control nitric oxide air pollution / G.O. Mohamed et al // Journal of Physics: Conference Series. – 2022. – Vol. 2305. – Article 012029. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2305/1/012029.
29. Pouranian M.R. A new framework for understanding aggregate structure in asphalt mixtures / M.R. Pouranian, J.E. Haddock // International Journal of Pavement Engineering. – 2019. https://doi.org/10.1080/10298436.2019.1660340.
30. Lin J.T. Microstructure and performance characteristics of cold recycled asphalt mixtures / J.T. Lin, Y. Xiao // In: Eco-efficient Pavement Construction Materials. – 2020. – Elsevier. – P. 51-88. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818981-8.00004-7.
31. Effect of laboratory aging on chemistry and rheology of crumb rubber modified bitumen / H. Wang et al // Materials and Structures. – 2020. – Vol. 53. – Article 26. https://doi.org/10.1617/s11527-020-1451-9.
32. Review of sustainability, pretreatment, and engineering considerations of asphalt modifiers from the industrial solid wastes / M.R.M. Hasan et al // Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition). – 2019. – Vol. 6(3). – P. 209-244. https://doi.org/10.1016/j.jtte.2018.08.001.
33. Sustainable lignin to enhance asphalt binder oxidative aging properties and mix properties / S. Arafat et al // Journal of Cleaner Production. – 2019. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.238.
34. The impact of bio-oil as rejuvenator for aged asphalt binder / R. Zhang et al // Construction and Building Materials. – 2019. – Vol. 196. – P. 134-143. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.168.
35. Characterization of recycled crumb rubber modified binders containing wax warm additives / H.H. Kim et al // Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition). – 2018. – Vol. 5(3). – P. 197-206. https://doi.org/10.1016/j.jtte.2017.10.002.
36. Optimization of bio asphalt derived from pyrolysis bio oil for bitumen modification / L. Gungat et al // MATEC Web of Conferences. – 2024. – Vol. 397. – Article 02002. https://doi.org/10.1051/matecconf/202439702002.
37. Investigation on physical, thermal and chemical properties of palm kernel oil polyol bio-based binder as a replacement for bituminous binder / M.Y. Alamawi et al // Construction and Building Materials. – 2019. – Vol. 204. – P. 122-131. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.144.
38. Lakawa I. Characteristics of AC-BC asphalt concrete mix using oil asphalt and LGA Asbuton as binders / I. Lakawa, Sulaiman, D.A. Wulandari // International Journal of Management and Education in Human Development. – 2022. – Vol. 2(1). – P. 58-63.
39. Interpreting the effectiveness of antioxidants to increase the resilience of asphalt binders: A global interlaboratory study / D. Adwani et al // Construction and Building Materials. – 2023. – Vol. 366. – Article 130231. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130231.
40. Chemical and mechanical analysis of field and laboratory aged bitumen / K. Primerano et al // Road Materials and Pavement Design. – 2023. – Vol. 24(Suppl. 1). – P. 160-175. https://doi.org/10.1080/14680629.2023.2180297.
41. Omairey E.L. An equation-based multiphysics modelling framework for oxidative ageing of asphalt pavements / E.L. Omairey, F. Gu, Y. Zhang // Journal of Cleaner Production. – 2020. – Vol. 270. – Article 124401. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124401.
42. Omairey, E.L.S. Multiphysics modelling and mitigation of ageing in asphalt pavements: PhD Thesis. – Birmingham: Aston University, 2021. – 197 p.
43. Proceedings of the 9th International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements (MAIREPAV9) / C. Raab et al // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2020. – Vol. 76. – Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-48679-2.
44. Evaluation of asphalt-aggregate interaction based on the rheological properties / J. Zhang et al // International Journal of Pavement Engineering. – 2016. https://doi.org/10.1080/10298436.2016.1199868.
45. Investigating bitumen long-term-ageing in the laboratory by spectroscopic analysis of the SARA fractions / J. Mirwald et al // Construction and Building Materials. – 2020. – Vol. 258. – Article 119577. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119577.

46. Karyawan, I.D.M.A. Impact curing time and compaction methods to the performance of hot mix asphalt Asbuton / I.D.M.A. Karyawan // Journal of Physics: Conference Series. – 2022.
47. Oxidative aging of bitumen: a structural and chemical investigation / X. Lu et al // Road Materials and Pavement Design. – 2021. https://doi.org/10.1080/14680629.2021.1871936.
48. Simulation of the field aging of asphalt binders in different reclaimed asphalt pavement materials in Hong Kong through laboratory tests / Y. Qian et al // Construction and Building Materials. – 2020. – Vol. 265. – Article 120651. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120651.
49. Analysis of rheological properties and aging mechanism of bitumen after short-term and long-term aging / W. Jiang et al // Construction and Building Materials. – 2020. – Article 121777. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121777.
50. Mirwald J. Recommendations for handling bitumen prior to FTIR spectroscopy / J. Mirwald, D. Nura, B. Hofko // Materials and Structures. – 2022. – Vol. 55. – Article 26. https://doi.org/10.1617/s11527-022-01884-1.

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 No BR24993178 Development of innovative technology for processing of secondary resources – metallurgical waste, by-products of oil refining and oil production).

А. Уалиханов*, Б. Нұржан, А. Сабитова, Ж. Шәріпхан, Н. Мухамедияров
Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А
*e-mail: a.a.ualikhanov@gmail.com

ГИБРИДНАЯ МОДИФИКАЦИЯ БИТУМА ДЛЯ ДОЛГОВЕЧНЫХ И УСТОЙЧИВЫХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ПОКРЫТИЙ

Старение асфальта является критическим фактором, влияющим на долговременные эксплуатационные характеристики и долговечность дорожных покрытий, поскольку оно вызывает сложные химические, реологические и микроструктурные преобразования в битумных вяжущих и асфальтобетонных смесях. Экологические и механические воздействия, включая температуру, воздействие кислорода, ультрафиолетовое излучение, проникновение влаги и транспортные нагрузки, ускоряют процессы окисления, что приводит к увеличению жесткости вяжущего, его охрупчиванию и снижению сопротивления растрескиванию и влагоразрушению. В ответ на возрастающие экологические ограничения и дефицит ресурсов устойчивые материалы, такие как регенерированный асфальтобетон (RAP), био-вяжущие, переработанные полимеры и промышленные побочные продукты, все чаще внедряются в асфальтобетонные смеси; однако их влияние на механизмы старения и долговременную долговечность остается недостаточно изученным. В данном исследовании представлен комплексный обзор литературы, посвященный механизмам старения асфальта, стратегиям модификации с использованием устойчивых материалов и подходам к прогнозированию долговечности. Для классификации и оценки технологий модификации была применена структурированная многоэтапная методология обзора, основанная на критериях эксплуатационной эффективности, экологической устойчивости, экономической целесообразности и применимости в различных климатических и эксплуатационных условиях. В обзоре синтезированы экспериментальные и моделирующие результаты, касающиеся химических процессов старения, эволюции микроструктуры, взаимодействия заполнителя и вяжущего, а также многофизических моделей старения. Предложена интегрированная концептуальная модель, связывающая условия внешнего воздействия, механизмы старения материала, микроструктурные параметры и реологические показатели для поддержки проектирования долговечных и устойчивых дорожных покрытий. Выявлены ключевые научные пробелы и направления дальнейших исследований, включая необходимость разработки усовершенствованных протоколов моделирования старения, многоуровневых методов характеризации и долгосрочной полевой валидации устойчивых модификаторов. Результаты данного обзора создают научную основу для разработки устойчивой и долговечной дорожной инфраструктуры.

Ключевые слова: *модифицированный битум, гибридные системы модификации, инженерный битум, переработка, экология№*

А. Уалиханов*, Б. Нұржан, А. Сабитова, Ж. Шәріпхан, Н. Мухамедияров
Шәкәрім университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинки к-сі, 20 А
*e-mail: a.a.ualikhanov@gmail.com

БИТУМДЫ ГИБРИДТІ МОДИФИКАЦИЯЛАУ: ҰЗАҚ МЕРЗІМДІ ЖӘНЕ ТҰРАҚТЫ АСФАЛЬТБЕТОН ЖАБЫНДАРЫ ҮШІН

Асфальттың қартаюы жол жабынының ұзақ мерзімді пайдалану сипаттамалары мен беріктігіне әсер ететін негізгі фактор болып табылады, өйткені ол битумды байланыстырғыштар мен асфальтобетон қоспаларында күрделі химиялық, реологиялық және микроструктуралық өзгерістерге әкеледі. Температура, оттегінің әсері, ультракүлгін сәулелену, ылғалдың енуі және көлік жүктемелері сияқты экологиялық және механикалық факторлар тотығу процестерін жеделдетіп, байланыстырғыштың қаттылығының артуына, морттанып кетуіне және жарықшақтарға және ылғал әсерінен бұзылуға төзімділіктің төмендеуіне әкеледі. Қоршаған ортаға қойылатын талаптардың күшеюіне және ресурстардың шектелуіне байланысты регенерацияланған асфальтобетон (RAP), био-негізді байланыстырғыштар, қайта өңделген полимерлер және өнеркәсіптік қалдық өнімдер сияқты тұрақты материалдар асфальтобетон қоспаларына кеңінен енгізілуде; алайда олардың қартаю механизмдеріне және ұзақ мерзімді беріктікке әсері әлі толық зерттелмеген.Бұл зерттеуде асфальттың қартаю механизмдері, тұрақты материалдармен модификациялау стратегиялары және беріктікті болжау тәсілдері бойынша әдебиеттерге кешенді шолу ұсынылған. Модификациялау технологияларын жіктеу және бағалау үшін пайдалану тиімділігі, экологиялық тұрақтылық, экономикалық тиімділік және әртүрлі климаттық және пайдалану жағдайларында қолдану мүмкіндігі критерийлеріне негізделген құрылымдалған көпсатылы шолу әдістемесі қолданылды. Шолуда химиялық қартаю процестері, микроструктураның эволюциясы, толтырғыш пен байланыстырғыштың өзара әрекеттесуі және көпфизикалық қартаю модельдері бойынша эксперименттік және модельдеу нәтижелері синтезделді. Қоршаған орта әсері жағдайларын, материалдың қартаю механизмдерін, микроструктуралық параметрлерді және реологиялық көрсеткіштерді байланыстыратын интеграцияланған тұжырымдамалық модель ұсынылды, ол берік және тұрақты жол жабындарын жобалауды қолдауға арналған. Қартаюды модельдеудің жетілдірілген протоколдарын әзірлеу, көпдеңгейлі сипаттау әдістері және тұрақты модификаторларды ұзақ мерзімді далалық валидациялау қажеттілігі сияқты негізгі ғылыми олқылықтар мен болашақ зерттеу бағыттары анықталды. Осы шолудың нәтижелері тұрақты және ұзақ мерзімді жол инфрақұрылымын дамыту үшін ғылыми негіз болып табылады.

Түйін сөздер: *модификацияланған битум, гибридті модификациялау жүйелері, инженерлік битум, қайта өңдеу, экология№*

Сведение об авторах

Асылан Айдинович Уалиханов* – докторант кафедры «Химия и экология», Шәкәрім университет, город Семей, Республика Казахстан; e-mail: icetea3221337@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-0405-1027.

Нұржан Бекарыс – студент ОП 6В05301 кафедры «Химия и экология», Шәкәрім университет, город Семей, Республика Казахстан; e-mail: nurzanbekarys2007@gmail.com.

Альфира Нуржановна Сабитова – Шәкәрім университет, PhD, заведующий кафедрой «Химия и экология», Семей, Казахстан. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3360-7998.

Жанна Шәріпханқызы Шәріпхан – докторант кафедры «Химия и экология», Шәкәрім университет, город Семей, Республика Казахстан. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2484-7287.

Нурлан Мухамедияров – докторант кафедры «Химия и экология», Шәкәрім университет, город Семей, Республика Казахстан. ORCID https://orcid.org/0000-0001-5073-5978.

Авторлар туралы мәліметтер

Асылан Айдинович Уалиханов* – «Химия және экология» кафедрасының докторанты, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: icetea3221337@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-0405-1027.

Нұржан Бекарыс – «Химия және экология» кафедрасының 6В05301 ОБ студенті, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: nurzanbekarys2007@gmail.com.

Альфира Нұржанқызы Сабитова – Шәкәрім университет, PhD, «Химия және экология» кафедрасының меңгерушісі, Семей, Қазақстан; e-mail: alfa-1983@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3360-7998.

Жанна Шәріпханқызы Шәріпхан – «Химия және экология» кафедрасының докторанты, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2484-7287.

Нурлан Мухамедияров – «Химия және экология» кафедрасының докторанты, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы. ORCID https://orcid.org/0000-0001-5073-5978.

Information about the authors

Asylan Ualikhanov* – PhD student at the Department of «Chemistry and Ecology», Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: icetea3221337@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-0405-1027.

Nurzhan Bekarys – student of the EP 6B05301, Department of «Chemistry and Ecology», Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: nurzanbekarys2007@gmail.com.

Alfira Sabitova – Shakarim University, PhD, head of the department «Chemistry and ecology», Semey, Kazakhstan; e-mail: alfa-1983@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3360-7998.

Zhanna Sharipkhan – PhD student at the Department of «Chemistry and Ecology», Shakarim University, Republic of Kazakhstan. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2484-7287.

Nurlan Mukhamediarov – PhD student at the Department of «Chemistry and Ecology», Shakarim University, Republic of Kazakhstan. ORCID https://orcid.org/0000-0001-5073-5978.

Received 30.01.2026
Revised 05.03.2026
Accepted 05.03.2026

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

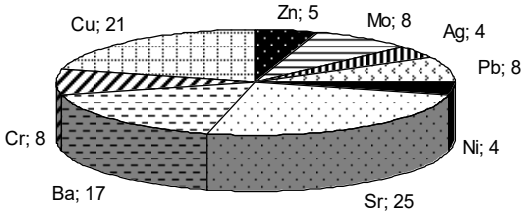
М.А. Смагулов[1*], С.А. Зайцев[2], М.М. Искакова[1], А.К. Каримов[3]
[1]Шәкәрім университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинка к-сі, 20 А
[2]Мәскеу мемлекеттік университеті,
119991, Ресей Федерациясы, Мәскеу, Ленин таулары, 1-үй
[3]әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,
050040, 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 zhәne gipolipidemiyalyқ belsendiligi / A.A. Kurmukov. – Almaty: Bastau, 2007. – 148 b.
2. Khrustaleva M.A. Tabiғi zhәne antropogendik landshaft komponentterindegi auyr metaldardyң biogeokhimiyalyқ kөshi-қony zhәne zhinaқtaluy / M.A. Khrustaleva // 3-shi Khalyқaralyқ ғylymi konferentsiyanyң ғylymi eңbekter zhinaғy. – Semei қ.: SMU baspasy Shәkәrim, 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.

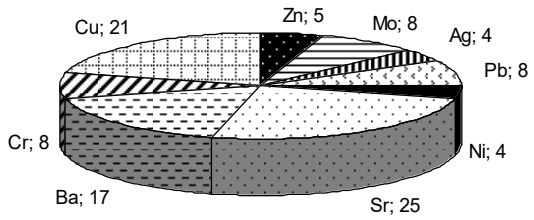


Рисунок 1 – Распределение содержания тяжелых металлов во льду водохранилищ Москворецкой системы

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.

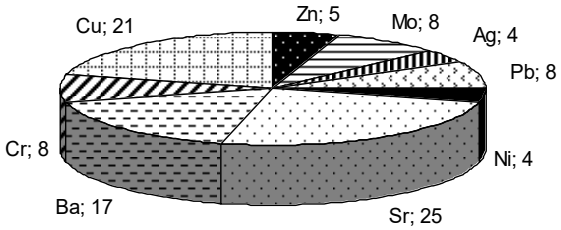


Figure 1 – Distribution of heavy metals in the ice of reservoirs of the Moskvoretskaya system

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 – С ОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТТАНДЫРУ ЖӘНЕ АҚПАРАТТЫҚ ТЕХНОЛОГИЯЛАР

АВТОМАТИЗАЦИЯ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

А. Хабай, Е.А. Тулешов, Н.Т. Тұрар, Ж.Н. Исабеков, А.Е. Назырова
5G МОБИЛЬДІ ЖҮЙЕЛЕРІНДЕ ТОКТЫҚ РЕЖИМДЕ ЖҰМЫС ІСТЕЙТІН ҚУАТ КҮШЕЙТКІШІНІҢ ЖҰМЫС ТИІМДІЛІГІНЕ ТАЛДАУЫ..... 6

А.Е. Кулакаева, А.З. Айтмагамбетов, Е.А. Дайнеко, Г.Т. Джаканова, Б.А. Кожахметова
К ВОПРОСУ О НЕОБХОДИМОСТИ ВНЕДРЕНИЯ ЦИФРОВОГО ЗВУКОВОГО ВЕЩАНИЯ В РЕСПУБЛИКЕ КАЗАХСТАН…… 14

B. Orazbayev, Y. Izbassarov, S. Santeyeva, Sh. Kodanova, B. Utenova
DEVELOPMENT OF LINGUISTIC MODELS FOR EVALUATING QUALITY INDICATORS OF BENZENE AT THE OUTLET OF THE BENZENE COLUMN IN A FUZZY ENVIRONMENT…….. 26

А.Т. Ахмедиярова, А.Т. Аяпбергенова, Ж.М. Алибиева, Н.К. Мукажанов, Ж.Н. Исабеков
УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ТРАНСФОРМЕРНЫЙ ФРЕЙМВОРК ДЛЯ АНАЛИЗА И ГЕНЕРАЦИИ ТЕКСТА…. 36

М.С. Мурушкин, К.С. Бактыбеков, Б.Р. Жумажанов, А.Е. Кулакаева
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАЗЕМНОЙ АНТЕННЫ С ДВУХДИАПАЗОННЫМ S/X ОБЛУЧАТЕЛЕМ…….. 46

Д.Т. Алдашева, О.С. Салыкова, М.Ю. Зарубин, Т.А. Жуаспаев, М.Д. Мусина
EXPLAINABLE AI ДЛЯ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ПРОГНОЗОВ НЕЙРОСЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ ПРЕДИКТИВНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ…….. 55

Б.К. Абдураимова, А.Е. Нұрмұханбетова
АҚПАРАТТЫҚ-КОММУНИКАЦИЯЛЫҚ ОРТАДАҒЫ ЗИЯНДЫ БАҒДАРЛАМАЛАРДЫ АНЫҚТАУҒА АРНАЛҒАН ТЕРЕҢ ОҚЫТУҒА НЕГІЗДЕЛГЕН ИНТЕЛЛЕКТУАЛДЫ ГИБРИДТІ МОДЕЛЬДЕР 64

Г.А. Султанова, Б.-Б.С. Есмагамбетов, А.А. Мусабеков, Г.Е. Тилеуов, Р.А. Советбаев[3]
АҚПАРАТТЫҚ-ӨЛШЕУ ЖҮЙЕЛЕРІНДЕ ДЕРЕКТЕРДІ ҚЫСУ ӘДІСТЕРІН ЗЕРТТЕУ..... 74

Д.Т. Тюлемисова, А.К. Шайханова, В.П. Марценюк, Г.Б. Бекешова, Б.Т. Смаилова
ОПТИМИЗАЦИЯ МОДЕЛЕЙ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ДЕТЕКЦИИ ФЕЙКОВЫХ НОВОСТЕЙ: ПОДБОР ГИПЕРПАРАМЕТРОВ И АНАЛИЗ ROC-КРИВЫХ…… 83

Т.С. Жылқыбаев, Е.Р. Советбаев, А.Д. Золотов, Д.В. Мясоедов, К.У. Зенкович
ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ В УЧЕБНЫХ ЛАБОРАТОРИЯХ ПО АВТОМАТИЗАЦИИ... 92

Z.B. Sadirmekova, B.Kh. Abdygalym, M.A. Sambetbayeva, R. Taberkhan, I.A. Karbozova
AN AI-DRIVEN THREE-STAGE FRAMEWORK FOR DYNAMIC INTEGRATION OF EMERGING CONCEPTS INTO ONTOLOGIES…… 101

К.М. Сагиндыков,Ф.Б. Тебуева, Н.Ж. Мукушева
КИБЕРФИЗИКАЛЫҚ ЖҮЙЕЛЕРГЕ ЖАСАЛАТЫН КӨПВЕКТОРЛЫ ШАБУЫЛДАР: МЕХАНИЗМДЕРІ, АНЫҚТАУ ЖӘНЕ ҚОРҒАУ МЫСАЛДАРЫ..... 110

Z.A. Kutpanova, D.O. Kozhakhmetova, K.M. Suleymenov, G.N. Baiseitov, D.N. Shandronov
OPTIMIZATION OF FLIGHT TRAJECTORIES OF UNMANNED AERIAL VEHICLES WITH GIVEN FINAL CONDITIONS…… 118

М.Ж. Ергеш, Б.Ж. Ергеш, А.Р. Оразаева, А. Талгат
ПОСТРОЕНИЕ И ЛИНГВИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВОПРОСНО-ОТВЕТНОГО КОРПУСА KAZAKH HISTORYQA…… 126

Б.С. Сарсенов, Д. Жамангарин
ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ В СИСТЕМЕ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ДОСТУПОМ КОНГРЕСС-ХОЛЛА «АУЛИЕ-АТА»…… 135

А.С. Инчин, А.Е. Кулакаева, М.П. Сайганов, Ш.С. Болат
ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ИНТЕГРАЦИИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛОСКИХ GSM-АНТЕНН В ЭЛЕКТРОННОЙ НАВИГАЦИОННОЙ ПЛОМБЕ…….. 145

А.К. Дуйсенбаева, Д.О. Кожахметова, А.Д. Золотов, Д.В. Мясоедов, Р.Н. Назаров
РАЗРАБОТКА ВЕРИФИЦИРОВАННОЙ СИМУЛЯЦИОННОЙ МОДЕЛИ КОРПОРАТИВНОЙ СЕТИ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ «PACKET TRACER» В ЦЕЛЯХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ…… 156

Н.М. Сисенов, Г.Б. Улюкова, Д.Ж. Сатыбалдина, А.К. Шайханова
ISO/IEC 25010:2023, MCDM ЖӘНЕ МАШИНАЛЫҚ ОҚЫТУДЫ ҚОЛДАНА ОТЫРЫП, АҚПАРАТТЫҚ ЖҮЙЕЛЕРДІҢ ГИБРИДТІ СЕНІМДІЛІГІН БАҒАЛАУ..... 165

А.Н. Молдагулова, Д.Н. Тұрмаханбет, М.А. Мауленбеков, Ж.Б. Кальпеева, Р.К. Ускенбаева
МОНИТОРИНГ КАЧЕСТВА ВОЗДУХА В АВТОБУСАХ АЛМАТЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ IOT-УСТРОЙСТВ И МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ…… 179

A. Tynykulova, A. Bekenova, Y. Yerbayev, I. Bapiyev, K. Bakenova
APPLICATION OF ECONOMIC AND MATHEMATICAL MODELING FOR MANAGING THE PRODUCTION AND ECONOMIC ACTIVITIES OF AGRICULTURAL ENTERPRISES…….. 189

Ә.Ж. Жамбулатова, Қ. Әлімхан
АЙНЫМАЛЫ УАҚЫТ КІДІРІСІ БАР КОММУТАЦИЯЛАНАТЫН СЫЗЫҚТЫҚ ЕМЕС ЖҮЙЕЛЕРДІ КҮЙ-КЕРІ БАЙЛАНЫСПЕН БАСҚАРУ..... 200

Y.Sh. Zhursinbek, B.Sh. Zhursinbek, A.K. Maidanov, Sh.Zh. Seilov, A.V. Ermakov
IMPLEMENTATION OF THE «IMAGE TO DATA» CONVERTER FOR IMPROVING INFORMATION SECURITY…… 206

A. Kenzhebay, A. Tynykulova, G. Yensebayeva, S. Zhakypbekov, K. Bakenova
ALGORITHMS FOR SOFTWARE COMPENSATION OF TORSIONAL VIBRATIONS IN H-BOT 3D PRINTERS BASED ON FILTERED B-SPLINES…… 214

Zh.B. Lamasheva, M.A. Sambetbayeva, A.N. Nekessova, B.Kh. Abdygalym, N. Tasbolatuly
INTELLIGENT FAKE NEWS DETECTION SYSTEM BASED ON ONTOLOGICAL MODEL AND SEMANTIC MARKUP OF MEDIA TEXTS…… 225

МАШИНА ЖАСАУ ЖӘНЕ МЕХАНИКА

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МЕХАНИКА

А.Е. Исмайылов, Ж.Т. Айтуганова, Ж.Б. Полатова, М.М. Сыдыкова
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И АНАЛИЗ ДВУХКОНТУРНОЙ СИСТЕМЫ РУЛЕВОГО УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА С ГЕОМЕТРИЕЙ АККЕРМАНА…… 235

А.Т. Рахметоллаева, Д.А. Әскержанов, Н.Е. Қадырболат, А. Ерболұлы, Р.К. Құрманғалиев
ЭЛЕКТРОЛИТТІ-ПЛАЗМАЛЫҚ ҚАТАЙТУ КЕЗІНДЕГІ 65Г БОЛАТ ҚҰРЫЛЫМЫНЫҢ ӨЗГЕРІСІ..... 245

N. Kadyrbolat, R. Kurmangaliyev, Kussainov, Z. Satbayeva, D. Zhasbolatov
DEVELOPMENT OF A METHOD FOR CALCULATING THE VAPOR-GAS ENVELOPE THICKNESS AND STUDYING THE INFLUENCE OF CATHODIC HEATING PROCESS ENERGY CHARACTERISTICS ON THE VAPOR–GAS ENVELOPE THICKNESS…… 252

Ye. Shayakhmetov, R. Sovetbayev, K. Ozhmegov, A. Bilyalov, A. Nurbekov
EFFICIENCY OF USING POLYMER CONVEYOR ROLLERS AND COMPARATIVE ANALYSIS OF THEIR MANUFACTURING TECHNOLOGIES…… 259

Д.А. Әскержанов, Р.К. Кусаинов, В.Н. Коц, К.Д. Орманбеков, А.Б. Шынарбек
РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО КИСЛОРОДНО-ТОПЛИВНОГО НАПЫЛЕНИЯ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ…….. 267

Т.С. Жылқыбаев, Р.А. Советбаев, Г.М. Кудайбергенова, Е.Р. Советбаев, К. Ожмегов
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЗАЗОРОВ В МЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЧАХ НА ТОЧНОСТЬ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ПРИВОДА..... 276

ТАМАҚ ИНЖЕНЕРИЯСЫ ЖӘНЕ БИОТЕХНОЛОГИЯ

ПИЩЕВАЯ ИНЖЕНЕРИЯ И БИОТЕХНОЛОГИЯ

Б.К. Асенова
ЙОДПЕН БАЙЫТЫЛҒАН ЕТТЕН ЖАСАЛҒАН ШҰЖЫҚ ӨНІМДЕРІНІҢ ТЕХНОЛОГИЯСЫ…….. 285

М.А. Жамантай, С.А. Карденов, А.Е. Қайыркелді
ИТМҰРЫН ҰНТАҒЫНЫҢ ҚҰС ЕТТЕРІНЕН ЖАСАЛҒАН КОТЛЕТТЕРДІҢ ТҮСІНЕ ӘСЕРІ..... 294

А.К. Мустафаева, З. Қуанышева, Б. Калемшарив, Г.Ж. Шарикбаева, Г.Б. Абдилова
СҮЗБЕ САРЫСУЫНАН ӘЗІРЛЕНГЕН СУСЫННЫҢ РЕЦЕПТУРАСЫН ЖЕТІЛДІРУ..... 305

Я.М. Узаков, Р.Р. Имамдунов, Р.К. Байгабылов, А.С. Красников, Ч.К. Авылов
ВЛИЯНИЕ ПСИЛЛИУМА И ПОРОШКА БРУСНИКИ НА КАЧЕСТВЕННЫЕ И МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПАШТЕТА ИЗ ВЕРБЛЮЖАТИНЫ…… 314

С.Г. Каманова, Г.Д. Акшораева, Б. Калемшарив, Г.Х. Оспанкулова
ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И ОРГАНОЛЕПТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАСТИТЕЛЬНЫХ НАПИТКОВ ИЗ ЗЕРНА НЕТРАДИЦИОННЫХ КУЛЬТУР……. 325

А.К. Кекибаева, С.Ш. Асрандина, С.Д. Атабаева, Г.И. Байгазиева, А.К. Ныгыметова
ИЗОТОНИКАЛЫҚ СУСЫНДАР ӨНДІРІСІ ТЕХНОЛОГИЯСЫНДА СТЕВИЯ СЫҒЫНДЫСЫН ҚОЛДАНУ..... 332

А.К. Суйчинов, Ж.С. Есимбеков, Д.К. Дукенбаев
УЛЬТРАДЫБЫСТЫҚ ӨҢДЕУДІҢ СИЫР ҚАРЫНЫНЫҢ ҚҰРЫЛЫМДЫҚ-МЕХАНИКАЛЫҚ ЖӘНЕ ФУНКЦИОНАЛДЫҚ ҚАСИЕТТЕРІНЕ ӘСЕРІ 341

М.Ф. Садыкова, Ш.А. Абжанова
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА НАЦИОНАЛЬНОЙ МЯСНОЙ ПРОДУКЦИИ ЖАЯ ИЗ КОНИНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОДНОГО ЭКСТРАКТА БРУСНИКИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВЕННЫХ И ОРГАНОЛЕПТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ…….. 348

Г.Н. Нұрымхан, Н.Р. Муслимова
ЕТ ШИКІЗАТЫНАН АЛЫНҒАН ЖАРТЫЛАЙ ФАБРИКАТТЫҢ ТАҒАМДЫҚ ҚАСИЕТІ МЕН САҚТАЛУ МЕРЗІМІНЕ РАДИАЦИЯЛЫҚ ӨҢДЕУДІҢ ӘСЕРІ 357

А.К. Суйчинов, Ж.С. Есимбеков, Г.А. Капашева
ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЯСО-КОСТНОГО СЫРЬЯ ПТИЦЫ ПОСЛЕ ФЕРМЕНТАТИВНОЙ ОБРАБОТКИ ПЕПСИНОМ…… 364

Z. Apsalikova, K. Amirkhanov, S. Gaptar, A. Baikadamova
STUDY OF HEAVY METAL AND RADIONUCLIDE CONTENT IN MEAT RAW MATERIALS DEPENDING ON THE TYPE OF THERMAL PROCESSING…….. 374

Ж.Б. Жуман, Н.С. Ханжаров, Д.А. Бараненко, Б.Т. Абдижаппарова
ЖЫЛҚЫ ЕТІ ФУНКЦИОНАЛДЫҚ ТАМАҚТАНУДЫҢ КЕЛЕШЕГІ ЗОР КОМПОНЕНТІ РЕТІНДЕ: ҒЫЛЫМИ ШОЛУ..... 380

Ф.Х. Смольникова, Г.К. Наурзбаева, М.Б. Ребезов, Б.К. Асенова, Э.К. Окусханова
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА МАСЛООБРАЗОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНЦЕНТРАТА СЫВОРОТОЧНЫХ БЕЛКОВ КСБ-60..... 390

Zh. Shadyarova, D. Kurmangaliyeva, A. Daribayeva, N. Sarsembayeva, S. Toleubekova
FERMENTED TILAPIA FISH PATTIES: A MULTILEVEL BIOTECHNOLOGICAL, SPECTROSCOPIC, AND MICROSTRUCTURAL ANALYSIS…….. 399

Ж.Қ. Оспанова, Л.К. Асамбаева, Ж.Ш. Рахимбердиева, М.Д. Касимбекова
ЛЕҢГЕР ӨЗЕНІНІҢ СУ БИОЦЕНОЗДАРЫНА ФОСФОРҚҰРАМДЫ ҚАЛДЫҚТАРЫНЫҢ ӘСЕРІН БИОИНДИКАЦИЯЛАУ 406

Ә.М. Айтпан, Э.К. Асембаева, А.Е. Рябова, А.Ж. Божбанов, А.Б. Есенова
ZIZIPHUS JUJUBA MILL. ЖЕМІСТЕРІНІҢ ҰНТАҒЫ – ФУНКЦИОНАЛДЫҚ ӨСІМДІК ИНГРЕДИЕНТІ.... 415

Ж.М. Атамбаева, Ж.С. Есимбеков, Г.А. Капашева
БИДАЙ, ЖАСЫЛ ҚАРАҚҰМЫҚ ЖӘНЕ СҰЛЫ ДӘНДЕРІН ӨНУ ҮРДІСІНДЕГІ ФИЗИКА-ХИМИЯЛЫҚ КӨРСЕТКІШТЕРІН ЗЕРТТЕУ..... 423

Б.М. Хамитова, А.Р. Тасполтаева, Ж.Б. Калдыбекова, Б.М. Искаков, М.Т. Мурсалыкова
БАҚША ӨСІМДІКТЕРІ ТҰҚЫМДАРЫНАН ӨСІМДІК МАЙЫН АЛУ МҮМКІНДІГІН ЗЕРТТЕУ 433

К.Ж. Амирханов, А.А. Даутова, С.К. Касымов, Ж. Калибекқызы, Э.К. Окусханова
ФУНКЦИОНАЛДЫҚ ЖӘНЕ ТӨМЕН КАЛОРИЯЛЫ ЕТ ӨНІМДЕРІ..... 441

Ж.Е. Жеңісбекова, Р.Д. Абишева, Ж.А. Ибатаев, А.К. Канабекова, А.К. Игенбаев
МАЙҚАН БАЛЫҒЫНАН ЖАСАЛҒАН ПРЕСЕРВІНІҢ ОРГАНОЛЕПТИКАЛЫҚ КӨРСЕТКІШТЕРІНЕ ЖӘНЕ ФИЗИКА-ХИМИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІНЕ ДАРШЫН ИТМҰРЫНЫ (ROSA CINNAMOMEA) ЭКСТРАКТІСІНІҢ ӘСЕРІ..... 446

А.А. Даутова, К.Ж. Амирханов, Ж. Калибекқызы, С.К. Касымов, А.О. Майжанова
ӨСІМДІК ҚОСПАСЫ ҚОСЫЛҒАН КАЛОРИЯСЫ ТӨМЕН ПІСІРІЛГЕН ШҰЖЫҚ ТЕХНОЛОГИЯСЫН ЖЕТІЛДІРУ…… 453

А.О. Утегенова, А.С. Камбарова, З.В. Капшакбаева, Ж.М. Атамбаева, Б.М. Кулуштаева
ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА МЕТОДА И МАТЕРИАЛА ДЛЯ ИММОБИЛИЗАЦИИ ФЕРМЕНТОВ…… 461

И.Р. Садырбаева, Б.М. Хамитова, М.Ә. Тұрлыбек, И.А. Махатова, А.К. Игенбаев
БАЙЫТЫЛҒАН СҮЗБЕ ӨНІМДЕРІ ӨНДІРІСІНДЕ ЖЕРГІЛІКТІ ӨСІМДІК ШИКІЗАТЫН ПАЙДАЛАНУ.... 469

A.M. Tayeva, Zh. Kalibekkyzy, A.Kh. Beisembaeva, N.K. Abilmazhinova, M.A. Absalimova
STUDY OF PHYSICAL, CHEMICAL AND MICROBIOLOGICAL INDICATORS OF HAM FROM THE MEAT OF CULLED COWS, ENRICHED WITH SELENIUM AND ZINC…… 477

А.К. Мустафаева, Г.Т. Кажибаева, Ш.Б. Байтукенова,Г.Б. Абдилова, Е.Т. Кажибаева
БИОЛОГИЯЛЫҚ ҚОСПАЛАРДЫ ҚОЛДАНУ АРҚЫЛЫ ДАЙЫНДАЛҒАН ШҰЖЫҚ ӨНІМДЕРІНІҢ ҚҰРЫЛЫМДЫ-МЕХАНИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ..... 486

ТЕХНИКАЛЫҚ ФИЗИКА ЖӘНЕ ЖЫЛУЭНЕРГЕТИКАСЫ

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА И ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

Ж.К. Алдажуманов, Е.Н. Мясоедова, Д.В. Мясоедов, К.С. Зарыкбаева, А.Е. Сатыбалдинова
СЕМЕЙ ҚАЛАСЫНДАҒЫ ТҰРҒЫН ҮЙДІҢ ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ АУДИТІ..... 497

А.Қ. Садықова, А.К. Ниязбаев, М.Ж. Хазимов
ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ СОЕВОЙ ОКАРЫ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ТЕПЛОВОЙ ПРОЦЕСС ВИХРЕВОЙ СУШКИ…….. 509

А.Н. Шалаганова, О.А. Степанова, М.В. Ермоленко, А.Р. Хажидинова, Е.П. Евлампиева
ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ НА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МОДИФИЦИРОВАННЫХ АНТИФРИЗОВ – ОБЗОР…….. 522

Ш.Р. Курбанбеков, Д.Р. Патчаханов, С.Х. Камбарбеков, Б.С. Калдар
ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОКРЫТИЙ ZRCN ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПАРАМЕТРОВ HVOF-ПРОЦЕССА..... 538

М.Қ. Жамбаева, О.А. Степанова, А.Б. Касымов, М.В. Ермоленко, К.С. Астемесова
МЕТАЛДАРДЫ КЕСУДЕГІ MQL ЖАҒДАЙЫНДА МАЙЛАУ-СУЫТУ СҰЙЫҚТЫҚТАРЫНЫҢ ЖЫЛУФИЗИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН ОҢТАЙЛАНДЫРУ..... 547

А.Р. Хажидинова, К.С. Зарыкбаева, Е.Н. Мясоедова, А.Е. Сатыбалдинова, С.Л. Елистратов
ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ УГОЛЬНОГО КОТЛА НА ОСНОВЕ РЕЦИРКУЛЯЦИИ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ..... 565

А.Б. Касымов, Т.Н. Умыржан, А.А. Бектемисов, Ж.Қ. Акишов, Д.Н. Нургалиев
ВЛИЯНИЕ ГИБРИДНЫХ НАНОЧАСТИЦ TiO_2 - Al_2O_3 НА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ..... 573

Д.А. Әскержанов, Р.К. Кусаинов, А.Ж. Жасұлан, К.Д. Орманбеков, А.Б. Шынарбек
HVOF ӘДІСІМЕН АЛЫНҒАН CR_3C_2 – NICR ЖАБЫНДАРЫНЫҢ ҚҰРЫЛЫМДЫҚ, ТРИБОЛОГИЯЛЫҚ ЖӘНЕ КОРРОЗИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІ..... 580

Н.Т. Рустамов, О.Д. Меирбекова, Н.Б. Мухамеджанов, А.Н. Бергузинов
ЛОКАЛЬНАЯ ФРАКТАЛЬНАЯ СОЛНЕЧНАЯ ТЕПЛОВАЯ СТАНЦИЯ..... 589

ХИМИЯЛЫҚ ТЕХНОЛОГИЯ

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

М. Төлегенқызы, Р.А. Нарманова, А. Серікқұл, Н.М. Мұхиддин, Н.О. Аппазов
КҮРІШ ҚАУЫЗЫНАН АЛЫНҒАН КАЛЬЦИЙ СИЛИКАТЫ: СИНТЕЗ ЖӘНЕ АДСОРБЦИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ…….. 598

А.К. Баешова, С. Молайган, А.Б. Баешов, Р.М. Есетов, Б. Леска
СУЛЫ ЕРІТІНДІЛЕРДЕ АЛЮМИНИЙ ПЛАСТИНАСЫНДА СУТЕК БӨЛІНУ РЕАКЦИЯСЫНА ОРТАНЫҢ ӘСЕРІ..... 607

С.А. Батырбай, О.К. Бейсенбаев, А.С. Сидиков, Н.М. Дауренбек
МОДИФИКАЦИЯ ГУДРОНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГОССИПОЛОВОЙ СМОЛЫ И ВТОРИЧНОГО ПОЛИПРОПИЛЕНА…… 615

А.Н. Сабитова, Ж.Ш. Шәріпхан, Б.Б. Баяхметова, Б.С. Гайсина, Ж.К. Кабышева
ОБЗОР ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННОГО БИТУМА: ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ …… 620

А.М. Рахметова, Г.К. Алшынбекова, Э.А. Кульмагамбетова, Н.Т. Сагиндикова, А.Т. Шилменова
ӨҢДЕУ ӨНЕРКӘСІБІ ЖҰМЫСКЕРЛЕРІНІҢ ДЕНСАУЛЫҚ ЖАҒДАЙЫНА ӨНДІРІСТІК ОРТАДАҒЫ ХИМИЯЛЫҚ ФАКТОРЛАРДЫҢ ӘСЕРІ..... 636

D.Yu. Ostrovnaya, A.N. Dyuryagina, Yu.S. Byzova
MODERN APPROACHES TO THE USE OF MODIFIERS IN WATER-ACRYLIC FILM-FORMING SYSTEMS…… 646

S.N. Sagatova, Kh.S. Rafikova
PREPARATION AND ANALYSIS OF A BIODEGRADABLE POLYMER COMPOSITION BASED ON THERMOPLASTIC STARCH REINFORCED WITH STEARIC ACID-MODIFIED MICROCRYSTALLINE CELLULOSE…… 655

B.Sh. Khassankhojayeva, G.F. Sagitova, G.A. Takibayeva, S.Zh. Yegemberdiyeva, A.T. Kabylbekova
OPTIMIZATION OF RECIPES OF DEVELOPED RUBBER MIXTURES TAKING INTO ACCOUNT THE EVALUATION OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES…… 664

Ш.Т. Султахан, Ә. Әбдісаттар, Қ. Тажу, А. Коробейник, С. Азат
ЭНЕРГИЯ САҚТАУ ҚҰРЫЛҒЫЛАРЫНЫҢ СЫЙЫМДЫЛЫҚ ӨНІМДІЛІГІН АРТТЫРУ ҮШІН MXENE МОДИФИКАЦИЯЛАУ ӘДІСТЕРІ..... 675

А.М. Қожахметова, М.Н. Сыздыкова
БАКТЕРИЯЛЫҚ $Fe_2(SO_4)_3$ ЖӘНЕ БЕНТОНИТ НЕГІЗІНДЕГІ КЕШЕНДІ ҚҰРАМДЫ ҚОЛДАНУ АРҚЫЛЫ АҒЫНДЫ СУЛАРДЫ ТАЗАЛАУ ТИІМДІЛІГІН ЗЕРТТЕУ..... 685

М. Әліпұлы, Ш. Султахан, Е. Есжан, У. Жантикеев, К. Шакенов
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НАНОКОМПОЗИТОВ $Ti_3C_2T_X$/SI, ПОЛУЧЕННЫХ МЕХАНОХИМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ..... 692

A.M. Belkozhayev, A. Abaildayev, B.D. Kossalbayev, N. Gizatullina, G. Toleutay
COMPARATIVE STRUCTURAL AND PHYSICOCHEMICAL ANALYSIS OF PLANT-DERIVED CELLULOSE FROM AGRICULTURAL RESIDUES AND BACTERIAL CELLULOSE..... 702

А.Б. Джумагазиева, Ж.А. Искакбаева, У.Е. Жантикеев, К.С. Бексеитова, С. Азат
ОЧИСТКА ВОДЫ МЕТОДОМ ХОЛОДНОЙ ПЛАЗМЫ: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА БАКТЕРИЦИДНОГО ДЕЙСТВИЯ..... 714

Н.Е. Жабаева, Ш.Н. Жумагалиева, Ж.А. Абилов, А.Д. Газизов
БЕНТОНИТ И ГУМИНОВЫЕ ВЕЩЕСТВА: СОСТАВ, СВОЙСТВА И МЕДИЦИНСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ. 723

А.А. Каныкешова, Е.Н. Есжан, Л.Н. Сеймуханова, М.С. Кунарбекова, Ж. Токтарбай
АДСОРБЦИОННЫЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТНОГО СОРБЕНТА НА ОСНОВЕ АКТИВИРОВАННОГО УГЛЯ И ПРИРОДНОГО ЦЕОЛИТА ПРИ ОЧИСТКЕ ВОДЫ..... 741

Г.Е. Ергазиева, І. Қуаныш
СИЛИКАТНЫЕ СОРБЕНТЫ ДЛЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО УЛАВЛИВАНИЯ CO_2: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ..... 752

Д.Р. Мулдаш, А.Р Кажмуратов, Ж.Т. Кули, А.Ж. Байменов, С. Азат
ВЛИЯНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ КРЕМНИЙСОДЕРЖАЩИХ ДОБАВОК НА СИНТЕЗ И СТРУКТУРУ MAX-ФАЗЫ..... 767

А.О. Оразымбетова, Г.Ф. Сагитова, А.С. Сидиков, С.А. Сакибаева, А.Ж. Суйгенбаева[1]
ШАНҚАНАЙ КЕН ОРНЫ ЦЕОЛИТТЕРІН РЕЗИНА ӨНДІРІСІНДЕ ҚОЛДАНУ..... 776

A. Ualikhanov, B. Nurzhan, A. Sabitova, Z. Sharipkhan, N. Mukhamediyarov
HYBRID MODIFICATION OF BITUMEN FOR DURABLE AND SUSTAINABLE ASPHALT PAVEMENTS 788

АВТОРЛАРҒА АРНАЛҒАН ЕРЕЖЕ..... 800

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ..... 805

RULES FOR AUTHORS..... 810

Басуға жіберілген күні 31.03.2026 ж. Пішімі 60х84 1/8
Шартты баспа табағы 51,3
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