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

№2 (22)
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 ХАБАРШЫСЫ ТЕХНИКА ҒЫЛЫМДАР

ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛ

ВЕСТНИК УНИВЕРСИТЕТА ШАКАРИМА ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

BULLETIN OF SHAKARIM UNIVERSITY TECHNICAL SCIENCES

SCIENTIFIC JOURNAL

№ 2 (22) 2026

Семей, 2026

Ғылыми журнал
«Шәкәрім Университетінің Хабаршысы.
Техникалық ғылымдар сериясы»

№ 2 (22) 2026

Меншік иесі:
«Шәкәрім университеті» Коммерциялық емес акционерлік қоғамы

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

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

РЕДАКЦИЯЛЫҚ АЛҚА

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

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

Жазылу индексі: 76172

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

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

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

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

Научный журнал
«Вестник Университета Шакарима. Серия технические науки»

№ 2 (22) 2026

Собственник:
Некоммерческое акционерное общество «Шәкәрім университет»

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

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

Подписной индекс: 76172

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

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

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

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

Scientific journal
«Bulletin of Shakarim University. Technical Sciences»

№ 2 (22) 2026

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

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

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

EDITORIAL BOARD

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

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

Subscription index: 76172

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

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

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

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

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-1

ҒТАХР: 28.23.29

CC BY 4.0
Check for updates

А.К. Кереев[1], К.П. Аман[1], З.К. Калкабаева[1], С.М. Мұхтар[1], Е.А. Оспанов[2]*
[1]Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті,
030000, Қазақстан Республикасы, Ақтөбе қ., Ә. Молдағұлова д., 34
[2]Шәкәрім университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинка к-сі, 20 А
*e-mail: y.ospanov@shakarim.kz

КОМПЬЮТЕРЛІК КӨРУ НЕГІЗІНДЕ ЖАТТЫҒУЛАРДЫ ТАНУ ЖӘНЕ ОРЫНДАУ ТЕХНИКАСЫН БАҒАЛАУ ӘДІСТЕРІ

***Аңдатпа*:** *Қазіргі таңда спорт пен дене шынықтыру саласында жаттығу процесінің тиімділігін арттыру, жарақат алу қаупін төмендету және оқыту мен жаттықтыруды жекелендіру мәселелері өзекті болып отыр. Осыған байланысты жасанды интеллект (ЖИ) пен компьютерлік көру технологияларын қолдану негізінде физикалық жаттығуларды автоматтандырылған түрде талдау және бағалау бағытындағы зерттеулер қарқынды дамуда. Аталған технологиялар адамның қозғалысын нақты уақыт режимінде қадағалап, биомеханикалық параметрлерді дәл анықтауға мүмкіндік береді.*

Бұл жұмыста физикалық белсенділікті тануға, жаттығуларды орындау техникасын талдауға және пайдаланушыларға жедел кері байланыс ұсынуға арналған компьютерлік көруге негізделген интеллектуалды фитнес көмекшісін әзірлеу қарастырылады. Ұсынылған жүйе терең оқыту әдістеріне сүйене отырып, Ultralytics YOLO архитектурасын және OpenCV кітапханасын қолдану арқылы жүзеге асырылды. Жүйе дененің негізгі нүктелері мен буындарын анықтап, олардың кеңістіктік орналасуын талдау арқылы жаттығулардың орындалу дұрыстығын бағалайды, қайталау санын есептейді және тиімділік көрсеткіштерін анықтайды.

Зерттеу барысында әртүрлі жаттығу қозғалыстарын қамтитын бейне деректер жиыны жиналып, алдын ала өңделді және аннотацияланды. Терең нейрондық желі модельдері оқытылып, олардың дәлдігі мен өнімділігі бағаланды. Сонымен қатар, биомеханикалық модель негізінде дене бөліктеріне түсетін жүктемелер есептеліп, қозғалыс сапасын жақсартуға арналған түзету ұсыныстары қалыптастырылды.

Эксперименттік нәтижелер ұсынылған жүйенің жаттығуларды тану дәлдігі жоғары екенін және нақты уақыт режимінде тиімді жұмыс істейтінін көрсетті. Әзірленген бағдарламалық шешім үйде жаттығу жасаушы адамдарға, спортшыларға, жаттықтырушыларға және дене шынықтыру саласындағы мамандарға жаттығу процесін бақылау мен оңтайландыруда қосымша құрал ретінде пайдалануға мүмкіндік береді. Зерттеу нәтижелері жасанды интеллект пен компьютерлік көру технологияларын фитнес және спорт саласында кеңінен қолданудың перспективалы екендігін дәлелдейді.

Түйін сөздер: *жасанды интеллект, компьютерлік көру, терең оқыту, YOLO архитектурасы, биомеханикалық талдау, жаттығуларды мониторингтеу, жекелендірілген жаттығу.*

Кіріспе

Спорт саласындағы жасанды интеллект (ЖИ) – бұл жаттығу бағдарламаларын құрудан бастап матч жеңімпазын болжауға дейінгі әртүрлі міндеттерді шешетін құралдар жиынтығы.

Спортта жетістік көбінесе ұсақ-түйек детальдарға байланысты болады: мысалы, теннистегі соққы беру кезінде қолдың еңкею бұрышы, жүгірушінің қадамының симметриясы немесе отырып-тұру жаттығуы кезінде тізенің тұрақтылығы. Жаттықтырушы көп нәрсені байқай алады, бірақ ең тәжірибелі маманның өзі қозғалыстың әрбір бұрышын нақты уақыт режимінде талдай алмайды.

©А.К. Кереев, К.П. Аман, З.К. Калкабаева, С.М. Мұхтар, Е.А. Оспанов, 2026

Міне, дәл осы жерде компьютерлік көру (Computer Vision, CV) технологиясы іске қосылады – бұл машиналарға адам қозғалысын зертханалық жағдайларға жақын дәлдікпен көруге, қадағалауға және талдауға мүмкіндік беретін технология. Бұл жай ғана қателерді анықтайтын құрал емес, камерасы бар кез келген құрылғыда қолжетімді биомеханикалық талдау құралы.

Жасанды интеллект пен компьютерлік көрудің үйлесімі арқасында спортшылар, жаттықтырушылар және физиотерапевтер бұрын қымбат биомеханикалық зертханаларды қажет еткен қозғалыстардың жүйелі, объективті және жан-жақты көрінісін ала алады.

Бұл зерттеудің негізгі мақсаты – физикалық белсенділікті тануға және пайдаланушыларға жекелендірілген жаттығу жоспарларын, позаны талдауды және нақты уақыттағы түзетулерді ұсынуға қабілетті жасанды интеллекттің компьютерлік көру тенологиясына негізделген фитнес көмекшісін әзірлеу. Бұл жүйе динамикалық, интеллектуалды және пайдаланушыға бағытталған платформаны қамтамасыз ету арқылы қолданыстағы фитнес шешімдерінің кемшіліктерін жоюға бағытталған.

Нақтырақ айтсақ, жүйе терең оқытуға негізделген объектілерді анықтауды қолдана отырып, жаттығу түрлерін дәл жіктеуге арналған. Жүйенің басты ерекшелігі-дұрыс емес қалыптарды анықтау және жарақат алу қаупін азайту және қозғалыс сапасын жақсарту үшін түзету ұсыныстарын ұсыну мүмкіндігі.

Зерттеудің мақсаты: физикалық жаттығуларды орындау техникасын автоматты түрде талдау және бағалау үшін компьютерлік көру мен терең оқыту әдістеріне негізделген интеллектуалды жүйені әзірлеу.

Зерттеу объектісі: адамның физикалық жаттығуларды орындау кезіндегі қозғалыстары мен дене бөліктерінің кеңістіктік орналасуы.

Зерттеу пәні: компьютерлік көру және терең нейрондық желілер негізінде биомеханикалық параметрлерді анықтау және талдау әдістері.

Ғылыми жаңалығы:

- жаттығуларды тану мен бағалауды біріктіретін кешенді тәсіл ұсынылды;
- YOLO архитектурасы негізінде нақты уақыттағы позаны бағалау әдісі жетілдірілді;
- Биомеханикалық модель арқылы дене бөліктеріне түсетін жүктемені есептеу және түзету ұсыныстарын генерациялау жүзеге асырылды.

Практикалық маңыздылығы: ұсынылған жүйе фитнес, спорт және дене шынықтыру саласында жаттығу техникасын бақылау, жарақаттың алдын алу және жекелендірілген ұсыныстар беру үшін қолданылуы мүмкін.

Зерттеу міндеттері:

- жаттығуларға арналған деректер жиынын жинау және аннотациялау;
- жаттығуларды тану моделін әзірлеу және оқыту;
- позаны бағалау алгоритмін іске асыру;
- биомеханикалық параметрлерді есептеу әдісін құру;
- жүйенің дәлдігін эксперименттік бағалау.

Гипотеза: компьютерлік көру мен терең оқыту әдістерін біріктіру жаттығу техникасын дәстүрлі әдістерге қарағанда дәлірек және жедел бағалауға мүмкіндік береді.

Әдебиеттерге шолу

Спортта компьютерлік көруді қолдануға деген қызығушылық он бес жыл бұрын пайда болған. Осы тақырыптағы алғашқы жан-жақты басылымдардың бірі – 2014 жылы жарық көрген T. B. Moeslund, G. Thomas және A. Hilton редакциялаған "Computer Vision in Sports" кітабы болды [1]. Бұл еңбек спортта компьютерлік көруді қолданудың кең спектрін қамтиды, соның ішінде допты бақылау, ойыншылардың орналасқан жері мен қалпын анықтау және түрлерін тану нақты оқиғалар мен спорт түрлері. Кітап халықаралық сарапшылардың жаңа идеяларын ұсына отырып және спорттық іс-шараның бүкіл өмірлік циклінде компьютерлік көруді қолданудың негізгі мәселелері мен әдістерін қарастыра отырып, осы саланың дамуына маңызды үлес қосты.

B.T. Naik-тің соавторлармен бірлесіп, жүргізген зерттеуі спортта компьютерлік көруді қолданудың кең спектрін көрсетеді [2]. Авторлар нысандарды анықтау және қадағалау, траекторияларды болжау және стратегияларды тану тапсырмаларын талдау арқылы

ойыншыларға және допқа бағытталған спорт түрлерін жіктейді. Зерттеу іске асырудың техникалық қиындықтарын, жасанды интеллект пен GPU платформаларын пайдалануды қарастырады және қол жетімді деректер жиынтығын талдайды. Шолу спорттағы визуалды тану саласындағы болашақ даму бағыттары мен ықтимал проблемаларды көрсетеді.

J. Smith және M. Johnson спорт индустриясында компьютерлік көруді қолданудың заманауи тенденциялары көптеген мүмкіндіктерді көрсетеді деп санайды [3]. Авторлар бұл технологияның жанкүйерлердің белсенділігін арттыру, төреші жұмыстарын автоматтандыру және оқу/жаттығу процесін оңтайландыру үшін пайдалануда мүмкіндіктерін атап өтеді. Оқу/жаттығу процесінде компьютерлік көру алгоритмдері спортшылардың қозғалысын талдау, техниканы оңтайландыру және жарақат алу қаупін азайту үшін қолданылады.

K. Lakshmi Joshitha және соавторлары үйдегі жаттығулар кезінде пайдаланушыларды бағыттау үшін ЖИ-ге негізделген визуалды кері байланысты пайдалана отырып, позаны түзету жүйесін әзірледі. Дегенмен, олардың үлгісінде модульдік масштабтау мүмкіндігі болмады [4].

Lakshay Gupta, Shrey Gurbuxani, and Kapil Madan өз жұмыстарында негізгі кері байланысты қамтамасыз ету үшін OpenCV және MediaPipe пайдаланатын виртуалды жаттықтырушыны ұсынды, дегенмен жүйе жас немесе салмақ сияқты пайдаланушының жеке параметрлеріне бейімделмеген [5].

Nuno Mateus ЖИ-тің спорт ғылымындағы жаттығу жүктемесін тиімділеудегі және жарақат алу қаупін азайтудағы, әсіресе кәсіби спортшылар арасындағы рөлін зерттеді. Түсінікті болғанымен, олардың жұмысы пайдаланушы бетін өңдеу жүйелеріне қарағанда өнімділікті талдауға көбірек көңіл бөлді [6]. .

R. Babitha Lincy физиологиялық деректерді пайдалана отырып, жаттығу залының өнімділігін болжауға арналған машиналық оқыту үлгісін ұсынды, бірақ жұмыста жаттығуларды тану және интерактивті нұсқаулық функционалдығы жетіспейді [7].

Н.И. Вельможко мен А.А. Бойко физикалық жаттығуларды тану техно-логияларының дамуына маңызды үлес қосты [8]. Өз зерттеулерінде олар нейрондық желілерді және Microsoft Kinect V. 2.0 3D бейне контроллерін пайдалана отырып, жаттығуларды тану алгоритмін әзірледі. Зерттеушілер тізе мен жамбас буындарындағы бұрыштарды талдау арқылы аяқтар үшін таңдалған алты жаттығуды тануға бағытталған бағдарлама әзірледі. Компьютерлік технологияларды қолдану жаттығуларды танудың өте жоғары дәлдігін анықтады, бұл физикалық жаттығуларды орындау техникасының дұрыстығын бағалауда осы технологияны одан әрі қолдану перспективаларын ашады. Бұл зерттеу адам қозғалысын талдауда компьютерлік көру мен машиналық оқытуды қолдану әлеуетін көрсетеді, бұл спорттық дайындықта да, оңалту бағдарламаларында да қолданылуы мүмкін.

Спортта компьютерлік көруді қолдану барған сайын әртүрлі болып келеді және спорттық іс-әрекеттің әртүрлі аспектілерін қамтиды. К.В. Герман, Т.В. Красноперова және А.А. Германова атап өткендей [9], спортта компьютерлік көруді қолдану негізінен үш бағытқа әсер етеді: жаттығу және бәсекелестік процестер, теледидарлық хабарлар және төрешілік. Оқу процесінде Бұл технологиялар спортшының техникалық шеберлігін, сондай-ақ кейбір түрлері мен тактикалық әрекеттерін бағалауға, қарсыластың стратегиясын талдауға мүмкіндік береді. Теледидарлық хабарларда компьютерлік көру ойыншылардың позициясын немесе доптың траекториясын көрсету үшін қолданылады, бұл комментаторларға ойынды талдауға көмектеседі. Төрешілікте бұл технологиялар қабылданған шешімдердің дәлдігін арттыру үшін қолданылады, мысалы, футболдағы «ойыннан тыс» позицияны анықтау немесе допты теннисте соққыға жығу.

А.Д. Терехиннің баскетболдағы қашықтықтан лақтыру техникасын талдауға бағытталған авторлармен жүргізген зерттеуінде компьютерлік технологиялар зерттелетін ойын техникасының фазаларын автоматты түрде тануға және оның дұрыс орындалуын талдауға мүмкіндік беретіндігі атап өтілді [10]. Ю.В. Киселев және оның соавторларының бейне деректерге негізделген гимнасттардың қозғалмалы элементтерінің орындалуын бағалауға және талдауға арналған, ал бағдарламаны пайдалану техникалық қателерді анықтауға ықпал етеді [11].

И.В. Сивцов спорттық туризмнің тиімділігін, қауіпсіздігін және жекелендіруін арттырудағы жасанды интеллекттің рөлін қарастырады [12]. Автор тек компьютерлік көруге ғана назар аудармаса да, ол қозғалыстарды талдау, туристердің физикалық жағдайын

бағалау және маршруттарды тиімділеу үшін озық технологияларды қолданудың маңыздылығын көрсетеді. Бұл зерттеу жасанды интеллект технологияларын, соның ішінде компьютерлік көруді спорттық іс-әрекеттің жаңа салаларында қолдану әлеуетін көрсетеді.

П.С. Коберник спорт саласында ЖИ-технологияларды қолдану мүмкіндіктерін қарастырады, фитнес - қосымшаларда жекелендірілген жаттығу жоспарларын жасау үшін ЖИ пайдалануға ерекше назар аударады [13].

П.А. Кулаков пен А.С. Еремин Unity 3D ортасында компьютерлік оқыту тренажерлерін әзірлеу ерекшеліктерін қарастырады [14]. Авторлар тиімді тренажерлерді жасау үшін физикалық қозғалтқыштар мен бейнелеу құралдарын және басқа да заманауи технологияларды қолданудың маңыздылығын атап көрсетеді. Компьютерлік тренажерлардың артықшылықтарына ерекше назар аударылады. Зерттеу Компьютерлік көруді тікелей қолдануға бағытталмағанымен, ол дене шынықтыру және спорт саласында да қолдануға болатын тиімді оқу/жаттығу жүйелерін құру үшін әртүрлі технологияларды біріктіріп қолдану әлеуетін көрсетеді.

Е.В. Медникова, Е.С. Котляров және М.В. Попова онлайн жаттығулардың танымалдылығының артуын атап өтіп, дене шынықтыруда ЖИ қолдану перспективаларын қарастырады [15]. Олар жаттығуларды бақылау үшін компьютерлік көруді қолданатын «Fittonic» қосымшасын сипаттайды. Авторлар оқытушының жүктемесін азайту және оқытуды жекелендіру сияқты қосымшалардың артықшылықтарын атап көрсетеді, сонымен қатар оқытушылардың қатысу қажеттілігі мен техникалық қателіктер қаупін атап көрсеттті және жасанды интеллектті оқытуға сәтті енгізу үшін бағдарламашылар мен жаттықтырушылардың бірлескен жұмысы қажет деп санайды.

Бейне деректері арқылы адамның физикалық белсенділігін тану үшін терең нейрондық желілерді қолданудың қызықты мысалы а.в. пятаеваның бірлескен авторлармен [16]. Зерттеушілер DenseNet121 және MobileNetV2 үлгілеріне негізделген физикалық белсенділік түрін анықтау алгоритмін әзірледі, содан кейін терең нейрондық желі үлгісін өздігінен құрастырды. Авторлар ucf50 деректер жинағын пайдаланды, онда 50 түрлі адам әрекеттері, сондай-ақ сынақ жинағының қайта көрсетілуін арттыру үшін YouTube сайтынан толық бейне тізбектері бар. Эксперименттік зерттеулер визуалды деректер бойынша физикалық белсенділік түрлерін жіктеу мәселесін шешу үшін ұсынылған тәсілдің тиімділігін растады. Әзірленген модель жоғары тану дәлдігін сақтай отырып, алдын ала дайындалған желілермен салыстырғанда аз есептеу ресурстарын қажет ететіні ерекше маңызды.

Шрайнер Б.А., Жомин К.М әзірлеген «CV-Тренер» бағдарламасы дене шынықтыруда компьютерлік көрудің практикалық қолданылуын көрсетеді [17]. Бұл бағдарлама OpenCV және MediaPipe кітапханаларын қолдана отырып, білім алушылардың дене типін автоматты түрде анықтау, дене мүшелерінің ұзындығын және жаттығуларды орындау кезінде буындардағы бұрыштарды есептеу үшін фотосуреттер мен бейнелерді талдайды. Авторлар дене шынықтыруды оңтайландыру және тиімді ету, сондай-ақ дене шынықтыру сабақтарында білім алушылардың дене тәрбиесінің тиімділігі мен дараланууын арттыру үшін осындай шешімдердің әлеуетін атап өтеді.

Е.А. Конопко және М.Г. Сидин спорттық жаттығуларда биометриялық деректерді талдауда жасанды интеллектті қолданудың перспективалары мен этикалық аспектілерін қарастырады [18]. Авторлар жасанды интеллект спортшының жағдайын бағалау, нәтижелерді болжау, жаттығуларды тиімділеу және олардың қауіпсіздігін арттыру үшін қолданылуы мүмкін екенін атап өтті. Дегенмен, олар сонымен қатар деректердің құпиялылығы, кемсітпеушілік және ЖИ жүйелерін пайдаланудағы ашықтық сияқты этикалық аспектілерді ескерудің маңыздылығын атап көрсетеді. Зерттеушілер биометриялық деректерді жинау мен өңдеудің неғұрлым тиімді әдістерін әзірлеу, оларды талдау үшін неғұрлым сенімді және дәл ЖИ жүйелерін құру, сондай-ақ спортшылар мен жаттықтырушылар үшін неғұрлым түсінікті және ашық ЖИ жүйелерін әзірлеу қажеттілігін көрсетеді.

Материалдар мен әдістер

Жасанды интеллектке негізделіп құрылған «Motion Trainer» бағдарламасы компьютерлік көру әдістерін, терең оқыту алгоритмдерін және пайдаланушыға бағытталған өзара әрекеттесу модульдерін біріктіру арқылы әзірленді. Осы зерттеуде қабылданған

әдістеме деректерді жинаудан басталып, нақты уақыт режимінде кері байланыс берумен және өнімділікті бақылаумен аяқталатын көп сатылы процесті қамтиды.

Бастапқы кезең әртүрлі жаттығулар қалыптары мен қозғалыстар тізбегін қамтитын деректер жиынын жинауды және алдын ала өңдеуді қамтыды. Суреттер мен бейнелер тазартылды, аннотацияланды, оқыту сапасын жақсарту және үлгілер бойынша консистенцияны қамтамасыз ету үшін өлшемі өзгертілді. Бұл қадам шуды азайту және модельдің оқу мүмкіндіктерін жақсарту үшін өте маңызды болды.

Кейіннен терең оқыту моделі YOLOv11 конволюциялық нейрондық желі архитектурасын қолдана отырып оқытылды. Бұл модель объектілерді дәл анықтау мүмкіндіктері мен жоғары дәлдігі үшін таңдалды.

Оқыту процесі негізгі аргументтерді дәл баптауды, пакеттік өлшемдер, оқыту жылдамдығы және эпоха саны сияқты алдын ала өңдеуді қамтыды, бұл модельге түрлі жаттығу әрекетерін тиімді тануға мүмкіндік берді.

Зерттеу барысында 1200 бейне және 5000-нан аса кадр қамтитын деректер жиыны пайдаланылды. Деректер жиыны отырып-тұру (squat), тартылу (pull-up), жатқан қалыптан тұлғаны көтеру (push-up), пресс (sit-up) жаттығуларын қамтиды. Әр жаттығу әртүрлі пайдаланушылар, ракурстар және жарық жағдайларында түсірілді.

Аннотациялау үшін LabelImg / CVAT / Roboflow құралдары пайдаланылды және дененің негізгі нүктелері (keypoints) белгіленіп, буындар координаттары анықталды, жаттығу түрлері бойынша класстарға бөлінді

Модель келесі параметрлермен оқытылды:

- архитектура: YOLOv11
- эпоха саны: 100
- batch size: 16
- learning rate: 0.001
- optimizer: Adam

Модель тиімділігі келесі метрикалар бойынша бағаланды:

- Accuracy
- Precision
- Recall
- F1-score
- mAP (mean Average Precision)

Нақты уақыттағы өнімділік:

- FPS (frames per second)
- кідіріс (latency)

Технологиялық стекке келетін болсақ, жүйе терең оқытуға негізделген жаттығуларды тану үшін YOLOv11 және қозғалысты бақылау және бейнені өңдеу үшін OpenCV пайдаланады.

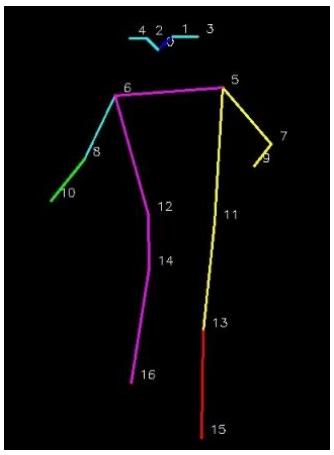
Нәтижелер және талқылау

Жасанды интеллектке негізделген ұсынылған жүйесі жаттығуларды тану дәлдігі, қорытынды жасау жылдамдығы және белгілі бір пайдаланушы атрибуттарына бейімделу тұрғысынан қолданыстағы әдістермен салыстырғанда айтарлықтай жақсартуларды көрсетеді. Бұл жетілдірілген өнімділікке ықпал еткен негізгі фактор – дәлдік үшін де, кескінді тану үшін де тиімді YOLOv11 мен CNN комбинациясы.

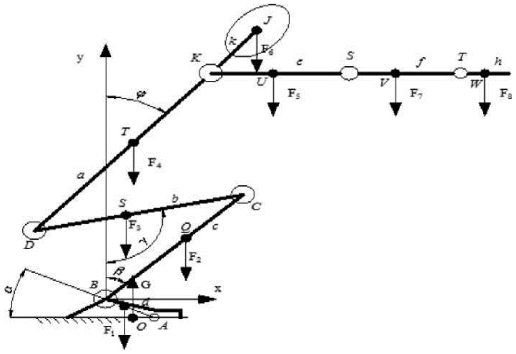
Жүктемелерді есептеу үшін біз биомеханикада кеңінен қабылданған дене салмағының оның жеке бөліктеріне таралу пропорцияларын қолданамыз. Бұл жағдайда жұптасқан мүшелер (қолдар, аяқтар) бүйірлік проекцияда жиынтық болып саналады.

Зерттеу объектісі денесінің жеке геометриялық сипаттамаларын анықтау үшін тиісті дене мүшелерінің ауырлық орталықтарының нүктелерінде қолданылатын салмақ жүктемелерін көрсететін құрылымдық диаграмма жасаймыз (Сурет 1, 2).

Биомеханиканың қабылданған нормаларына сәйкес, бой мен дене салмағының белгілі мәндерінде компьютерлік бағдарлама аяқ-қолдардың ұзындықтары мен массаларын есептеуге және соның нәтижесінде жеке буынның ауырлық центрін (АЦ), сондай-ақ бүкіл дененің жалпы ауырлық центрін анықтауға мүмкіндік береді.



Сурет 1 – Кілттік нүктелер картасы



Сурет 2 – Жаттығуды тігінен орындау кезінде адамның құрылымдық сызбасы

Сызбада:
O – жалпы массалар центрі G-нің әсер ету нүктесі;
d – табанның ұзындығы;
c – сирақтың ұзындығы;
b – санның ұзындығы;
a – тұлғаның ұзындығы;
k – бастың ауырлық центріне дейінгі қашықтық;
e – иықтың ұзындығы;
f – білек ұзындығы;
v – алақан ұзындығы;
u – y тік осінен O нүктесіне дейінгі қашықтық;
F1 = 0.04·G – табандардың салмағы;
F2 = 0.1·G – сирақтардың салмағы;
F3 = 0.24·G – сандардың салмағы;
F4 = 0.43·G – тұлғаның салмағы;
F5 = 0.06·G – иықтардың жиынтық салмағы;
F6 = 0.07·G – бастың салмағы;
F7 = 0.04·G – білектердің салмағы;
F8 = 0.02·G – алақандардың салмағы.

Жаттығуды орындау барысында дене бөліктерінің қалпының өзгеруі α, β, γ және φ бұрыштарымен анықталады. Осы бұрыштардың мәндеріне мүмкін болатын шектеулер енгізейік.

α бұрышы аяқ ұшымен тіреліп көтерілу кезінде табиғи 25° мәндерінен артуы мүмкін. Ал табан толықтай тірек бетіне жанасып орындалатын жаттығуларда оның мәнін шамамен 25° деп қабылдауға болады.

β бұрышы тобық буынының қозғалғыштығының шектеулілігіне байланысты 0-ден 40°-қа дейін өзгеруі мүмкін және тәуелсіз аргумент ретінде қабылдануы мүмкін. Алайда, отырып-

тұрудың бастапқы кезеңдерінде ол γ бұрышымен шамалас өзгереді, ал β шекті мәндеріне жеткенде, отырудың әрі қарай тереңдеуі γ бұрышының артуы есебінен жүзеге асады, оның шекті мәндері шамамен 120°-қа дейін жетуі мүмкін (90° кезінде буындарға түсетін жүктеме ең жоғары болады).

Тұлға осінің вертикальдан ауытқу бұрышы φ бүкіл дененің табанның О тірек нүктесіне қатысты тепе-теңдік шарттарымен анықталады. Бұл нүктенің сызбадағы орны u қашықтығымен сипатталады. Жаттығудың әрбір сәтінде осы бұрышты анықтау үшін 1-суреттегі сызба негізінде жазық күштер жүйесінің тепе-теңдік теңдеулерін құрамыз:

$$\Sigma F_y = G - F_1 - F_2 - F_3 - F_4 - F_5 - F_6 - F_7 - F_8 = 0$$

Бір сәттегі білекке әсер ететін күшті есептеудің бір мысалын қарастырайық:

$$F_5 \cdot (-c \cdot sin\beta + b \cdot sin\gamma - a \cdot sin\varphi - 0.47 \cdot e)$$

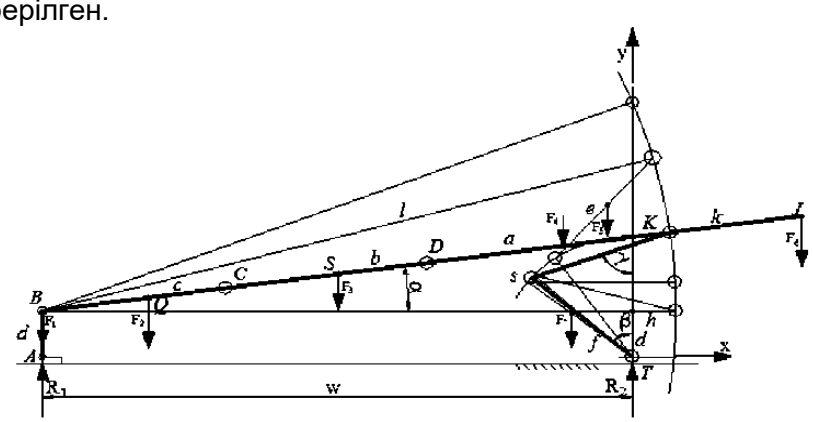
Дене бөліктерінің массалық және ұзындық пропорциялары бойынша ұсынылған қатынастарды қолдана отырып теңдеуді түрлендіргеннен кейін, u, α, β, γ немесе φ қатарынан басқа шамалардың берілген мәндері кезінде бір белгісізді анықтауға арналған өрнек алуға болады.

Бұл ретте есептеулерде қолданылатын шамалардың жалпы дене салмағына тәуелді емес екенін, тек дене бөліктерінің салмақтық пропорцияларына ғана байланысты екенін атап өткен жөн.

Осылайша, u, β және γ мәндерін ұтымды түрде таңдай отырып, дененің тепе-теңдігін қамтамасыз ететін φ бұрышының қажетті мәнін анықтауға болады.

$$\varphi = arcsin\left(\frac{u - 0.00194 \cdot cos\alpha - 0.202 \cdot sin\beta + 0.1825 \cdot sin\gamma - 0.01712}{0.1362}\right)$$

Сондай-ақ симметриялық жаттығуларды орындау кезіндегі басқа сызбасын қарастырайық. Атап айтқанда, 3-суретте жатқан қалыптан тұлғаны көтеру жаттығуларының сызбалық бейнесі берілген.



Сурет 3 – Жатқан қалыптан тұлғаны көтеру жаттығуы кезінде дене қалпының және оның бөліктеріне әсер ететін сыртқы жүктемелердің есептік сызбасы

Ultralytics YOLO26 көмегімен жаттығуларыңызды бақылау үшін дене қалпын бағалау (pose estimation) функцияларын пайдаланылады. Бұл функциялар дененің негізгі нүктелері мен буындарын нақты уақыт режимінде қадағалап, талдауға мүмкіндік береді. Соның арқасында жаттығуды орындау техникасы бойынша жедел кері байланыс алуға, қайталау санын есептеуге және тиімділік көрсеткіштерін өлшеуге болады.

Құрылған бағдарлама жаттығуларды орындау техникасы туралы жедел кері байланыс алуға, қайталау санын есептеуге және тиімділік көрсеткіштерін өлшеуге мүмкіндік береді. 4-суретте көрсетілгендей, жатқан қалыптан тұлғаны көтеру, тартылу немесе отырып-тұру жаттығулары үшін төмендегі код қолданылады:

```
import cv2
from ultralytics import solutions
cap = cv2.VideoCapture("path/to/video.mp4")
assert cap.isOpened(), "Error reading video file"
```

```
w, h, fps = (int(cap.get(x)) for x in (cv2.CAP_PROP_FRAME_WIDTH, cv2.CAP_PROP_FRAME_HEIGHT, cv2.CAP_PROP_FPS))

gym = solutions.AIGym(
    line_width=2,
    show=True,
    kpts=[6, 8, 10],
)

while cap.isOpened():
    success, im0 = cap.read()
    if not success:
        print("Video frame is empty or processing is complete.")
        break
    results = gym(im0)

cv2.destroyAllWindows()
```

Бағдарлама жаттығуларды мониторингтеу үшін пайдалану бірқатар негізгі артықшылықтарды қамтамасыз етеді:

- Өнімділік: Мониторинг деректеріне сүйене отырып жаттығуларды бейімдеу арқылы жоғары нәтижелерге қол жеткізуге болады.
- Мақсаттарға жету: Айқын прогреске жету үшін фитнес мақсаттарды оңай бақылап, түзетуге мүмкіндік береді.
- Дербестік: Жеке деректеріңізге негізделген жеке жаттығу жоспарларын құрып, максималды тиімділікке қол жеткізесіз.
- Денсаулық туралы хабардарлық: Денсаулыққа қатысты ықтимал мәселелерді немесе артық жаттығу белгілерін ерте анықтау.
- Негізделген шешімдер: Режимді түзету және шынайы мақсаттар қою үшін деректерге негізделген шешімдер қабылдау.

Бағдарламан компьютерлік көру мүмкіндіктерінің арқасында жаттығуларды анықтау мен қадағалауда жоғары дәлдікке ие. Ол дененің негізгі нүктелері мен буындарын дәл бақылап, жаттығу техникасы мен тиімділік көрсеткіштері бойынша нақты уақыт режимінде кері байланыс ұсынады. Алдын ала бапталған модель салмақтары мен мықты архитектурасы жоғары дәлдік пен сенімділікті қамтамасыз етеді. Нақты өмірдегі мысалдар құжаттаманың практикалық қолдану бөлігінде келтірілген, онда отжимание мен подтягивание жаттығуларының санын есептеу көрсетілген.

Жаттығу мониторингі нәтижелерін сақтау үшін кодты өзгертіп, өңделген кадрларды сақтайтын бейнежазба функциясын қосуға болады. Төменде соған арналған код келтірілген:

```
import cv2
from ultralytics import solutions

cap = cv2.VideoCapture("path/to/video.mp4")
assert cap.isOpened(), "Error reading video file"
w, h, fps = (int(cap.get(x)) for x in (cv2.CAP_PROP_FRAME_WIDTH, cv2.CAP_PROP_FRAME_HEIGHT, cv2.CAP_PROP_FPS))

video_writer = cv2.VideoWriter("workouts.avi", cv2.VideoWriter_fourcc(*"mp4v"), fps, (w, h))

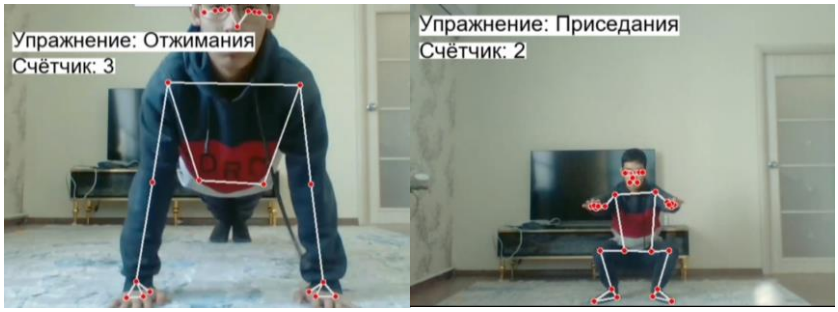
gym = solutions.AIGym(
    line_width=2,
    show=True,
    kpts=[6, 8, 10],
)

while cap.isOpened():
    success, im0 = cap.read()
    if not success:
```

```
            print("Video frame is empty or processing is complete.")
            break
        results = gym(im0)
        video_writer.write(results.plot_im)

cap.release()
video_writer.release()
cv2.destroyAllWindows()
```

Бұл код қадағаланған бейнені шығыс файлға жазып, жаттығу нәтижелерін кейін қарап шығуға немесе қосымша талдау алу үшін жаттықтырушылармен бөлісуге мүмкіндік береді (Сурет 4).



Сурет 4 – Бағдарламаның қолданысы

Қорытынды

Жасанды интеллекттің жаттықтыру саласында болашағы зор екені сөзсіз. Ол жаттығулардың тиімділігін арттыруға, жарақат алу қаупін азайтуға және жаттықтыру қызметтерін көпшілікке қолжетімді етуге қабілетті. Алайда, ол тірі жаттықтырушыны толықтай алмастыра алмайды. Негізгі мәселе – технология мен адам факторының арасындағы тепе-теңдікті табу, сонда ғана пайдаланушы ең жоғары көрсеткішке қол жеткізе алады.

Технологиялар жаттықтырушының қолындағы қуатты құралға айнала алады, бірақ оның кәсіби тәжірибесі мен адами көзқарасын алмастыра алмайды. Мәселе – жаттықтырушыны ЖИ алмастыра ма дегенде емес, ЖИ-ді жаттықтыру жұмысының сапасын арттыру үшін қалай тиімді пайдалану керектігінде

Ғылыми-зерттеу жұмысы аясында Ultralytics YOLO26, OpenCV және т.б. кітапханаларды пайдалана отырып, Python тілінде компьютерлік көруге негізделген бағдарлама бағдарлама жасалды. Бағдарлама көмегімен бейне арқылы жаттығулар кезіндегі әрекеттің тиімділігін бағалауға мүмкіндік береді.

ULTRALYTICS YOLO26 көмегімен позаны бағалау арқылы жаттығуларды бақылау нақты уақыт режимінде негізгі дене бағдарлары мен буындарды дәл бақылау арқылы жаттығуларды бағалауды жақсартады. Бұл технология жаттығу формасы туралы жедел кері байланыс береді, жаттығу режимін бақылайды және тиімділік көрсеткіштерін өлшейді, пайдаланушылар мен жаттықтырушылар үшін жаттығуларды тиімділейді.

Әдебиеттер тізімі

1. Moeslund T.B., Thomas G., Hilton A. Computer Vision in Sports. Advances in Computer Vision and Pattern Recognition. https://link. springer.com/book/10.1007/978-3-319-09396-3#bibliographic-information (date of access: 17.04.2024).
2. Naik B.T. A Comprehensive Review of Computer Vision in Sports: Open Issues / B.T. Naik, M.F. Hashmi, N.D. Bokde // Future Trends and Research Directions. Applied Sciences. – 2022. – vol. 12, issue 9. https://doi.org/10.3390/app12094429.
3. Smith J., Johnson M. Exploring the applications of computer vision in sports. https://www.ultralytics.com/blog/exploring-the-applications- of-computer-vision-in-sports (date of access: 17.01.2026).
4. AI-FIT COACH – Revolutionizing Personal Fitness with Pose Detection, Correction and Smart Guidance / K. Lakshmi Joshitha et al. // International Conference on Communication, Computing and Internet of Things, Chennai, India. – 2024. – P. 1-5. https://doi.org/10.1109/IC3IoT60841.2024.10550400.

5. Lakshay Gupta Virtual Fitness Trainer using Artificial Intelligence / Lakshay Gupta, Shrey Gurbuxani, Kapil Madan // Proceedings of the 2024 Sixteenth International Conference on Contemporary Computing. – 2024. – P. 226-233. https://doi.org/10.1145/3675888.3676056.
6. Empowering the Sports Scientist with Artificial Intelligence in Training, Performance, and Health Management / Nuno Mateus et al. // Sensors. – 2025. – vol. 25, № 1. – P. 1-12. https://doi.org/10.3390/s25010139.
7. Enhanced Gym Performance Prediction using Machine Learning: A Comprehensive Model for Personalized Fitness / R. Babitha Lincy et al. // 3rd International Conference on Automation, Computing and Renewable Systems, Pudukkottai, India. – 2024. – P. 1396-1400. https://doi.org/10.1109/ICACRS62842.2024.10841763.
8. Вельможко Н.И. Разработка алгоритма распознавания физических упражнений / Н.И. Вельможко, А.А. Бойко // Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии: труды XIV Международной научной конференции. Кн. 2. – Владимир, 2020. – С. 94-99.
9. Германов К.В. Анализ применения компьютерного зрения в спорте / К.В. Германов, Т.В. Красноперова, А.А. Германова // Ученые записки университета имени П. Ф. Лесгафта. – 2023. – № 9 (223). – С. 100–105.
10. Терехин А.Д. Система оценивания спортивных упражнений по нейросетевому анализу видеоряда / А.Д. Терехин, О.Р. Ильялов, А.В. Степанов // Прикладная математика и вопросы управления. – 2022. – № 1. – С. 75-86.
11. Анализ подходов, методов и решений для детектирования позы человека. Выбор инструмента для задачи определения эмоционального состояния человека по его позе / Ю.В. Киселев и др. // Современные наукоемкие технологии. – 2023. – № 6. – С. 41-47.
12. Сивцов И.В. Революция искусственного интеллекта в спортивном туризме: эффективность, безопасность и персонализация / И.В. Сивцов // Проблемы и перспективы развития спортивного ориентирования и активных видов туризма: материалы III Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Смоленск: Изд-во СГУС, 2024. – С. 222-224.
13. Коберник П.С. Использование искусственного интеллекта в сфере спорта для оптимизации работы фитнес-приложений / П.С. Коберник // Молодой ученый. – 2024. – № 15(514). – С. 453-454.
14. Кулаков П.А. Особенности разработки компьютерных обучающих тренажеров в Unity 3D / П.А. Кулаков, А.С. Еремин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 1. – С. 177-181.
15. Медникова Е.В. Перспективы применения приложений с искусственным интеллектом в физической культуре / Е.В. Медникова, Е.С. Котляров, М.В. Попова // Студенческий спорт: инновации, технологии и цифровая трансформация: материалы I Всероссийской научно-практической конференции (Калининград, 30-31 марта 2023 г.). – Калининград: Изд-во БФУ им. И. Канта, 2023. – С. 153-156.
16. Распознавание активности человека по видеоданным / А.В. Пятаева и др. // International Journal of Advanced Studies. – 2022. – Т. 12, № 4. – С. 96-110.
17. Шрайнер Б.А. Инновационные подходы в организации занятий физической культурой с применением компьютерных технологий / Б.А. Шрайнер, К.М. Жомин // Вестник педагогических инноваций. – 2023. – № 4(72). – С. 77-85.
18. Конопко Е.А. Образование и искусственный интеллект: возможности, ограничения и перспективы / Е.А. Конопко, М.Г. Сидин // Студенческая наука для развития информационного общества: материалы XV Всероссийской научно-технической конференции с приглашением зарубежных ученых. – Ставрополь: Изд-во СКФУ, 2024. – С. 37-42.

References

1. Moeslund T.B., Thomas G., Hilton A. Computer Vision in Sports. Advances in Computer Vision and Pattern Recognition. https://link. springer.com/book/10.1007/978-3-319-09396-3#bibliographic-information (date of access: 17.04.2024). (In English).
2. Naik B.T. A Comprehensive Review of Computer Vision in Sports: Open Issues / B.T. Naik, M.F. Hashmi, N.D. Bokde // Future Trends and Research Directions. Applied Sciences. – 2022. – vol. 12, issue 9. https://doi.org/10.3390/app12094429. (In English).

3. Smith J., Johnson M. Exploring the applications of computer vision in sports. https://www.ultralytics.com/blog/exploring-the-applications- of-computer-vision-in-sports (date of access: 17.01.2026). (In English).
4. AI-FIT COACH – Revolutionizing Personal Fitness with Pose Detection, Correction and Smart Guidance / K. Lakshmi Joshitha et al. // International Conference on Communication, Computing and Internet of Things, Chennai, India. – 2024. – R. 1-5. https://doi.org/10.1109/IC3IoT60841.2024.10550400. (In English).
5. Lakshay Gupta Virtual Fitness Trainer using Artificial Intelligence / Lakshay Gupta, Shrey Gurbuxani, Kapil Madan // Proceedings of the 2024 Sixteenth International Conference on Contemporary Computing. – 2024. – R. 226-233. https://doi.org/10.1145/3675888.3676056. (In English).
6. Empowering the Sports Scientist with Artificial Intelligence in Training, Performance, and Health Management / Nuno Mateus et al. // Sensors. – 2025. – vol. 25, № 1. – R. 1-12. https://doi.org/10.3390/s25010139. (In English).
7. Enhanced Gym Performance Prediction using Machine Learning: A Comprehensive Model for Personalized Fitness / R. Babitha Lincy et al. // 3rd International Conference on Automation, Computing and Renewable Systems, Pudukkottai, India. – 2024. – R. 1396-1400. https://doi.org/10.1109/ICACRS62842.2024.10841763. (In English).
8. Vel'mozhko N.I. Razrabotka algoritma raspoznavaniya fizicheskikh uprazhnenii / N.I. Vel'mozhko, A.A. Boiko // Fizika i radioehlektronika v meditsine i ehkologii: trudy XIV Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii. Kn. 2. – Vladimir, 2020. – S. 94-99. (In Russian).
9. Germanov K.V. Analiz primeneniya komp'yuternogo zreniya v sporte / K.V. Germanov, T.V. Krasnoperova, A.A. Germanova // Uchenye zapiski universiteta imeni P. F. Lesgafta. – 2023. – № 9 (223). – S. 100–105. (In Russian).
10. Terekhin A.D. Sistema otsenivaniya sportivnykh uprazhnenii po neirosetevomu analizu videoryada / A.D. Terekhin, O.R. Il'yalov, A.V. Stepanov // Prikladnaya matematika i voprosy upravleniya. – 2022. – № 1. – S. 75-86. (In Russian).
11. Analiz podkhodov, metodov i reshenii dlya detektirovaniya pozy cheloveka. Vybor instrumenta dlya zadachi opredeleniya ehmotsional'nogo sostoyaniya cheloveka po ego poze / Yu.V. Kiselev i dr. // Sovremennye naukoemkie tekhnologii. – 2023. – № 6. – S. 41-47. (In Russian).
12. Sivtsov I.V. Revolyutsiya iskusstvennogo intellekta v sportivnom turizme: ehffektivnost', bezopasnost' i personalizatsiya / I.V. Sivtsov // Problemy i perspektivy razvitiya sportivnogo orientirovaniya i aktivnykh vidov turizma: materialy III Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem. – Smolensk: Izd-vo SGUS, 2024. – S. 222-224. (In Russian).
13. Kobernik P.S. Ispol'zovanie iskusstvennogo intellekta v sfere sporta dlya optimizatsii raboty fitnes-prilozhenii / P.S. Kobernik // Molodoi uchenyi. – 2024. – № 15(514). – S. 453-454. (In Russian).
14. Kulakov P.A. Osobennosti razrabotki komp'yuternykh obuchayushchikh trenazherov v Unity 3D / P.A. Kulakov, A.S. Eremin // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. – 2024. – № 1. – S. 177-181. (In Russian).
15. Mednikova E.V. Perspektivy primeneniya prilozhenii s iskusstvennym intellektom v fizicheskoi kul'ture / E.V. Mednikova, E.S. Kotlyarov, M.V. Popova // Studencheskii sport: innovatsii, tekhnologii i tsifrovaya transformatsiya: materialy I Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (Kaliningrad, 30-31 marta 2023 g.). – Kaliningrad: Izd-vo BFU im. I. Kanta, 2023. – S. 153-156. (In Russian).
16. Raspoznavanie aktivnosti cheloveka po videodannym / A.V. Pyataeva i dr. // International Journal of Advanced Studies. – 2022. – T. 12, № 4. – S. 96-110. (In Russian).
17. Shrainer B.A. Innovatsionnye podkhody v organizatsii zanyatii fizicheskoi kul'turoi s primeneniem komp'yuternykh tekhnologii / B.A. Shrainer, K.M. Zhomin // Vestnik pedagogicheskikh innovatsii. – 2023. – № 4(72). – S. 77-85. (In Russian).
18. Konopko E.A. Obrazovanie i iskusstvennyi intellekt: vozmozhnosti, ogranicheniya i perspektivy / E.A. Konopko, M.G. Sidin // Studencheskaya nauka dlya razvitiya informatsionnogo obshchestva: materialy KhV Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s priglasheniem zarubezhnykh uchenykh. – Stavropol': Izd-vo SKFU, 2024. – S. 37-42. (In Russian).

А.К. Кереев[1], К.П. Аман[1], Л.Е. Капарова[1], С.М. Мухтар[1]. Е.А. Оспанов[2*]
[1]Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова
030000, Республика Казахстан, г. Актобе пр. А. Молдагуловой, д. 34
[2]Шәкәрім университет
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20А
e-mail: y.ospanov@shakarim.kz

ОЦЕНКА БИОМЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ФИЗИЧЕСКИХ УПРАЖНЕНИЙ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

В настоящее время в сфере спорта и физической культуры актуальными являются задачи повышения эффективности тренировочного процесса, снижения риска травматизма, а также персонализации обучения и тренировок. В связи с этим активно развиваются исследования, направленные на автоматизированный анализ и оценку физических упражнений с использованием технологий искусственного интеллекта (ИИ) и компьютерного зрения. Указанные технологии позволяют отслеживать движения человека в режиме реального времени и с высокой точностью определять биомеханические параметры.

В данной работе рассматривается разработка интеллектуального фитнес-помощника на основе компьютерного зрения, предназначенного для распознавания физической активности, анализа техники выполнения упражнений и предоставления пользователям оперативной обратной связи. Предложенная система реализована с использованием методов глубокого обучения на базе архитектуры Ultralytics YOLO и библиотеки OpenCV. Система определяет ключевые точки тела и суставы, анализирует их пространственное положение, оценивает корректность выполнения упражнений, подсчитывает количество повторений и определяет показатели эффективности.

В ходе исследования был собран, предварительно обработан и аннотирован набор видеоданных, включающий различные двигательные упражнения. Были обучены модели глубоких нейронных сетей и проведена оценка их точности и производительности. Кроме того, на основе биомеханической модели выполнены расчёты нагрузок на отдельные части тела и сформированы корректирующие рекомендации, направленные на улучшение качества движений.

Экспериментальные результаты показали, что предложенная система обладает высокой точностью распознавания упражнений и эффективно функционирует в режиме реального времени. Разработанное программное решение может быть использовано людьми, занимающимися физическими упражнениями в домашних условиях, спортсменами, тренерами и специалистами в области физической культуры в качестве дополнительного инструмента для мониторинга и оптимизации тренировочного процесса. Результаты исследования подтверждают перспективность широкого применения технологий искусственного интеллекта и компьютерного зрения в сфере фитнеса и спорта.

Ключевые слова: *искусственный интеллект, компьютерное зрение, глубокое обучение, архитектура YOLO, биомеханический анализ, мониторинг упражнений, персонализированные тренировки*

A.K. Kereyev[1], K.P. Aman[1], L.E. Kaparova[1], S.M. Mukhtar[1], E.A. Ospanov[2*]
[1]K. Zhubanov Aktobe Regional University,
030000, Republic of Kazakhstan, Aktobe, 34 A. Moldagulova Ave.
[2]Shakarim University,
071412, Republic of Kazakhstan, Semey, 20A Glinka St.
*e-mail: y.ospanov@shakarim.kz

ASSESSMENT OF BIOMECHANICAL PARAMETERS OF PHYSICAL EXERCISES BASED ON COMPUTER VISION

Currently, increasing the effectiveness of the training process, reducing the risk of injuries, and personalizing training and education are key challenges in the fields of sports and physical education. In this context, research focused on the automated analysis and evaluation of physical exercises using artificial intelligence (AI) and computer vision technologies is rapidly developing. These technologies enable real-time tracking of human movement and accurate determination of biomechanical parameters.

This paper presents the development of an intelligent computer vision – based fitness assistant designed to recognize physical activity, analyze exercise execution techniques, and provide users with real-time feedback. The proposed system is implemented using deep learning methods based on the Ultralytics YOLO architecture and the OpenCV library. The system detects key body landmarks and joints, analyzes their

spatial positions, evaluates the correctness of exercise execution, counts repetitions, and determines performance metrics.

During the study, a dataset of video recordings containing various exercise movements was collected, preprocessed, and annotated. Deep neural network models were trained, and their accuracy and performance were evaluated. In addition, biomechanical modeling was applied to calculate loads on individual body segments and to generate corrective recommendations aimed at improving movement quality.

Experimental results demonstrate that the proposed system achieves high accuracy in exercise recognition and operates efficiently in real time. The developed software solution can be used by individuals training at home, athletes, coaches, and physical education professionals as an additional tool for monitoring and optimizing the training process. The research findings confirm the promising potential for widespread application of artificial intelligence and computer vision technologies in the fields of fitness and sports.

Key words: *artificial intelligence, computer vision, deep learning, YOLO architecture, biomechanical analysis, exercise monitoring, personalized training*

Авторлар туралы мәліметтер

Адилжан Кутымович Кереев – PhD, информатика және ақпараттық технологиялар кафедрасының доценті, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: adiljan@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8283-5807.

Кульнар Панабековна Аман – т.ғ.к., информатика және ақпараттық технологиялар кафедрасының доценті, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: kulnar@inbox.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8283-5807.

Лэззат Есенгалиевна Капарова – магистр, информатика және ақпараттық технологиялар кафедрасының аға оқытушысы, Қ.Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: lazzat_09@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-6106-9902.

Сейткерей Мәлікұлы Мұхтар – п.ғ.к., информатика және ақпараттық технологиялар кафедрасының доценті, Қ.Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: Seitkerei_7676@mail.ru. ORCID https://orcid.org/0000-0002-3825-3025.

Ербол Амангазович Оспанов* – PhD, қауымдастырылған профессор, Шәкәрім университеті, Семей қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: y.ospanov@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5342-274X.

Сведения об авторах

Адилжан Кутымович Кереев – PhD, доцент кафедры информатики и информационных технологий, Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова, г. Актобе, Республика Казахстан; e-mail: adiljan@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8283-5807.

Кульнар Панабековна Аман – к.т.н., доцент кафедры информатики и информационных технологий, Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова, г. Актобе, Республика Казахстан; e-mail: kulnar@inbox.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8283-5807.

Зухра Кусайновна Калкабаева – PhD, старший преподаватель кафедры информатики и информационных технологий, Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова, г. Актобе, Республика Казахстан; e-mail: lazzat_09@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-6106-9902.

Сейткерей Маликулы Мухтар – к.п.н., доцент кафедры информатики и информационных технологий, Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова, г. Актобе, Республика Казахстан; e-mail: Seitkerei_7676@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3825-3025.

Ербол Амангазович Оспанов* – PhD, ассоциированный профессор, университет Шакарима, г. Семей, Республика Казахстан; e-mail: y.ospanov@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5342-274X.

Information about the Authors

Adilzhan Kereyev – PhD, Associate Professor of the Department of Informatics and Information Technologies, K. Zhubanov Aktobe Regional University, Aktobe, Republic of Kazakhstan; e-mail:adiljan@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8283-5807.

Kulnar Aman – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Informatics and Information Technologies, K. Zhubanov Aktobe Regional University, Aktobe, Republic of Kazakhstan; e-mail: kulnar@inbox.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8283-5807.

Zukhra Kalkabayeva – PhD, Senior Lecturer of the Department of Informatics and Information Technologies, K. Zhubanov Aktobe Regional University, Aktobe, Republic of Kazakhstan; e-mail: lazzat_09@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-6106-9902.

Seitkerei Malikovich Mukhtar – Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor of the Department of Informatics and Information Technologies, K. Zhubanov Aktobe Regional University, Aktobe, Republic of Kazakhstan; e-mail: Seitkerei_7676@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3825-3025.

Yerbol Amangazovich Ospanov* – PhD, Associate Professor, Shakarim University, Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: y.ospanov@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5342-274X.

Редакцияға енуі 30.03.2026
Өңдеуден кейін түсуі 16.04.2026
Жариялауға қабылданды 17.04.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-2

МРНТИ: 47.14.07, 81.93.29

BY 4.0
Check for updates

И.А. Сенюшин[1], Н.С. Глазырина[1]*, Р.Б. Ибраев[1], Е.К. Джилкибаев[1], А. Әділғазыұлы[2]
[1]ТОО «TSARKA R&D»,
010000, Республика Казахстан, г. Астана, проспект Кабанбай Батыра, 51/1
[2]Назарбаев Университет,
010000, Республика Казахстан, г. Астана, проспект Кабанбай Батыра, 53
*e-mail: glazirinan@yandex.ru

ФОРМАЛИЗОВАННЫЙ МАРШРУТ РАЗРАБОТКИ КРИПТОГРАФИЧЕСКОГО КОНТРОЛЛЕРА ЭЛЕКТРОННОЙ ЦИФРОВОЙ ПОДПИСИ С ПЛИС-ВЕРИФИКАЦИЕЙ

Аннотация: *В статье представлен и экспериментально апробирован формализованный маршрут разработки специализированного криптографического контроллера для аппаратной реализации алгоритмов электронной цифровой подписи. Разработанный маршрут охватывает полный цикл проектирования и включает этапы архитектурного синтеза, RTL-реализации, аппаратной верификации на ПЛИС и физической реализации в рамках MPW-потока. Архитектура контроллера построена по модульному принципу, при котором система представляет собой совокупность функционально независимых аппаратных блоков, разрабатываемых и верифицируемых как отдельные модули. Для каждого блока выполняются RTL-реализация, формирование программного интерфейса и аппаратная верификация на этапе ПЛИС-прототипирования, что обеспечивает раннее выявление функциональных и интерфейсных ошибок. Для критически важных компонентов дополнительно применяется физическая верификация в маршруте RTL-to-GDS с прохождением проектных проверок, включая DRC и LVS. После завершения модульной верификации выполняется интеграция блоков, формируется карта памяти и проводится системная аппаратная верификация. Экспериментальная апробация выполнена на демонстрационном вычислительном модуле на базе ядра TinyQV (RISC-V) с использованием платформ GOWIN Tang Primer 20K и TinyTapeout (PDK SkyWater SKY130). Полученные результаты подтверждают воспроизводимость предложенного маршрута и его практическую применимость для разработки специализированных криптографических контроллеров и защищённых встраиваемых систем.*

Ключевые слова: *криптографический контроллер, электронная цифровая подпись, ПЛИС прототипирование, аппаратная верификация, MPW прототипирование, информационная безопасность.*

Введение

В современных государственных, финансовых и корпоративных информационных системах одной из ключевых задач является обеспечение защищённого электронного документооборота и выполнения электронных транзакций. Для решения данной задачи широко применяется электронная цифровая подпись (ЭЦП), обеспечивающая подлинность источника, целостность данных и неотказуемость авторства электронных документов [1-4]. В отличие от программной реализации, аппаратная реализация ЭЦП на базе специализированных криптографических контроллеров обеспечивает более высокий уровень защищённости за счёт изоляции ключевого материала и снижения зависимости от уязвимостей программного обеспечения [5-9].

©И.А. Сенюшин, Н.С. Глазырина, Р.Б. Ибраев, Е.К. Джилкибаев, А. Әділғазыұлы, 2026

В научной литературе широко представлены исследования, посвящённые аппаратной реализации алгоритмов электронной цифровой подписи, включая ускорители RSA, решения на эллиптических кривых (ECDSA, EdDSA), а также реализации алгоритмов ГОСТ [10-17]. Одновременно развиваются подходы к верификации систем-на-кристалле (SoC), включая функциональную и формальную верификацию, FPGA-прототипирование и open-source маршруты физического проектирования ASIC [18-27].

Несмотря на значительное количество исследований, посвящённых отдельным аспектам аппаратной реализации криптографических алгоритмов и проектирования SoC, в научной литературе недостаточно представлены формализованные и воспроизводимые маршруты разработки криптографических контроллеров, охватывающие полный цикл от архитектурного проектирования до физической реализации [28-32]. Отсутствие такого сквозного подхода приводит к выявлению архитектурных и интерфейсных ошибок на поздних стадиях разработки и увеличивает технологические риски.

Работа выполнена в рамках проекта AP26103891 «Разработка отечественного криптоконтроллера и его имплементация в устройстве хранения ключей». Разрабатываемый криптографический контроллер ориентирован на применение в составе защищённых устройств хранения ключевой информации и средств аппаратной аутентификации, поддерживающих алгоритмы ЭЦП и стандарт FIDO [33, 34].

Целью работы является разработка и экспериментальная апробация формализованного маршрута разработки специализированного криптографического контроллера для алгоритмов электронной цифровой подписи, основанного на поэтапной FPGA-верификации и физической апробации функциональных модулей и интегрированной системы.

Научная новизна работы заключается в разработке формализованного и воспроизводимого маршрута проектирования специализированного криптографического контроллера, отличающегося интеграцией модульной FPGA-верификации, выборочной физической апробации критически важных компонентов в маршруте RTL-to-GDS и системной верификации интегрированной архитектуры до этапа MPW-прототипирования. В отличие от существующих подходов, ориентированных на реализацию отдельных криптографических ускорителей или отдельных этапов верификации, предложенный маршрут обеспечивает сквозной процесс разработки, позволяющий выявлять архитектурные и интерфейсные ошибки на ранних стадиях и снижать риски физической реализации.

Условия и методы исследования

В рамках настоящей работы предлагается формализованный маршрут разработки специализированного криптографического контроллера, представляющий собой последовательность взаимосвязанных этапов проектирования и верификации, обеспечивающих воспроизводимость процесса разработки и снижение технологических рисков. Предложенный подход основан на модульном принципе построения системы и поэтапной аппаратной и физической апробации функциональных блоков.

Первый этап включает архитектурное проектирование криптографического контроллера с определением структуры системы и состава функциональных модулей, включая вычислительные, системные и специализированные криптографические блоки.

Второй этап предполагает модульную разработку, при которой каждый функциональный блок реализуется на уровне RTL и проходит функциональную верификацию. Параллельно формируется слой аппаратной абстракции (Hardware Abstraction Layer, HAL), обеспечивающий программный интерфейс к аппаратным компонентам.

Далее выполняется аппаратная верификация модулей на ПЛИС, позволяющая подтвердить корректность их функционирования в условиях реальной аппаратной среды.

Для физической апробации критически важных модулей применяется MPW-подход с использованием автоматизированного маршрута RTL-to-GDS, включающего логический синтез, размещение, трассировку и выполнение проектных проверок (DRC, LVS), что позволяет подтвердить корректность физической реализации.

После завершения модульной апробации осуществляется поэтапная интеграция функциональных блоков в состав единой архитектуры, формируется карта памяти системы и выполняется финализация HAL.

Интегрированная архитектура проходит системную аппаратную верификацию на ПЛИС, включающую проверку межмодульного взаимодействия и корректности выполнения встроенного программного обеспечения.

На заключительном этапе интегрированная система реализуется в маршруте RTL-to-GDS и передаётся в MPW-шаттл для изготовления опытного образца интегральной схемы.

Общий маршрут разработки криптографического контроллера в рамках предлагаемого подхода представлен на рисунке 1. Подписи функциональных блоков на рисунках приведены на английском языке в соответствии с общепринятой терминологией, используемой в современных EDA-инструментах, языках аппаратного описания (Verilog, VHDL) и проектной документации. Это обеспечивает однозначное соответствие между схемами, RTL-описанием и аппаратной реализацией.

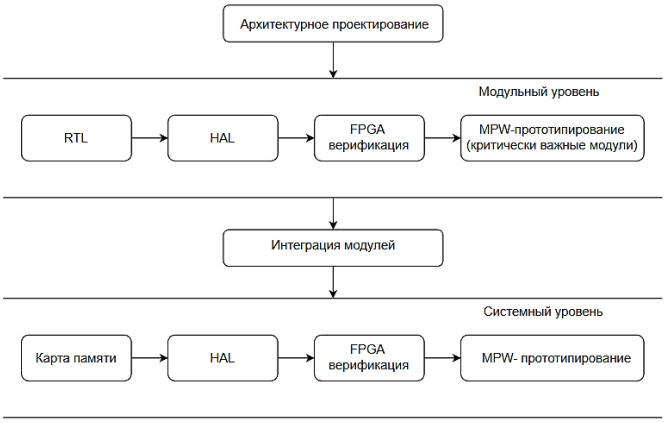


Рисунок 1 – Формализованный маршрут разработки криптографического контроллера с поэтапной аппаратной и физической верификацией

Представленный маршрут отражает последовательность этапов проектирования и верификации, обеспечивающую раннее выявление функциональных и интерфейсных ошибок, а также воспроизводимость процесса разработки при переходе от архитектурного уровня к физической реализации.

Для реализации физической апробации используется MPW-подход, обеспечивающий получение опытных образцов интегральных схем при существенно меньших затратах и сроках по сравнению с индивидуальным ASIC-производством. Применение MPW-подхода требует выбора платформы, обеспечивающей воспроизводимый маршрут проектирования, наличие открытого PDK и автоматизированного инструментального потока.

С этой целью выполнен сравнительный анализ доступных MPW-платформ с учётом технологического процесса, степени открытости инструментальной среды и уровня автоматизации проектирования (табл. 1).

Таблица 1 – Сравнение платформ MPW-прототипирования по технологическим и инструментальным характеристикам

Платформа	Процесс	Стоимость участия	PDK (SkyWater)	Автоматизированный процесс проектирования
GlobalFoundries MPW [35]	GF130, GF180, 65 nm, 22 nm	По запросу	No	Нет
MOSIS [36]	SkyWater SKY130, TSMC, GF, OnSemi	~10 000-12 000 USD	Ограничено	Нет
Muse Semiconductor [37]	TSMC 180 nm, 65 nm	1 250-14 000 USD	Нет	Нет
Cadence MPW (SkyWater) [38]	SkyWater SKY130	~10 000-12 000 USD	Нет	Нет
TinyTapeout [39]	SkyWater SKY130	~385 €	Да	Да

По результатам анализа установлено, что платформа TinyTapeout обеспечивает поддержку open-source PDK SkyWater SKY130, автоматизированный маршрут проектирования и открытую доступность, что обусловило её использование в рамках предлагаемого подхода.

Предложенный маршрут разработки позволяет обеспечить раннее выявление функциональных и интерфейсных ошибок, повысить воспроизводимость процесса проектирования и снизить риски, связанные с переходом к физической реализации.

Результаты исследований

Архитектура специализированного криптографического контроллера разработана на основе модульного принципа и включает вычислительное ядро, системную шину, подсистему памяти, периферийные интерфейсы и специализированные криптографические блоки (рис. 2).

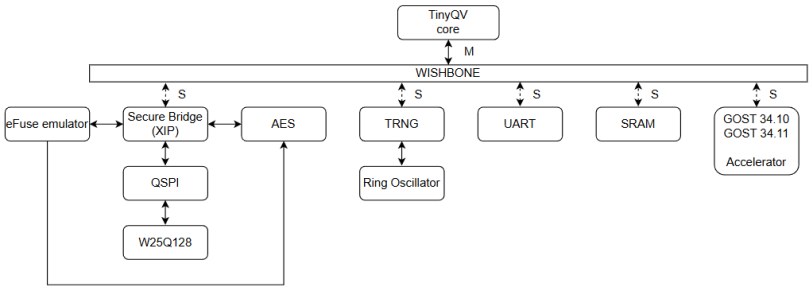


Рисунок 2 – Архитектура специализированного криптографического контроллера

Представленная архитектура отражает модульный подход к построению криптографического контроллера, обеспечивающий независимую разработку и верификацию функциональных блоков, а также их поэтапную интеграцию в составе системы. Такая организация позволяет снизить сложность проектирования, повысить управляемость процесса разработки и обеспечить согласованность интерфейсов при переходе к системной реализации.

В качестве демонстрационного модуля использован вычислительный модуль на базе процессорного ядра TinyQV (RISC-V), включающий основные функциональные компоненты процессорной архитектуры и подсистему доступа к памяти (рис. 3).

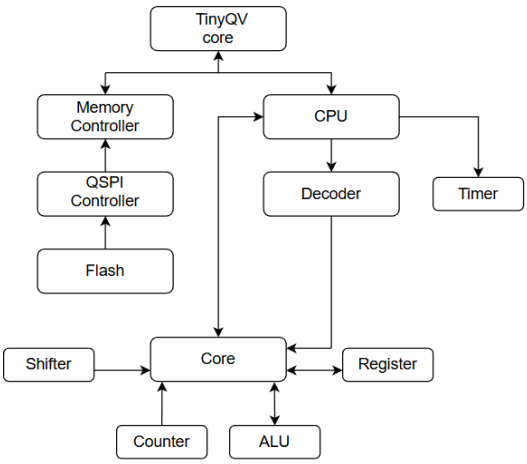


Рисунок 3 – Архитектура демонстрационного вычислительного модуля TinyQV

Демонстрационный модуль иллюстрирует базовую вычислительную подсистему, используемую для экспериментальной апробации предложенного маршрута разработки. Его применение позволяет подтвердить корректность функционирования ключевых компонентов архитектуры в реальной аппаратной среде и оценить применимость модульного подхода при переходе от RTL-описания к аппаратной реализации.

RTL-реализация вычислительного модуля выполнена на языке Verilog HDL. Иерархия RTL-модулей вычислительного ядра представлена на рисунке 4.

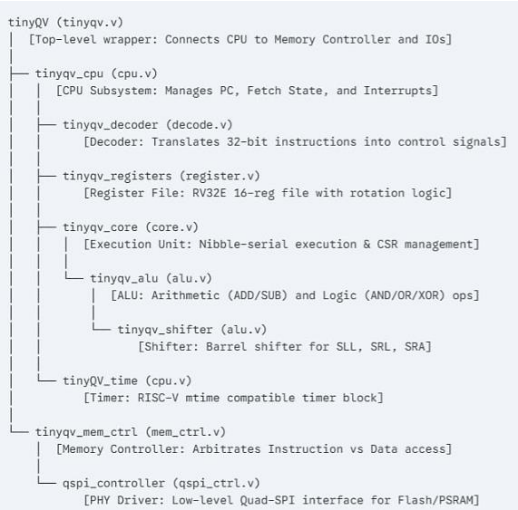


Рисунок 4 – Иерархия RTL-модулей вычислительного ядра TinyQV

Представленная иерархия RTL-модулей отражает структурную организацию вычислительного ядра, обеспечивающую разделение функциональности на уровни абстракции и модульную декомпозицию. Такая структура способствует упрощению верификации отдельных компонентов и повышает масштабируемость архитектуры при интеграции в состав криптографического контроллера.

Аппаратная верификация вычислительного модуля, совместимого с архитектурой RISC-V, выполнена на ПЛИС-платформе GOWIN Tang Primer 20K. В составе FPGA-проекта подсистема памяти реализована на основе примитивов BRAM ПЛИС Gowin в режиме Single Port. Для организации доступа к памяти использован модуль sim_qspi.v, обеспечивающий взаимодействие вычислительного ядра с подсистемой памяти.

Структурная схема взаимодействия вычислительного ядра с подсистемой памяти представлена на рисунке 5.

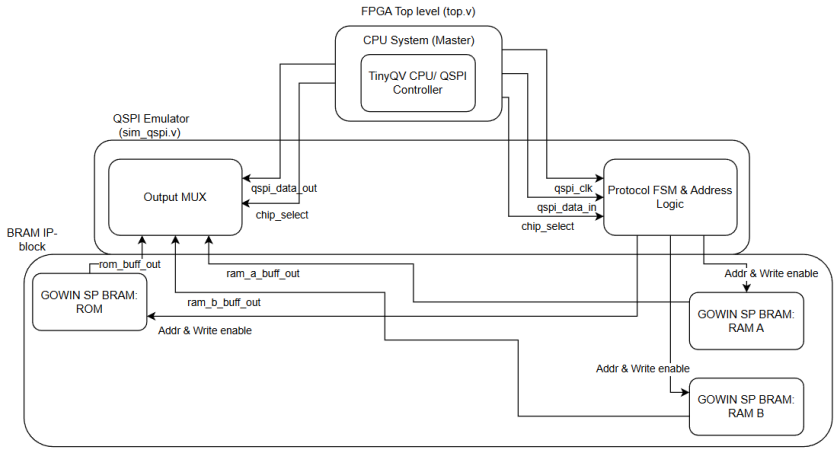


Рисунок 5 – Структурная схема взаимодействия вычислительного ядра TinyQV с подсистемой памяти в процессе FPGA-верификации

Данная схема демонстрирует организацию взаимодействия вычислительного ядра с подсистемой памяти в процессе аппаратной верификации и позволяет оценить корректность обмена данными между компонентами системы, а также согласованность интерфейсов при работе в реальной аппаратной среде.

В ходе ПЛИС-верификации подтверждена корректность функционирования подсистемы памяти, включая операции чтения и записи, адресацию и отсутствие конфликтов доступа. Дополнительно подтверждена корректность выполнения инструкций вычислительным ядром и устойчивость работы арифметико-логического устройства и механизма обратной записи.

Сопоставление результатов аппаратной реализации с данными RTL-моделирования показало отсутствие функциональных отклонений. Контроль аппаратного поведения системы осуществлялся с использованием встроенного логического анализатора, что позволило подтвердить корректность временных характеристик и стабильность работы вычислительного ядра при реализации на ПЛИС.

В ходе экспериментальной реализации получены количественные характеристики демонстрационного вычислительного модуля. Реализация на ПЛИС занимает порядка 2460 логических элементов (LUT) и 964 регистров (FF), при рабочей частоте до 27 МГц. Полученные значения подтверждают возможность реализации предложенной архитектуры в условиях ограниченных ресурсов ПЛИС и её пригодность для прототипирования.

Физическая реализация проекта выполнена с использованием автоматизированного маршрута OpenLane, включающего этапы логического синтеза, размещения и трассировки стандартных ячеек с последующей генерацией GDSII-файла. Подтверждено успешное прохождение проверок DRC и LVS, а также соответствие временных характеристик проекта заданным ограничениям.

При подготовке к MPW-прототипированию выполнена адаптация проекта к ограничениям платформы TinyTapeout, включая площадь размещения (конфигурация 3×2 тайлов), количество линий ввода-вывода (8 входных, 8 выходных и 8 двунаправленных), а также ограничение рабочей частоты до 64 МГц. По результатам прохождения автоматизированного маршрута проект передан в MPW-шаттл для изготовления опытного образца.

Предложенный маршрут разработки был применён не только к демонстрационному вычислительному модулю, но и к другим функциональным блокам криптографического контроллера, включая специализированные криптографические модули, реализующие алгоритмы электронной цифровой подписи. В рамках экспериментальной апробации выполнена интеграция функциональных блоков, сформирована карта памяти системы и проведена системная аппаратная верификация на ПЛИС, подтвердившая корректность межмодульного взаимодействия, функционирования подсистем памяти и периферийных интерфейсов, а также выполнения встроенного программного обеспечения.

Таким образом, полученные результаты подтверждают корректность предложенного формализованного маршрута разработки, его воспроизводимость и применимость для проектирования специализированных криптографических контроллеров и защищённых SoC-решений.

Обсуждение научных результатов

Полученные экспериментальные результаты позволяют перейти к анализу эффективности предложенного формализованного маршрута разработки специализированного криптографического контроллера.

Ключевым результатом проведённой экспериментальной апробации является подтверждение эффективности модульного подхода, при котором корректность архитектурных решений и согласованность интерфейсов проверяются на уровне отдельных функциональных блоков до их интеграции. Такой подход позволяет выявлять потенциальные архитектурные и интерфейсные несоответствия на ранних стадиях проектирования и тем самым снижать риски, связанные с переходом к физической реализации.

Экспериментальная апробация предложенного маршрута на демонстрационном вычислительном модуле TinyQV показала корректность выполнения инструкций, функционирования подсистемы памяти и стабильность работы вычислительного ядра в реальной аппаратной среде. Полученные количественные характеристики реализации на ПЛИС (2460 логических элементов (LUT), 964 регистров (FF), рабочая частота до 27 МГц) подтверждают возможность реализации предложенной архитектуры в условиях ограниченных аппаратных ресурсов и её применимость для прототипирования.

Важным результатом является подтверждение применимости данного подхода к переходу от RTL-описания к физической реализации. Успешное прохождение автоматизированного маршрута OpenLane демонстрирует технологическую корректность и воспроизводимость разработки в open-source инструментальном потоке.

Для сопоставления предложенного подхода с существующими исследованиями выполнен сравнительный анализ по ключевым характеристикам маршрута разработки (табл. 2).

Таблица 2 – Сравнение предложенного подхода с существующими работами

Подход / работа	FPGA-верификация	RTL-to-GDS	Сквозной маршрут разработки	Воспроизводимость
Работы [13-15]	Да	Нет	Нет	Нет
Работы [25-27]	Нет	Да	Частично	Да
Предлагаемый подход	Да	Да	Да	Да

Как следует из таблицы, существующие исследования, как правило, ориентированы либо на реализацию отдельных криптографических модулей, либо на отдельные этапы проектирования и верификации. В отличие от них, предложенный подход обеспечивает сквозной воспроизводимый маршрут разработки, объединяющий архитектурное проектирование, модульную FPGA-верификацию, выборочную физическую апробацию и системную интеграцию.

Помимо демонстрационного вычислительного модуля, данный маршрут применяется также к специализированным криптографическим блокам. Дополнительную значимость представляют их количественные оценки. В частности, для аппаратных ускорителей алгоритмов электронной цифровой подписи (СТ РК ГОСТ Р 34.10-2015) получены предварительные ресурсные характеристики порядка 14602 логических элементов (LUT), 6702 регистров (FF), рабочая частота до 23,9 МГц, что подтверждает возможность реализации таких модулей в рамках разработанного маршрута.

Следует отметить, что в рамках настоящего исследования основной акцент сделан на формализации маршрута разработки и его экспериментальной апробации. Полученные количественные оценки демонстрируют перспективность данного подхода и формируют основу для дальнейшей оптимизации криптографических модулей по показателям производительности, площади и энергопотребления.

В целом результаты исследования показывают, что разработанный маршрут обеспечивает воспроизводимый переход от архитектурного проектирования к аппаратной и физической реализации и может рассматриваться как практическая основа для создания специализированных криптографических контроллеров и защищённых систем-на-кристалле.

Заключение

В работе представлен и экспериментально апробирован формализованный маршрут разработки специализированного криптографического контроллера для аппаратной реализации алгоритмов электронной цифровой подписи.

Предложенный подход основан на модульном принципе и предусматривает поэтапную проверку корректности отдельных функциональных блоков с последующей интеграцией и системной верификацией. Экспериментальная апробация на демонстрационном вычислительном модуле TinyQV продемонстрировала корректность функционирования архитектуры на уровне RTL и ПЛИС, а также возможность перехода к физической реализации с прохождением проверок DRC и LVS.

Полученные количественные характеристики реализации (2460 логических элементов (LUT), 964 регистров (FF), рабочая частота до 27 МГц) подтверждают применимость данного подхода в условиях ограниченных аппаратных ресурсов и его пригодность для прототипирования специализированных криптографических устройств.

Результаты исследования показывают, что разработанный маршрут обеспечивает воспроизводимый процесс разработки и может быть использован при создании специализированных криптографических контроллеров и защищённых систем-на-кристалле.

Перспективы дальнейших исследований связаны с расширенной оценкой специализированных криптографических модулей по показателям производительности, площади и энергопотребления, а также анализом устойчивости аппаратной реализации к атакам по побочным каналам.

Список литературы

1. Meng H. Research and development of digital signatures / Meng H., Sang Z. // Journal of Computing and Electronic Information Management. – 2025. – Vol. 16, № 3. – P. 23-28.
2. Gashi K. Digital signatures in the modern era: a review of cryptographic progress and post-quantum challenges / K. Gashi, B. Hyseni // International Journal of Innovative Technology and Interdisciplinary Sciences. – 2025. – Vol. 8, № 4. – P. 1082-1112.
3. Trends in data protection and encryption technologies / V. Mulder et al. – Switzerland: Springer, 2023. – 225 p.
4. Somsuk K. The development of signing and verification methods for high speed digital signatures on electronic official documents by using RSA cryptography / K. Somsuk // Cogent Engineering. – 2024. – Vol. 11, № 1. – Art. 2432513. https://doi.org/10.1080/23311916.2024.2432513.
5. Implementation efficiency of Falcon digital signature scheme on Arty-7 XC7A35T board / T.-T. Nguyen et al // Electronics. – 2025. – Vol. 14, № 22. – Art. 4504. https://doi.org/10.3390/electronics14224504.
6. Focardi R. A formally verified configuration for hardware security modules in the cloud / R. Focardi, F.L. Luccio // Proceedings of the ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security (CCS '21). – 2021. – P. 412-428. https://doi.org/10.1145/3460120.3484750.
7. A trusted execution environment RISC-V system-on-chip compatible with transport layer security 1.3 / B. Kieu-Do-Nguyen et al // Electronics. – 2024. – Vol. 13, № 13. – Art. 2508. https://doi.org/10.3390/electronics13132508.
8. Profiled side channel attacks against the RSA cryptosystem using neural networks / A. Barenghi et al // Journal of Information Security and Applications. – 2022. – Vol. 66. – Art. 103122. https://doi.org/10.1016/j.jisa.2022.103122.
9. Enhanced side-channel analysis on ECDSA employing fixed-base comb method / S. Jin et al // IEEE Transactions on Computers. – 2022. – Vol. 71, № 9. – P. 2341-2350. https://doi.org/10.1109/TC.2021.3126387.
10. A novel and efficient SPI enabled RSA crypto accelerator for real-time applications / V.R. Kolagatla et al // Proceedings of the 28th International Symposium on VLSI Design and Test (VDAT). – 2024. – P. 1-6.
11. Hardware performance analysis of RSA cryptosystems on FPGA for wireless sensor nodes / G. Leelavathi et al // International Journal of Intelligent Networks. – 2021. – Vol. 2. – P. 184-194. https://doi.org/10.1016/j.ijin.2021.09.002.
12. Optimized RSA-1024 FPGA implementation on Artix-7 / R. Ghayoula et al // Coding Theory – Advances and Applications in Informatics, Data Analysis, and Cryptography. – 2025. – Vol. 6. – P. 244.
13. Efficient FPGA-based ECDSA verification engine for permissioned blockchains / R. Agrawal et al // IEEE ASAP. – 2022. – P. 148-155. https://doi.org/10.1109/ASAP54618.2022.00028.
14. Cryptographic accelerators for digital signature based on Ed25519 / M. Bisheh-Niasar et al // IEEE Transactions on VLSI Systems. – 2021. – Vol. 29, № 7. – P. 1297-1305. https://doi.org/10.1109/TVLSI.2021.3071086.
15. A hardware efficient elliptic curve accelerator for FPGA based cryptographic applications / M. Kashif et al // ELECO. – 2019. – P. 362-366.
16. Rodionov A.Yu. Arxitektura kriptograficheskogo soprocessora na PLIS / A.Yu. Rodionov // Voprosy` zashhity` informacii. – 2016. – № 3(114). – S. 16-19. Development of optical transceivers SFF standard with support for cryptographic kernel / I.A. Kashirin et al // APEIE. – 2016. – P. 159-162. (In Russian).
17. Debugging and verifying SoC designs through effective cross-layer hardware-software co-simulation / K. Campbell et al // DAC. – 2016. – P. 1-6. https://doi.org/10.1145/2897937.2898068.
18. Hardware and software co-verification from security perspective in SoC platforms / K. Chen et al // Journal of Systems Architecture. – 2022. – Vol. 122. – Art. 102355. https://doi.org/10.1016/j.sysarc.2021.102355.
19. Verification of SoC using advanced verification methodology / P. Pamula et al // Engineering Proceedings. – 2023. – Vol. 34, № 1. – Art. 12. https://doi.org/10.3390/engproc2023034012.
20. Verification of an ARM Cortex-M3 based SoC using UVM / A. Hegazy et al // SPIN. – 2023. – P. 778-783. https://doi.org/10.1109/SPIN57001.2023.10116603.

21. Farooq U., Mehrez H. Pre-silicon verification using multi-FPGA platforms: a review // Journal of Electronic Testing. – 2021. – Vol. 37. – P. 7–24. https://doi.org/10.1007/s10836-020-05904-8.
22. Makinote: an FPGA-based HW/SW platform for pre-silicon emulation of RISC-V designs / E. Perdomo et al // RAPIDO. – 2024. – P. 29-34.
23. FPGA prototyping of heterogeneous security architecture for educational purposes / S. Stoyanov et al // Engineering Proceedings. – 2025. – Vol. 100, № 1. – Art. 18. https://doi.org/10.3390/engproc2025100018.
24. Open-source design of integrated circuits / P. Fath et al // e+i Elektrotechnik und Informationstechnik. – 2024. – Vol. 141. – P. 76-87. https://doi.org/10.1007/s00502-023-01185-7.
25. Integrating design for testability technique into OpenLane with Skywater 130-nm process design kit / K. Chew et al // Semarak Engineering Journal. – 2023. – Vol. 3, № 1. – P. 14-21.
26. Custom ASIC design for SHA-256 using open-source tools / L.D. Franck et al // Computers. – 2024. – Vol. 13, № 1. – Art. 9. https://doi.org/10.3390/computers13010009.
27. A survey on assertion-based hardware verification / W. Hasini et al // ACM Computing Surveys. – 2022. – Vol. 54, № 11. – P. 1-33. https://doi.org/10.1145/3484517.
28. DirectFuzz: automated test generation for RTL designs using directed graybox fuzzing / S. Canakci et al. // DAC. – 2021. – P. 529-534. https://doi.org/10.1109/DAC18074.2021.9586230.
29. SoCFuzzer: SoC vulnerability detection using cost function enabled fuzz testing / M.M. Hossain et al. // DATE. – 2023. – P. 1-6. https://doi.org/10.23919/DATE56975.2023.10137021.
30. DifuzzRTL: differential fuzz testing to find CPU bugs / J. Hur et al // IEEE Symposium on Security and Privacy. – 2021. – P. 1286-1303. https://doi.org/10.1109/SP40001.2021.00063.
31. SHarPen: SoC security verification by hardware penetration test / H. Al-Shaikh et al // ASPDAC. – 2023. – P. 579-584. https://doi.org/10.1109/ASPDAC56680.2023.10044776.
32. Remote WebAuthn: FIDO2 authentication for less accessible devices / P. Wagner et al // ICISSP. – 2023. – P. 368-375. https://doi.org/10.5220/0011624500003405.
33. A novel protocol using captive portals for FIDO2 network authentication / M. Rivera-Dourado et al // Applied Sciences. – 2024. – Vol. 14, № 9. – Art. 3610. https://doi.org/10.3390/app14093610.
34. GlobalShuttle™: Multi Project Wafer Program. https://gf.com/manufacturing-services/multi-project-wafer-program/ (дата обращения: 08.02.2026).
35. Offered MPW services – Si CMOS, compound semiconductor. https://www.mosis2.com/mpw-services (дата обращения: 08.02.2026).
36. TSMC MPW shared tapeouts. https://www.musesemi.com/shared-block-tapeout-pricing (дата обращения: 08.02.2026).
37. Cadence and SkyWater: fostering the next generation of innovators. https://community.cadence.com/... (дата обращения: 08.02.2026).
38. Tiny Tapeout. https://tinytapeout.com/chips/ (дата обращения: 08.02.2026).
39. Venn M. Tiny Tapeout: a shared silicon tape-out platform accessible to everyone / M. Venn // IEEE Solid-State Circuits Magazine. – 2024. – Vol. 16, № 2. – P. 20-29. https://doi.org/10.1109/MSSC.2024.3371234.
40. Cocotb. https://www.cocotb.org/ (дата обращения: 08.02.2026).

Информация о финансировании

Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP26103891).

И.А. Сенюшин[1], Н.С. Глазырина[1]*, Р.Б. Ибраев[1], Е.К. Джилкибаев[1], А. Әділғазыұлы[2]
[1]«TSARKA R&D» ЖШС
010000, Қазақстан Республикасы, Астана қ., Қабанбай батыр даңғылы, 51/1
[2]Назарбаев университеті,
010000, Қазақстан Республикасы, Астана қ., Қабанбай батыр даңғылы, 53
*e-mail: glazirinan@yandex.ru

ЭЛЕКТРОНДЫҚ ЦИФРЛЫҚ ҚОЛТАҢБАҒА АРНАЛҒАН КРИПТОГРАФИЯЛЫҚ КОНТРОЛЛЕРДІ ӘЗІРЛЕУДІҢ ФОРМАЛДАНДЫРЫЛҒАН БАҒДАРЫ АППАРАТТЫҚ ППВМ ВЕРИФИКАЦИЯСЫМЕН

Бұл мақалада электрондық цифрлық қолтаңбаларды аппараттық іске асыруға арналған мамандандырылған криптографиялық контроллер үшін формалдандырылған әзірлеу ағыны

ұсынылады және эксперименттік түрде тексеріледі. Ұсынылған бағдар криптографиялық контроллерді әзірлеудің толық циклін қамтиды және архитектуралық синтезді, RTL іске асыруды, ППВМ (Пайдаланушы Программалайтын Вентильді Матрица) верификацияны және MPW ағынында физикалық іске асыруды біріктіреді. Контроллер архитектурасы модульдік принципті қолдану арқылы әзірленген, мұнда жүйе жеке модульдер ретінде әзірленген және верификацияланған функционалдық тәуелсіз аппараттық блоктар жиынтығымен ұсынылған. Әрбір модуль ППВМ түптүрлілеу кезінде RTL іске асырудан, бағдарламалық интерфейсті қалыптастырудан және аппараттық верификациядан өтеді. Бұл әзірлеудің басында функционалдық және интерфейс қателерін анықтауға мүмкіндік береді. Маңызды модульдер RTL-GDS ағынында қосымша DRC және LVS физикалық жобалау верификацияларынан өтеді. Модульдік верификациядан кейін блоктар біріктіріледі, жад картасы жасалады және жүйенің аппараттық верификациясы орындалады. Ұсынылған тәсілдің эксперименттік тексеруі GOWIN Tang Primer 20K және TinyTapeout (PDK SkyWater SKY130) платформаларын пайдаланып TinyQV (RISC-V) ядросына негізделген демонстрациялық есептеу модулінде жүргізілді. Нәтижелер ұсынылған тәсілдің қайталану мүмкіндігін және оның мамандандырылған криптографиялық контроллерлер мен қауіпсіз кірістірілген жүйелерді әзірлеу үшін қолданылуын растайды.

Түйін сөздер: *криптографиялық контроллер, электрондық цифрлық қолтаңба, ППВМ түптүрлілеу, аппараттық верификация, MPW-түптүрлілеу, ақпараттық қауіпсіздік.*

I. Seniushin[1], N. Glazyrina[1]*, R. Ibrayev[1], Jilkibayev[1], A. Adilgazyuly[2]
[1]TSARKA R&D LLP,
Republic of Kazakhstan, Astana, 51/1 Kabanbai Batyr Avenue
[2]Nazarbayev University,
Republic of Kazakhstan, Astana, 53 Kabanbai Batyr Avenue
*e-mail: glazirinan@yandex.ru

FORMALIZED DEVELOPMENT FLOW FOR A CRYPTOGRAPHIC CONTROLLER WITH DIGITAL SIGNATURE AND FPGA-BASED VERIFICATION

This article presents and experimentally validates a formalized development flow for a specialized cryptographic controller designed for hardware implementation of digital signature algorithms. The flow covers the complete design cycle, encompassing architectural synthesis, RTL implementation, FPGA-based hardware verification, and physical implementation within an MPW flow. The controller architecture follows a modular design principle, in which the system is decomposed into functionally independent hardware blocks that are developed and verified individually. For each block, RTL implementation, software interface generation, and hardware verification are carried out during FPGA prototyping, enabling early detection of functional and interface errors. Critical components undergo additional physical verification through an RTL-to-GDS flow, including DRC and LVS checks. Upon completion of modular verification, the blocks are integrated, a memory map is generated, and system-level hardware verification is performed. The approach was experimentally validated on a demonstration computing module based on the TinyQV (RISC-V) core, using the GOWIN Tang Primer 20K and TinyTapeout (PDK SkyWater SKY130) platforms. The results confirm the reproducibility of the proposed flow and its practical applicability for developing specialized cryptographic controllers and secure embedded systems.

Key words: *cryptographic controller, electronic digital signature, FPGA prototyping, hardware verification, MPW prototyping, information security.*

Сведения об авторах

Игорь Анатольевич Сенюшин – проектный менеджер, ТОО «TSARKA R&D», г. Астана, Республика Казахстан; e-mail: sigor@cybersec.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-4479-4478.

Наталья Сергеевна Глазырина* – PhD, ассоциированный профессор, координатор научный проектов, ТОО «TSARKA R&D», г. Астана, Республика Казахстан; e-mail: glazirinan@yandex.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0259-774X.

Ренат Булатович Ибраев – специалист по криптографической безопасности, ТОО «TSARKA R&D», г. Астана, Республика Казахстан; e-mail: crypto.teacher2020@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7800-9035.

Ерболсын Кайратович Джилкибаев – руководитель отдела разработки, ТОО «TSARKA R&D», г. Астана, Республика Казахстан; e-mail: yerbolsyn@proton.me. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-2797-1421.

Алмас Әділғазыұлы – студент школы инженерии и цифровых наук, Назарбаев университет; e-mail: almas.adilgazyuly@nu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-1196-7952.

Авторлар туралы мәліметтер

Игорь Анатольевич Сенюшин – «TSARKA R&D» ЖШС жоба жетекшісі, Астана, Қазақстан Республикасы; e-mail: sigor@cybersec.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-4479-4478.

Наталья Сергеевна Глазырина* – PhD докторы, доцент, «TSARKA R&D» ЖШС ғылыми жоба үйлестірушісі, Астана қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: glazirinan@yandex.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0259-774X.

Ренат Булатович Ибраев – криптографиялық қауіпсіздік маманы, «TSARKA R&D» ЖШС, Астана қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: crypto.teacher2020@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7800-9035.

Ерболсын Кайратович Джилкибаев – әзірлеу бөлімінің басшысы, «TSARKA R&D» ЖШС, Астана қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: yerbolsyn@proton.me. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-2797-1421.

Алмас Әділғазыұлы – Инженерия және цифрлық ғылымдар мектебінің студенті, Назарбаев Университеті, Астана қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: almas.adilgazyuly@nu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-1196-7952.

Information about the authors

Igor Seniushin – Project Manager, TSARKA R&D LLP, Astana, Republic of Kazakhstan; e-mail: sigor@cybersec.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-4479-4478.

Natalya Glazyrina* – PhD, associate professor, scientific project coordinator, TSARKA R&D LLP, Astana, Republic of Kazakhstan; e-mail: glazirinan@yandex.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0259-774X.

Renat Ibrayev – Cryptographic Security Specialist, TSARKA R&D LLP, Astana, Republic of Kazakhstan; e-mail: crypto.teacher2020@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7800-9035.

Yerbolsyn Jilkibayev – Head of Development Department, TSARKA R&D LLP, Astana, Republic of Kazakhstan; e-mail: yerbolsyn@proton.me. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-2797-1421.

Almas Adilgazyuly – Student, School of Engineering and Digital Sciences, Nazarbayev University, Astana, Republic of Kazakhstan; e-mail: almas.adilgazyuly@nu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-1196-7952.

Поступила в редакцию 30.03.2026
Поступила после доработки 23.04.2026
Принята к публикации 24.04.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-3

CC BY 4.0
Check for updates

ҒТАХР: 28.23.37

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

ҰШҚЫШСЫЗ ҰШУ АППАРАТТАРЫНА АҒЫНДЫҚ ДЕРЕКТЕРДІ БЕРУ ҮШІН МІМО ӘДІСІН ҚОЛДАНУДЫ ТАЛДАУ

Аңдатпа: *Мақалада ұшқышсыз ұшу аппараттары (ҰҰА) үшін екі жолақты көп кірісті және көп шығысты антенна жүйесінің өнімділігі жан-жақты талданды. ҰҰА мен жердегі басқару орталықтары арасындағы жоғары жылдамдықты және сенімді деректер тасымалын қамтамасыз ету қазіргі заманғы байланыс технологияларының басты міндеттерінің бірі болып табылады.*

©А. Хабай, Е.А. Тулешов, А.Е. Назырова, Ж.Н. Исабеков, С.Е. Ибекеев, 2026

Осыны ескере отырып, ұсынылған антенна массиві екі жиілік диапазонында (қосжолақты режимде) тұрақты жұмыс істейтін етіп жобаланды. Сандық модельдеу нәтижелері көрсеткендей, бұл антенна массиві жоғары оқшаулауды (23 дБ және 19 дБ) және кең өткізу жолағын (2.14-3.25 ГГц және 5.4-7.4 ГГц) қамтамасыз етеді. Бұл деректер тасымалының жоғары жылдамдығын, элементтер арасындағы өзара ықпалдың аздығын және спектрлік ресурстарды тиімді пайдалануды көрсетеді. Сонымен қатар, антеннаның радиациялық сипаттамаларын талдау нәтижесінде корреляция коэффициенті мен диверсификация коэффициентінің оңтайлы мәндері анықталды, бұл MIMO технологиясының кеңістіктік әртүрлілік пен сенімділікті арттырудағы маңызын айқындайды.

Аталған тұжырымдар модельдеу нәтижелеріне сүйене отырып ұсынылған шешім ҰҰА байланыс жүйелері үшін перспективалы болғанымен, болашақта прототип жасап, эксперименттік өлшеулер арқылы сипаттама жүргізуді қажет етеді.

Түйін сөздер: *ұшқышсыз ұшу аппараты (ҰҰА), MIMO антенна, 2×2 антенна, қосжолақты антенна, монополды антенна, микрожолақты қоректендіру, S-параметрлер, оқшаулау, өзара байланыс, корреляция коэффициенті, диверсификация коэффициенті. осыны орыс ағылшын тіліне аудар.*

Кіріспе

Ұшқышсыз ұшу аппараттарын (ҰҰА) өзара және жердегі басқару орталықтарымен байланыстыру үшін арнайы сымсыз инфрақұрылым қажет. Мұндай желілер ҰҰА-лардың бір-бірімен деректерді сенімді түрде жіберіп-қабылдауына, сондай-ақ ҰҰА мен жер станциясы арасында ақпарат алмасуға мүмкіндік береді [1-3]. ҰҰА байланыс жүйелері ауыл шаруашылығын бақылау, орман өрттерін сөндіру, химиялық заттарды шашу, барлау, төтенше жағдайларға жедел жауап беру және жеткізу қызметтері сияқты қолданбаларда тұрақты әрі сенімді байланыс арнасын құруға бағытталған. Сонымен қатар, сымсыз қуат беру технологияларын енгізу аппараттардың жұмыс тиімділігін арттырып, әуеде болу уақытын ұлғайтуға мүмкіндік береді [4-6]. ҰҰА мен басқару орталығы арасындағы сенімді байланыс дрон технологияларының функционалдық мүмкіндігін кеңейтіп, әсіресе логистикалық жүйелерде жеткізу дрондарының инфрақұрылыммен өзара әрекеттесуін қамтамасыз етеді [7-8].

ҰҰА-дан алыс арақашықтыққа деректерді сенімді жеткізу үшін кең өткізу жолағын қамтамасыз ететін және жоғары тиімділікпен жұмыс істейтін антенналық жүйелер шешуші рөл атқарады. Антенналар салмағы аз, ықшам әрі аппарат корпусының геометриясына бейімделетін конфигурацияда орындалуы қажет. ҰҰА операциялары үшін жоғары жылдамдықты және тұрақты деректер алмасу арнасын қамтамасыз ету негізгі техникалық талаптардың бірі болғандықтан, перспективалы шешім ретінде MIMO технологиясын қосжолақты антенна массивтерімен біріктіру ерекше маңызға ие.

ҰҰА платформасына MIMO антенна массивтерін орнату кеңістіктік әртүрлілікті (spatial diversity) арттырып, деректер тасымалдау жылдамдығын және спектрлік тиімділікті жоғарылатуға мүмкіндік береді [10]. Сонымен қатар, мұндай шешім жердегі қолданушылар мен ҰҰА негізіндегі байланыс тораптары (мысалы, уақытша базалық станция немесе релей) арасындағы байланысты жеңілдетеді. Екіжолақты MIMO массиві әртүрлі жиілік спектрлерінде тұрақты байланыс арналарын қамтамасыз ете алады. Мысалы, бұл Wi-Fi жүйелерінде кең қолданылатын 2.4 ГГц және 5 ГГц диапазондарын қамтуы мүмкін [9]. Екі диапазонды қолдану жиіліктік әртүрлілікті қамтамасыз етіп, байланыс сапасын тұрақтандыруға және жүйенің жалпы өткізу қабілетін арттыруға ықпал етеді.

MIMO архитектурасына негізделген антенна массиві ҰҰА бортында релейлік торап ретінде де қызмет ете алады: ол жердегі жіберушіден қабылданған сигналдарды басқа қабылдаушыларға немесе желілік түйіндерге қайта таратады. Бұл функция жер бедерінің күрделілігі, кедергілер немесе ұзақ арақашықтық салдарынан тікелей байланыс орнату қиын болатын жағдайларда тиімді шешім болып табылады [11]. Қазіргі уақытта дрондарда кеңінен қолданылатын антенна түрлеріне пышақ антенналары, сақиналы тесікті антенналар, микротолқынды патч антенналар, тесікті пышақ тәрізді дипольді антенналар, сәулелену ені кең конформды антенналар, конформды монополярлы антенналар, сондай-ақ үлкен жерлік жазықтықпен біріктірілген тегіс орнатылған монополярлы патч антенналар жатады [12-15]. Дегенмен, ықшам өлшемде екідиапазонды жұмыс пен MIMO талаптарын бір мезетте қанағаттандыру кезінде элементтер арасындағы өзара байланыс (mutual coupling) күшейіп, оқшаулау деңгейі төмендеуі мүмкін. Сондықтан кең өткізу жолағын және жоғары оқшаулауды

қатар қамтамасыз ететін қосжолақты MIMO антенна құрылымдарын жобалау өзекті болып табылады.

Осы мақалада екі жиілік диапазонында жұмыс істейтін 2×2 MIMO антенна массивінің радиожиіліктік сипаттамаларын бағалау қарастырылады. Бағалау S-параметрлер, элементтер арасындағы оқшаулау және сәулелену сипаттамалары арқылы орындалып, сонымен бірге MIMO жүйелері үшін маңызды корреляция коэффициенті мен диверсификация көрсеткіштері талданады. Екі жиілік диапазонын қолдайтын MIMO массиві ҰҰА-ның жер станциясына қатысты әртүрлі кеңістіктік позицияларында сәулелену қамтуын қамтамасыз етіп, дрон қозғалыс бағыты өзгерген жағдайда да байланыс арнасының тұрақтылығын қолдауға мүмкіндік береді.

Материалдар мен тәсілдер

MIMO технологиясы бір мезетте бірнеше ақпараттық ағындарды беру мен қабылдау мақсатында таратқыш және қабылдағыш құрылғыларында бірнеше антенналарды қолдануды көздейді, бұл өз кезегінде деректер алмасу жылдамдығын, жиіліктік спектрді пайдаланудың тиімділігін және бүкіл жүйенің өнімділігін елеулі түрде жақсартады [16]. Осы бөлімде MIMO жүйесін бағалауда қолданылатын негізгі көрсеткіштер (S-параметрлер, элементтер арасындағы оқшаулау, корреляция коэффициенті және диверсификация көрсеткіші) анықталып, келесі бөлімдерде олар толықтолқынды сандық модельдеу нәтижелері бойынша есептеледі.

ҰҰА әртүрлі биіктіктер мен бағыттарда әрекет етуі мүмкін, және ұсынылып отырған антенна дизайны осындай әртүрлі жағдайларда да тұрақты әрі сенімді байланыс орнатуға жағдай жасайды. Бұл антенналық конфигурация ұшқышсыз жүйелер үшін тиімді сәулелену қамтуын және жоғары өткізу қабілетті деректер тасымалдау мүмкіндігін қамтамасыз етеді.Қос жиілік диапазоны бар көп бағытты MIMO антеннасы екі түрлі жиілік диапазонында жұмыс істей алатындай етіп жоблаймыз. MIMO антенна жүйесі сымсыз байланыс жүйелерінің тиімділігін арттырады, өйткені бір уақытта бірнеше сигналды қабылдап және жібере алады. Бұл екі диапазонды жұмыс істеу мүмкіндігі антеннаға екі түрлі жиілік ауқымында тиімді жұмыс істеуге мүмкіндік береді, бұл жалпы жүйенің жолағын кеңейтеді және деректердің өту жылдамдығын арттырады.

Монопольді антеннаның дизайны әдетте бір қарапайым өткізгіш элементтен тұрады, ол жергілікті жазықтықтың үстінде тігінен орналасады. Екі түрлі спетр жүйесі үшін антенна екі түрлі резонанстық жиілікке бейімделіп жобаланады. Резонансты жиіліктер екі түрлі болады олар $f1$ және $f2$, монопольді антенна үшін келесі формула арқылы есептеуге болады.

$$f = \frac{C}{2L} \tag{1}$$

Мұнда f антеннаның жұмыс жиілігі, c — вакуумдегі жарықтың таралу жылдамдығы ($c = 3 \times 10^8$ m/s), L монополярлы антеннаның физикалық ұзындығы. Dual-Band жұмыс істеуі антеннаны екі түрлі резонанстық жиілікке оңтайландыру арқылы қамтамасыз етіледі [17]. Алайда 1-формуласы бастапқы жобалау үшін қолданылатын теориялық жуықтау болып табылады, ал нақты резонанстар мен өткізу жолағы кейін толықтолқынды модельдеу арқылы нақтыланады.

Тиімді қуат беру үшін антеннаның импедансы беру желісінің жалпы кедергісі сәйкес болуы керек. Монопольді антеннаның кіріс кедергісі $Z_{\text{кіріс}}$ келесі түрде беріледі:

$$Z_{\text{кіріс}} = R + jX \tag{2}$$

R – жалпы кедергінің нақты бөлігі, ол резистивті компонентті білдіреді, X оның бейтараптандыру компонентін білдіретін жорамал бөлік. Импеданс сәйкестігіне қол жеткізу үшін L-секциялы сәйкестік немесе сәйкестік торларын қолдануға болады, ол екі жиілік диапазонында тиімді жұмыс істеуге мүмкіндік береді.

MIMO конфигурациясында екі немесе одан көп антенна жақын орналасқан. Жүйедегі антенналардың саны және олардың кеңістіктегі орналасуы өнімділік үшін маңызды. Антенналар бір-бірінен өзгертілген түрде орналасуы керек, сонда әр антеннадағы қабылданған сигналдар бір-біріне тәуелсіз болады. Сонымен бірге антенналар арасындағы өзара байланыс минимумға дейін азайтылуы керек, себебі ол сигналдың араласуына әкелуі мүмкін. Екі антенна арасындағы өзара байланыс коэффициенті k келесі түрде жуықталады:

$$k = \frac{S_{21}}{\sqrt{S_{11}S_{22}}} \quad (3)$$

S_{21} – екі антенна арасындағы жіберу коэффициенті, S_{11} және S_{22} әр антеннаның шағылысу коэффициенттері. Бұл қатынас өзара байланыс деңгейін сапалық тұрғыдан бағалауға арналған жуықтау ретінде қарастырылды. Жұмыста элементтер арасындағы байланыс/оқшаулау негізгі түрде S_{21}, S_{31} сияқты өткізу коэффициенттері арқылы талданады.

Монопольды антеннаның сәуле шығару үлгісі әдетте горизонтальды жазықтықта омнидиффузды(барлық бағытта синал таратып қабылдай алады) болады, Монополь типті антеннаның сәулелену диаграммасы, негізінен, көлденең жазықтықта барлық бағытта біркелкі таралатын сипатқа ие [18]. Алайда, MIMO жүйелеріндегі кеңістіктік антенна орналасуы бұл үлгіге айтарлықтай әсер етед:

$$E(\theta, \phi) = \frac{1}{r} \cdot \frac{jkL}{2} \cdot sin \cdot e^{-jkr} \quad (4)$$

r антеннадан қашықтық, k толқындық сан ($k = {}^{2\pi}/_{\lambda}$), θ және ϕ бұрыштық координаталар, L антенна элементінің ұзындығы. Осы идиалды математикалық модел негізінде нақты сәулелену диаграммалары толықтолқынды модельдеу нәтижелері бойынша алынады. MIMO антенналар арасындағы кедергі аз болатындай оқшаулау сақталуы керек. MIMO жүйесінде екі антенна арасындағы оқшаулау мына формула арқылы өлшенеді:

$$I = 20\log(\frac{|S_{21}|}{|S_{11}|}) \quad (5)$$

Осы жұмыста оқшаулау көрсеткіші ретінде көрші және диагональ элементтер арасындағы өткізу коэффициенттерінің деңгейі (мысал |S21|, $|S_{31}|$ және т.б.) қолданылып, нәтижелер −dB түрінде беріледі. S_{21} екі антенна арасындағы байланыс коэффициенті, S_{11} әр антеннаның шағылысу коэффициенті.

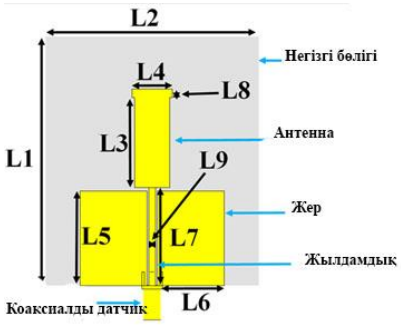
Dual-Band антенна жүйесінің жиілік жолағын BW келесі қатынас арқылы анықтауға болады.

$$BW = \frac{f_2 - f_1}{f_0} \times 100 \quad (6)$$

f_1 және f_2 – жұмыс істейтін диапазонның төменгі және жоғарғы жиіліктері, f_0 – орталық жиілік. MIMO жүйесінің кеңістіктік әртүрлілік қасиетін сандық бағалау үшін корреляция коэффициенті және диверсификация көрсеткіші қолданылады. Бұл жұмыста корреляция коэффициенті және диверсификация көрсеткіші мәндері модельдеу нәтижелерінен (S-параметрлер және/немесе сәулелену үлгілері) есептеліп, ұсынылған антенна массивінің кеңістіктік әртүрлілікті қамтамасыз ету қабілеті көрсетіледі көрсетіледі.

Ұсынылған қосжолақты монополярлы антеннаның геометриясы ең кең жолағын алу үшін арнайы жобаланған және ҰҰА байланыс жүйелерінің нақты талаптарына сай келетін антенна массивінің сәулелену элементі ретінде қызмет етеді. Оның диэлектрлік тұрақтысы 2.2 және қалыңдығы 0.8 мм, бұл 2.5 GHz жиілігінде шамамен 0.0064λо-ға тең. Антенна материалы ретінде диэлектрлік тұрақтылығы ε_r=2.2 болатын политетрафторэтилен негізіндегі керамикалық композит қолданылды [19]. Материал таңдау жоғары жиіліктегі шығындарды азайту және кең өткізу жолағын қамтамасыз ету мақсатымен негізделді.

Бұл материал жоғары жиілікті радиожүйелерде қолдануға жарамды және бұрын 45 ГГц-ке дейінгі жиілікте қызмет ететін антенналарда пайдаланылған. Бұл микротолқынды қоректендіру желісі L7 ұзындығы мен L9 ені арқылы сипатталады. Оның төменгі бөлігі L5 ұзындығы мен L6 еніне байланысты анықталады. Жиілік сигналының берілуі 50 Омдық кіші өлшемді, жоғары жиілікті коаксиалды радио жиілік коннекторы арқылы жүзеге асады. Мұндай конфигурация сәулелендіруші элемент пен оған байланысты схемалық құрылым арасында энергияны жоғалтусыз және тиімді жеткізуді қамтамасыз етеді. 1-суретте көрсетілген антеннаның әрбір құрылымдық элементінің нақты параметрлері оның жалпы жұмыс тиімділігіне тікелей әсер етеді. Антенна элементтерінің геометриялық сипаттамалары 1-кестеде келтірілген.



Сурет 1 – көп кірісті және көп шығысты антенна дизайны

Zp = 50 Ом, Cp = 1.3 пикофарады, Lf = 1.3 наногенри, Rf = 6 Ом, La1 = 2 Ом, La2 = 0.8 наногенри, Ca2 = 1 пикофарады, Ra1 = 62 Ом.

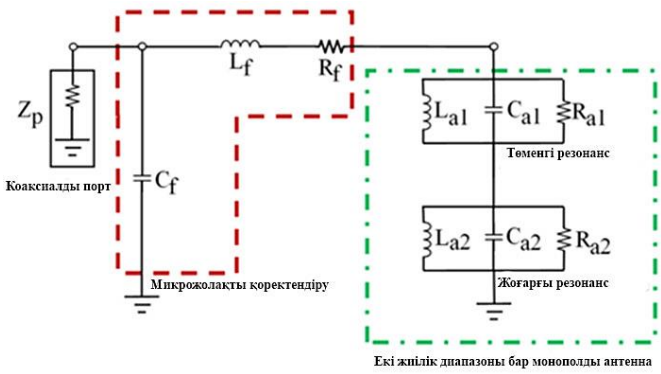
Кесте – 1. Қос жолақты монополды антеннаның параметрлері

Параметр	Мән (мм)	Параметр	Мән (мм)
L1	72	L6	19
L2	63	L7	29
L3	26	L8	3
L4	12	L9	3
L5	28		

Антеннаны модельдеу және MIMO өнімділігін бағалау нәтижелері

Антенна және 2×2 MIMO массиві MATLAB Antenna Toolbox ортасында толықтолқынды электромагниттік модельдеу арқылы модельденді. Қоректендіру микрожолақты портпен жүзеге асырылып, жүйе 50 Ω-ға сәйкестендірілді. Диэлектрлік төсем параметрлері: εr = 2.2, h = 0.8 мм, tgδ ≈ 0.001-0.002; өткізгіш қабат Cu, t = 0.035 мм, σ = 5.8×10^7 S/m. Есептеулер 2.0-3.3 ГГц және 5.0-7.4 ГГц диапазондарында Δf = 5 МГц қадамымен жүргізілді. Шекаралық шарттар ретінде ашық кеңістік және жұтушы қабат қолданылып, есептеу аймағының шеттері ең төменгі жиілікке сәйкес кемінде 0.25λmin қашықтықта таңдалды. Торлау адаптивті әдіспен орындалып, ең кіші ұяшық өлшемі 0.5 мм-ден төмендетілмеді; сходимост критерийі ретінде екі қатар өтуде |S11| өзгерісі < 0.02 шарты қабылданды. Массив элементтері арақашықтығы d = 0.5λ0, мұнда λ0 = c/f0 және f0 = 2.65 ГГц. Есептеулер жұмыс станциясында орындалды.

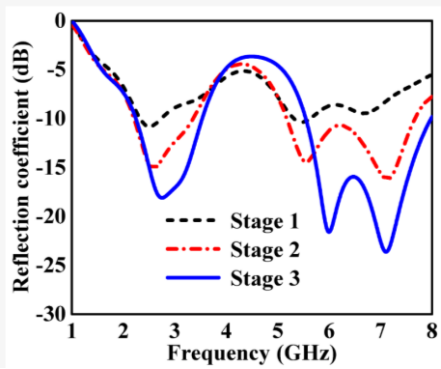
2-суретте екі жиілік диапазонында жұмыс істейтін көп бағытты антеннаның эквиваленттік схемасы берілген. Бұл құрылым үш негізгі элементтен тұрады: коаксиалды порт арқылы жалғанған қоректендіру желісі және екі жеке резонанстық тізбек. Zп, Сф, Lф және Rф компоненттері қоректендіру трактының импеданстық үйлесімділігін қамтамасыз етуге және шағылу/жоғалтуларды азайтуға арналған. Антеннаның қосжолақты жұмысын сипаттау үшін екі параллель жалғанған RLC тізбегінен тұратын эквиваленттік модель таңдалған [20]. 2,3 ГГц жиілігіндегі төменгі резонансты сипаттау үшін La1, Ca1, Ra1 параметрлері қолданылады, ал 5.8 ГГц жиілігіндегі жоғарғы резонансты La2, Ca2, Ra2 элементтерімен модельдейді.



Сурет 2 – MIMO анттеннаның эквивалентті схема үлгісі

Әрбір RLC резонанстық тізбегі антеннаның сәйкес жиілік диапазонындағы электрлік сипаттамаларын – өткізу қабілеттілігі мен сапа факторын қоса – бейнелейді. Мұндай эквиваленттік модельдеу тәсілі көп жолақыт көп бағытты антеннаның 2,3 ГГц және 5,9 ГГц жиіліктерінде жұмыс істеу ерекшеліктерін жан-жақты талдауға мүмкіндік береді. Антеннаның жұмыс тиімділігін, өткізу жолағының енін және жалпы кедергісіне сәйкестік дәрежесін осы тізбектегі пассивті элементтердің (индуктивтік, сыйымдылық және кедергі) мәндерін дәл таңдау арқылы оңтайлауға болады.

3-суретте көрсетілгендей, антеннаның ұсынған құрылымы мен оның эквиваленттік схемасы арасындағы нәтижелер арасында жоғары сәйкестік байқалды, бұл модельдеудің дұрыстығын растайды. Бұл жерде өлшенген мәнмен сәйкес тұжырым қолданылмайды, өйткені нәтижелер осы жұмыста сандық модельдеу және схемалық модельдеу шеңберінде салыстырылды.

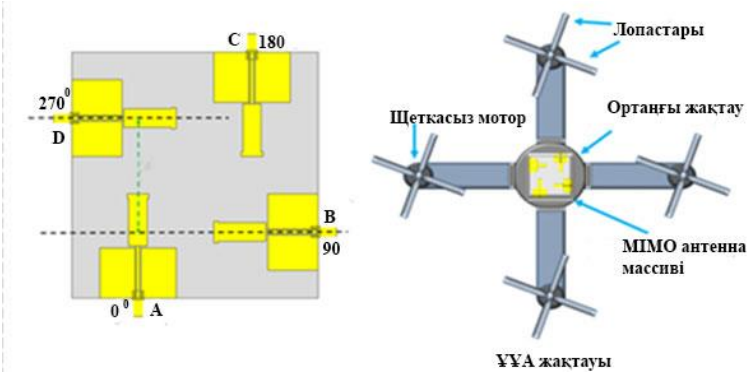


Сурет 3 – Бағалау құрылымдарының S-параметрі

Ұсынылған қосжолақты монополярлы антенна ҰҰА қолданбалары үшін қосжолақты функционалдылыққа қол жеткізу мақсатында өзгертілген сәулелену патчі арқылы жобаланған. 4-суретте көрсетілгендей, бұл екі жолақты көп бағытты антеннаның дұрыс үйлестірілгенін көрсетеді. Сонымен қатар, қос жиілік диапазоны да жоғары жиіліктерге аздап ығысқан, бұл 2.3 GHz және 5.9 GHz қажетті екі жолақтың диапазондарының кедегі жолағын жақсартты. Эквиваленттік схема MATLAB ортасында схемалық модельдеу арқылы бағаланды (толықтолқынды модельден бөлек).

Көрсетілген антенна конструкциясы төрт қос жолақты көп бағытты антеннаны пайдаланады және оларды симметриялы үлгіде орналастырады. Бұл көп бағытты антенналар төрт бұрышқа орналастырылған, әрқайсысының ортасына дейінгі қашықтық d=0,5λ болатындай таңдалды. Бұл өнімділікті арттыру үшін әр бұрыштағы элементтер 0°, 90°, 180° және 270° бұрыштарға бұрылатындай орналастырылды. Мұндай симметриялы орналастыру элементтер арасындағы өзара байланыс деңгейін төмендетуге және MIMO үшін қажетті кеңістіктік әртүрлілікті арттыруға бағытталған. ҰҰА құрылғысының ортасында орналастыруға ыңғайлы, бұл барлық бағыттар бойынша байланысқа тиімді болады.

Төменде суретте көретілгендей антенналардың ҰҰА жақтауының ортасында орналасуына байланысты потенциалды электромагниттік кедергі көздерінен аулақ болу үшін маңызды. Мұндай жоғары деңгейдегі электрлік оқшаулау қозғалтқыштардан, қалақшалардан немесе басқа да борттық электрондық құрылғылардан келетін ықтимал электромагниттік кедергілерді азайтуға мүмкіндік береді, әйтпесе бұл антенна жұмысына кері әсер етуі мүмкін. Антенналарды орталық бөлікке орналастыру олардың барлық бағытта кедергісіз көру сызығына ие болуына қамтамасыз етеді. Бұл көру сызығы, әсіресе көп кірісті көп шығысты анттенна технологиясында қолданылатын кеңістіктік әртүрлілік кезінде, тұрақты әрі сапалы байланыс орнату үшін аса маңызды. Мұндай шешім сигналдың ҰҰА жақтауына немесе басқа да бөлшектерге тіреліп, әлсіреуін азайтып, сенімді байланыс арналарының орнауына ықпал етеді. ҰҰА жиі өзгермелі ортада жұмыс істейтіндіктен, мұнда байланыс бағыты жылдам ауысуы мүмкін (4-сурет).

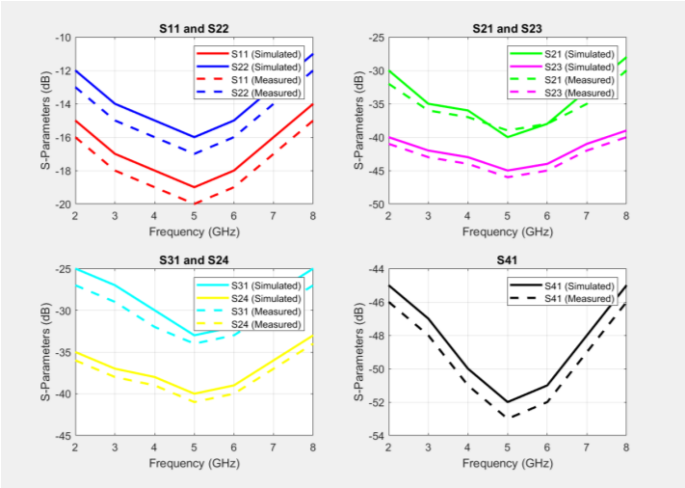


а) ә)

Сурет 4 – ҰҰА үлгісі және MIMO антенна схемасы: (а) екі бағытты көп жолақты MIMO антенна схемасы (ә) төр жаөтаудағы көп кірісті көп шығысты антенна жиынтығы бар ҰҰА

Орталықтандырылған қос жолақты монопольді MIMO антенна жиынтығы біркелкі шағылысуды қамтамасыз етеді. Бұл түрде орналастыру жүйенің ұшу барысын өңдеу және сенімді байланысты сақтау қабілетін артырады. Қос жолақты көп бағытты антенна MIMO жүйесінің екі жолды таратуды басқару мүмкіндігін айтарлықтай жақсартты. Бұл жақсарту деректер жылдамдығы мен жалпы байланыс сенімділігін арттыруға көмектесіді, олар ҰҰА маңызды мәселле болып табылады.

5-суретте Matlab ортасында алынған толықтолқынды модельдеу нәтижелері көрсетілген және олар екі жолақта да −10 дБ критерийіне сәйкес келетін жұмыс аймақтарын береді. Финал графиктерге сәйкес, −10 дБ импеданстық жолағы төменгі диапазонда 2,14-3,25 ГГц және жоғарғы диапазонда 5,4-7,4 ГГц аралығында қамтамасыз етілді. Элементтер арасындағы өзара байланыс деңгейі (оқшаулау) төменгі жолақта кемінде 23 дБ, жоғарғы жолақта кемінде 19 дБ болды. Осылайша, мәтіндегі “18 дБ” сияқты аралық мәндер финал нәтижелермен біріздендірілді.



Сурет 5 – 2×2 s-параметрлері негізінде қос жолақты монополды антенналардың имитацияланған нәтижелері

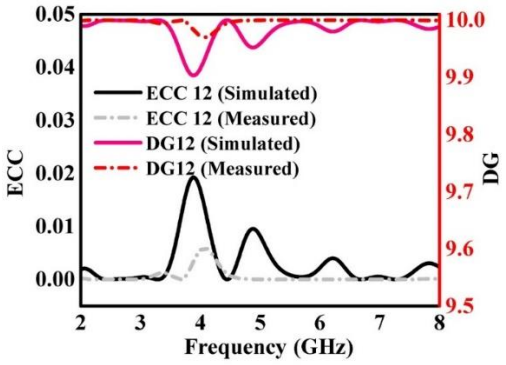
Көрші элементтер арасындағы өткізу коэффициенттері (мысалы, S21, S43) төменгі және жоғарғы диапазондарда сәйкесінше төмен деңгей көрсетіп, массивтің тиімді оқшауланuын растады. Диагональ элементтер үшін де (мысалы, S31, S42) ұқсас төмен байланыс деңгейі байқалды (5-сурет). “Өлшенген мәнге жақын” деген тұжырым бұл бөлімде қолданылмайды, өйткені мақала нәтижелері модельдеуге негізделген.

Зерттелетін әртүрлілік параметрлер арасындағы байланыстың корреляция коэффициенті (ρ) және MIMO антенналарының типтік өнімділігін бірге сипаттайтын әртүрлілікті арттыру [15]. Бұл келесідей есептеледі.

$$p = \frac{\left|\iint_{4\pi}(\overrightarrow{R_i}(\theta,\varphi))\times(\overrightarrow{R_j}(\theta,\varphi))d\varphi\right|^2}{\iint_{4\pi}\left|(\overrightarrow{R_i}(\theta,\varphi))\right|^2 d\varphi \times \iint_{4\pi}\left|(\overrightarrow{R_j}(\theta,\varphi))\right|^2 d\varphi} \quad (7)$$

Мұндағы φ кеңістігіндегі тұтас бұрышты көрсетеді. Көп массивіндегі екі арнайы монополды антенналардың сәулелену үлгілері $R \to i\,(\theta,\varphi)$, $\mathrm{P} \to j\,(\theta,\varphi)$ функциялармен сипатталады. қозу қолданылған кезде 2×2 MIMO қос жолақты монополды антенна массивінің радиациялық сипаттамалары көрсетілген. Нәтижелері 6-суретте көрсетілген. Модельделген 2,4 ГГц жолағынан 3,25 ГГц-ке дейін және 5,8 ГГц жолағында 7,38 ГГц-ке дейін үздіксіз болды. Бұл талдау элементтерінің тиімді оқшауланuын көрсетеді. MIMO жүйелерінің маңызды параметрлерінің бірі – Диверсификация коэффициенті. Ол бірнеше антеннаның қолданылуы арқылы бір антенна мен сигнал-шум қатынасының жақсаруының дәрежесін өлшеу арқылы анықталады

$$\text{ДК} = 10 * \lg(1 - |p^2|) \quad (8)$$



Сурет 6 – 2×2 MIMO антенна массивінің сәулелену сипаттамалары және талдауы

Бұл зерттеу екі бағытты көп кірісті көп шығысты антенна жүйесінің өнімділік ерекшеліктерін талдайды. Корреляция коэффициенті және диверсификация көрсеткіштері модельдеу нәтижелерінен алынған. Жүйе −10 дБ критерийі бойынша төменгі диапазонда 2,14-3,25 ГГц және жоғарғы диапазонда 5,4-7,4 ГГц аралығында жұмыс істейді. Бұл жоғары оқшаулауды (23 дБ және 19 дБ) және кең өткізу жолағын қамтамасыз етеді, бұл ҰҰА байланысының сенімділігін арттыру үшін маңызды. Аталған қорытындылар толықтолқынды сандық модельдеу шеңберінде берілгенін атап өтеміз; практикалық қолданым үшін келесі кезеңде прототип жасап, эксперименттік өлшеулер арқылы валидация жүргізу қажет.

Кесте 2 – 2020–2024 жж. еңбектермен салыстырмалы талдау (MIMO/қосжолақты антенналар)

Жұмыс	Қолдану	Жиілік(тер)	Массив/порт	Өлшемі	Оқшаулау	ECC / DG	Қоректендіру	Ескерту
Осы жұмыс	ҰҰА	2.14-3.25 ГГц; 5.4-7.4 ГГц	2×2 (4 порт)	(сіздің плата өлшемі)	≥23 дБ; ≥19 дБ	(сіздің ECC/DG)	микрожолақ, 50 Ω	Кең жолақ + орталық орналастыру сценарийі
Iriqat et al., 2024 (Electronics)	WiMAX / sub-6 / sub-7	2-3.71 ГГц; 5.9-7.54 ГГц	2-элемент MIMO	25.7×50 мм (бір элемент)	7→20 дБ (DGS арқылы)	(көрсетілсе)	микрожолақ, 50 Ω	DGS оқшаулауды арттырады (MDPI)
Arpaio et al., 2021 (Sensors)	ҰҰА (ADS-B + 5G)	1.03-1.09 ГГц; 3.4-3.8 ГГц	1 порт	–	–	–	SMA-мен coax feed	UAV-ке арналған, бірақ MIMO емес
Nirmal et al., 2023 (PIER C)	5G/WLAN	2.92-5.72 ГГц (кеңжолақты)	2 порт MIMO	34×20 мм	S21 < −15 дБ	ECC < 0.02; DG > 9.999	(көрсетілсе)	Шағын өлшем, бірақ UAV/қосжолақты емес
Xi et al., 2023 (Micromachines)	5G NR	2.34-2.71 ГГц; 3.72-5.10 ГГц	2 порт MIMO	75×77 мм	20 дБ	ECC < 0.02; DG > 9.9995	microstrip	Қосжолақ, бірақ UAV емес
Awan et al., 2024 (PLOS ONE)	IoT/смарт құрылғылар	2.45 ГГц; 5.4 ГГц	2 порт MIMO	28×48.6 мм	< −27 дБ	ECC ≤ 0.2	microstrip	Жоғары оқшаулау, бірақ UAV емес (ScienceDirect)

Ұсынылған 2×2 қосжолақты MIMO монополды антенна массиві кең импеданстық жолақты (2.14-3.25 ГГц және 5.4-7.4 ГГц) және жоғары оқшаулауды (кемінде 23 дБ және 19 дБ) бір уақытта қамтамасыз етуге бағытталған. Ұқсас жұмыстардың бір бөлігі ҰҰА арналмаған немесе MIMO/қосжолақты талаптарды толық қатар қанағаттандырмайды (мысалы, бірпортты ҰҰА антенналар немесе кеңжолақты, бірақ екі нақты диапазоны айқын бөлінбеген шешімдер). Біздің жұмыстың практикалық ерекшелігі ҰҰА жақтауының ортасына орналастыру сценарийін және 4 элементті симметриялы (0°/90°/180°/270°) конфигурацияны ескере отырып, кең қамту мен өзара байланыс әсерін төмендетуге басымдық беруі. Сонымен бірге, бұл мақала нәтижелері толықтай сандық модельдеуге негізделгендіктен, келесі кезеңде прототип жасап, векторлық желі анализаторы және анэхоикалық камера өлшеулерімен эксперименттік валидация жүргізу қажет етеді.

Қорытынды

Мақалада ҰҰА үшін қосжолақты 2×2 MIMO монополды антенна массиві ұсынылып, оның жұмыс қабілеті толықтолқынды сандық модельдеу арқылы бағаланды. Модельдеу нәтижелері бойынша антенна −10 дБ критерийімен төменгі диапазонда 2.14-3.25 ГГц және жоғарғы диапазонда 5.4-7.4 ГГц аралығында тұрақты сәйкестендірілгенін көрсетті. Элементтер арасындағы оқшаулау деңгейі төменгі жолақта кемінде 23 дБ, ал жоғарғы жолақта кемінде 19 дБ мәндеріне жетіп, өзара байланыс әсерінің төмен екендігін дәлелдейді. Сонымен қатар, MIMO жүйесіне тән корреляция коэффициентінің төмен мәні және диверсификация көрсеткішінің жоғары деңгейі кеңістіктік әртүрліліктің тиімді қамтамасыз етілетінін көрсетеді.

Бұл нәтижелер ұсынылған антенна құрылымының ҰҰА байланыс жүйелері үшін перспективалы екенін айқындайды, алайда алынған тұжырымдар толықтай модельдеу нәтижелері шеңберінде берілгенін атап өтеміз. Сондықтан келесі кезеңде антенна прототипін дайындап, векторлық желі анализаторы арқылы S-параметрлерін және анэхоикалық камерада сәулелену диаграммаларын өлшеу арқылы эксперименттік валидация жүргізу жоспарланады. Болашақ зерттеулерде антенна массивін нақты ҰҰА платформасына орнату кезіндегі жақтау, қозғалтқыштар және борттық электроника әсерін ескеріп, электромагниттік үйлесімділік тұрғысынан қосымша талдаулар жүргізу ұсынылады.

Әдебиеттер

1. Energy-efficient and secure air-to-ground communication with jittering UAV / H. Wu et al // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2020. – Vol. 69. – P. 3954-3967. https://doi.org/10.1109/TVT.2020.2971520.
2. Sherstjuk V. Forest fire-fighting monitoring system based on UAV team and remote sensing / V. Sherstjuk, M. Zharikova, I. Sokol // Proc. 38th IEEE Int. Conf. on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). – Kyiv, 2018. – P. 663-668.
3. Sherstjuk V. UAV-based forest fire monitoring system leveraging remote sensing technologies / V. Sherstjuk, M. Zharikova, I. Sokol // Proc. 38th IEEE Int. Conf. on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). – Kyiv, 2020. – P. 663-668. https://doi.org/10.1109/ELNANO.2018.847752.
4. Ghamry K.A. Multi-UAV optimization for firefighting missions using particle swarm algorithm / K.A. Ghamry, M.A. Kamel, Y. Zhang // Proc. Int. Conf. on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). – Miami, 2017. – P. 1404-1409. https://doi.org/10.1109/ICUAS.2017.7991527.
5. UAV-assisted aerial spraying: Droplet deposition density in rice farming / M.N.A. Kharim et al // Computers and Electronics in Agriculture. – 2019. – Vol. 167. – Article 105045. https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105045.
6. UAV sprayer performance: Effects of spray volume on pest control and deposition in wheat fields / G. Wang et al // Pest Management Science. – 2019. – Vol. 75. – P. 1546-1555. https://doi.org/10.1002/ps.5321.
7. Alotaibi E.T. LSAR: Collaborative UAVs for search and rescue operations / E.T. Alotaibi, S.S. Alqefari, A. Koubaa // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 55817-55832. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2912306.
8. Help from the sky: Leveraging UAVs for disaster management / M.Erdelj et al // IEEE Pervasive Computing. – 2021. – Vol. 16, No. 1. – P. 24-32. https://doi.org/10.1109/MPRV.2017.11.

9. Multi-purpose UAV for search and rescue in avalanche zones / M. Silvagni et al // Geomatics, Natural Hazards and Risk. – 2017. – Vol. 8. – P. 18-33. https://doi.org/10.1080/19475705.2016.1238852.
10. UAV-aided emergency communication networks during disasters / N. Zhao et al // IEEE Wireless Communications. – 2019. – Vol. 26. – P. 45-51. https://doi.org/10.1109/MWC.2018.1800160.
11. Gupta L. UAV communication networks: A comprehensive survey / L. Gupta, R. Jain, G. Vaszkun // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2015. – Vol. 18. – P. 1123-1152. https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2495297.
12. Wireless power transfer: A review of methods, applications, and challenges / M.M. Rahman et al // Engineering Reports. – 2024. https://doi.org/10.1002/eng2.12951.
13. UAV-assisted edge computing for IoT: Joint computation and communication design / T. Zhang et al // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2020. – Vol. 16. – P. 5505-5516. https://doi.org/10.1109/TII.2019.2948406.
14. Trust-based UAV-aided code dissemination in 5G industrial IoT / J. Liang et al // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2022. – Vol. 18. – P. 2877-2889. https://doi.org/10.1109/TII.2021.3110734.
15. A dual-band blade antenna for UAV-based ADS-B and 5G communication / M.J. Arpaio et al // Sensors. – 2021. – Vol. 21. – Article 5734. https://doi.org/10.3390/s21175734.
16. Tak J. A flush-mounted monopolar patch antenna for UAV applications / J. Tak, J. Choi // Microwave and Optical Technology Letters. – 2017. – Vol. 59. – P. 1202-1207. https://doi.org/10.1002/mop.30501.
17. Broadband slotted blade dipole antenna for airborne UAV applications / M. Nosrati et al // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2018. – Vol. 66. – P. 3857-3864. https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2835524.
18. Mazumder P. Design and analysis of a multiple input and multiple output antenna for unmanned aerial vehicle / P. Mazumder, M.M. Khan // Proc. Int. Conf. on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT). – 2021. – P. 1-6. https://doi.org/10.1109/ICCCNT51525.2021.9580132.
19. Mozaffari M. Toward 6G with connected sky: UAVs and beyond / M. Mozaffari, X. Lin, S. Hayes // IEEE Communications Magazine. – 2021. – Vol. 59, No. 12. – P. 74-80. https://doi.org/10.1109/MCOM.005.2100142.
20. Space-air-ground integrated 6G wireless communication networks: A review of antenna technologies and application scenarios / F.A. Dicandia et al // Sensors. – 2022. – Vol. 22. – Article 3136. https://doi.org/10.3390/s22093136.

А. Хабай[1], Е.А. Тулешов[1], А.Е. Назырова[2], Ж.Н. Исабеков[1]*, С.Е. Ибекеев[1,3]
[1]Satbayev University,
050013, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22а
[2]Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилёва,
10000, Республика Казахстан, г. Астана, ул. Сатпаева, 2
[3]Алматинский технологический университет,
050000, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Толе би, 100
*e-mail: z.issabekov@satbayev.university

АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА MIMO ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ПОТОКОВЫХ ДАННЫХ В БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТАХ

Аннотация: *В статье всесторонне проанализирована производительность двухдиапазонной многовходовой и многовыходовой (MIMO) антенной системы для беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Обеспечение высокоскоростной и надёжной передачи данных между БПЛА и наземными пунктами управления является одной из ключевых задач современных технологий связи. С учётом этого предложенный антенный массив спроектирован для устойчивой работы в двух частотных диапазонах (в двухдиапазонном режиме). Результаты численного моделирования показывают, что массив обеспечивает высокую изоляцию (23 дБ и 19 дБ) и широкую полосу пропускания (2,14-3,25 ГГц и 5,4-7,4 ГГц). Это указывает на высокую скорость передачи данных, слабое взаимное влияние между элементами и эффективное использование спектральных ресурсов. Кроме того, анализ радиационных характеристик антенны позволил определить оптимальные значения коэффициента корреляции и коэффициента диверсификации, что*

подчёркивает значимость технологии MIMO для повышения пространственного разнообразия и надёжности связи.

Полученные выводы основаны на результатах моделирования несмотря на перспективность предложенного решения для систем связи БПЛА, в дальнейшем требуется изготовление прототипа и экспериментальная валидация характеристик.

Ключевые слова: *БПЛА, антенна MIMO, антенна 2×2, двухдиапазонная антенна, монопольная антенна, микрополосковое питание, S-параметры, изоляция, взаимная связь (взаимное влияние), коэффициент корреляции, коэффициент диверсификации.*

A. Khabay[1], E. Tuleshov[1], A. Nazyrova[2], Zh. Issabekov[*], S. Ibekeiev[1,3]
[1]Satbayev University,
050013, Republic of Kazakhstan, Almaty, Satpayev Street, 22a
[2]L.N. Gumilyov Eurasian National University,
10000, Republic of Kazakhstan, Astana, Satpayev Street, 2
[3]Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan
050000, Republic of Kazakhstan, Almaty, 100 Tole Bi Street
*e-mail: z.issabekov@satbayev.university

ANALYSIS OF THE APPLICATION OF THE MIMO METHOD FOR STREAMING DATA TRANSMISSION IN UNMANNED AERIAL VEHICLES

This paper presents a comprehensive performance analysis of a dual-band multiple-input multiple-output (MIMO) antenna system for unmanned aerial vehicles (UAVs). Ensuring high-data-rate and reliable transmission between UAVs and ground control stations is one of the key challenges in modern wireless communications. Accordingly, the proposed antenna array is designed to operate stably in two frequency bands (dual-band mode). Numerical simulation results indicate that the array provides high isolation (23 dB and 19 dB) and wide impedance bandwidths (2.14-3.25 GHz and 5.4-7.4 GHz). These results suggest high data throughput, reduced mutual coupling between the elements, and efficient utilization of spectral resources. In addition, the radiation-pattern analysis yields favorable values of the envelope correlation coefficient and diversity gain, highlighting the importance of MIMO technology in improving spatial diversity and link reliability. The conclusions are based on numerical simulations; although the proposed design is promising for UAV communication systems, further prototype fabrication and experimental validation are required.

Key words: *UAV, MIMO antenna, 2×2 antenna, dual-band antenna, monopole antenna, microstrip feeding, S-parameters, isolation, mutual coupling, correlation coefficient, diversity gain.*

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.

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.

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.

Серикбек Елемесович Ибекеев – техника ғылымдарының магистрі, «Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар» кафедрасының аға оқытушысы, Satbayev University, Алматы қ., Қазақстан; e-mail: s.ibekeyev@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1991-8642.

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.

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.

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.

Серикбек Елемесович Ибекеев – магистр технических наук, старший преподаватель кафедры «Электроники, телекоммуникации и космических технологий», Satbayev University, г. Алматы, Казахстан; e-mail: s.ibekeyev@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1991-8642.

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.

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.

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.

Serikbek Ibekeyev – master technical science, Senior Lecturer of the Department of Electronics, Telecommunications and Space Technologies, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: s.ibekeyev@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1991-8642.

Редакцияға енуі 22.09.2025
Өңдеуден кейін түсуі 19.12.2025
Жариялауға қабылданды 09.01.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-4

ҒТАХР: 50.47.00

Д.К. Сатыбалдина[1], Н.Б. Шмитов[1]*, Н.М. Тешебаев[2], А.Ж. Закарина[1], К.С. Кульниязова[1]
[1]Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия Ұлттық университеті,
010008, Қазахстан Республикасы, Астана қ., Сәтбаев көшесі, 2
[2]Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,
050040, Қазахстан Республикасы, Алматы қ., Әл-Фараби даңғылы, 71
*e-mail: nurbol-970817@mail.ru

МАГИСТРАЛЬДЫҚ ҚҰБЫРЛАРДАҒЫ АҒЫП КЕТУ КООРДИНАТТАРЫН АНЫҚТАУ ҮШІН НЕЙРОНДЫҚ ЖЕЛІНІ ҚОЛДАНУ

Аңдатпа: *Құбырлар суды, мұнайды, газды және басқа сұйық және газ тәрізді орталарды тасымалдау үшін кеңінен қолданылады. Құбыр жүйелерінде ағып кетудің пайда болуы табиғи ресурстардың айтарлықтай жоғалуына әкеледі және қоршаған ортаға және қоғамдық қауіпсіздікке қауіп төндіруі мүмкін. Осыған байланысты ағып кетуді уақтылы анықтау және оқшаулау міндеті мұнай-газ саласының өзекті мәселелерінің бірі болып табылады. Жұмыста қысым өлшеу деректері негізінде жасанды интеллект әдістерін пайдалана отырып, құбырдағы ағып кету координатын*

©Д.К. Сатыбалдина, Н.Б. Шмитов, Н.М. Тешебаев, А.Ж. Закарина, К.С. Кульниязова, 2026

анықтау қарастырылады. MATLAB ортасында жүзеге асырылатын радиалды-базистік нейрондық желіні қолдана отырып, қысымның төмендеуінің ағып кету ағынына және ағып кету орнына дейінгі қашықтыққа тәуелділігін жуықтауға негізделген ағып кетуді оқшаулау тәсілі ұсынылды. Эксперименттік деректер әртүрлі ағып кету режимдерін имитациялау кезінде ағып кетуді анықтау жүйесін сынау арқылы алынады. Модельдеу нәтижелері әзірленген модель зерттелетін тәуелділіктің тиімді жуықтауын қамтамасыз ететінін және орташа және ірі ағып кетулер үшін шамамен 1,9 км орташа квадраттық қателікпен ағып кету координатын анықтауға мүмкіндік беретінін көрсетті, бұл құбыр жүйелерін бақылау кезінде нейрондық желі әдістерін қолдану перспективасын растайды.

Түйін сөздер: *нейрондық желі, құбырдың ағуы, қысымның төмендеуі, функцияның жуықтауы, ағып кетуді анықтау жүйесі.*

Кіріспе

Әлемнің әртүрлі елдерінде құбыржолдар қауіпсіздігін басқаруға және апаттардың алдын алуға деген қажеттілік артып келеді. Құбыржолдардағы ағып кетуді анықтайтын тиімді жүйені құру ағып кетумен байланысты апаттардың туындауын және олардың орналасуын уақтылы анықтауға мүмкіндік береді, сондай-ақ экономикалық шығындар мен қоршаған ортаның ластануын азайтуға немесе толықтай болдырмауға жағдай жасайды. Қазіргі уақытқа дейін құбыржолдардағы ағып кетулерді анықтау және олардың орнын белгілеу мәселелеріне арналған бірқатар жан-жақты шолу мақалалар жарияланған [1]. Өлшеу сигналдарын алу тәсілдері мен ағып кету орнын анықтау қағидалары тұрғысынан құбыржолдардағы ағып кетуді анықтау жүйелерін кең мағынада сыртқы және ішкі әдістерге бөлуге болады [2]. Сыртқы әдістер құбыржолдың сыртқы параметрлерін, мысалы акустикалық сигналдарды [3] және талшықты-оптикалық кабельдерді [4] бақылауға негізделеді. Ал ішкі әдістер, әдетте, қысым, шығын және температура сияқты параметрлердің сигналдарын жинауға негізделіп, нақты уақыттағы өтпелі процестерді модельдеу [5], теріс қысым толқыны әдісі [6], қысымның тірек нүктелері бойынша талдау және ағындар теңгерімі әдістерін қамтиды.

Құбыржолдардағы ағып кетулерді анықтаудың қолданыстағы тәсілдері мен әдістемелеріне жүргізілген сыни талдау қазіргі таңда ағып кетуді анықтауға арналған әртүрлі жүйелердің көптігіне қарамастан, әмбебап әдістеменің әлі де қалыптаспағанын көрсетті. Әрбір әдіс белгілі бір кемшіліктерге ие. Негізгі кемшіліктерге жүзеге асырудың жоғары құны, локализация дәлдігінің төмендігі, жалған іске қосылулар санының көптігі және жүзеге асырудың күрделілігі жатады. Осыған байланысты ағып кетулерді анықтаудың жаңа тәсілдерін зерттеу мәселесі өзектілігін сақтап отыр.

Төртінші өнеркәсіптік революциядан кейінгі кезеңде деректерге негізделген машиналық оқыту әдістері, дәстүрлі тәсілдермен салыстырғанда жоғары дәлдігі және графикалық процессорларға арналған тензорлық есептеулердің дамуы арқасында тиімді іске асырылуы себепті кеңінен таралуда. Осы тұрғыда құбыржол жүйелеріндегі ағып кетулерді анықтау үшін терең оқыту әдістері [7] кеңінен қолданылып келеді, өйткені олар салыстырмалы түрде кіші диаметрлі ағып кетулерді де анықтауда жоғары тиімділік көрсетеді [8]. Мұндай тәсілдер деректерді уақыттық аймақта [9] немесе жиіліктік аймақта [10] өңдеу арқылы жүзеге асырылады. Сонымен қатар, автокодтаушылар – белгіленбеген деректер негізінде оқытылып, жүйенің номиналды күйінен ауытқуларды анықтай алатын нейрондық желілер класы – құбыржолдардағы ақауларды диагностикалауда тиімді құрал ретінде қарастырылады [11]. Ал сверткіш нейрондық желілер (CNN) деректерден маңызды белгілерді бөліп алу үшін қолданылады және бірқатар сүзгілер арқылы оқытылып, деректердегі мәнді ерекшеліктерді анықтайды.

Құбыржолдардағы ағып кетулерді анықтау және локализациялаудың қолданыстағы әдістерінің кең ауқымына қарамастан, олардың көпшілігі енгізудің жоғары құнымен, жұмыс режиміндегі ауытқуларға сезімталдығымен және нақты пайдалану жағдайларында дәлдігінің шектеулілігімен сипатталады. Бұл өз кезегінде өлшеу деректерінің шектеулі көлемінде және күрделі математикалық модельдерді қолданбай-ақ сенімді локализацияны қамтамасыз ететін жаңа тәсілдерді әзірлеу қажеттілігін негіздейді. Аталған жұмыста қысым өлшемдері негізінде ағып кету координатасын анықтау мәселесі жасанды интеллект әдістерін қолдану арқылы қарастырылады. Ұсынылған тәсіл қысымның төмендеуі, ағып кету шығыны және ағып кету орнына дейінгі қашықтық арасындағы тәуелділікті аппроксимациялауға негізделген. Бұл

тәуелділік әртүрлі ағып кету режимдерін имитациялау арқылы алынған эксперименттік деректер негізінде оқытылған радиалды-базистік нейрондық желі көмегімен анықталады. Жұмыстың ғылыми жаңалығы желі құрылымының локализация дәлдігіне әсерін зерттеуде және қайта оқыту құбылысын болдырмайтын, тұрақты нәтижелерді қамтамасыз ететін минималды архитектураны негіздеуде көрініс табады. Ұсынылған әдістің қолданыстағы шешімдерден айырмашылығы – күрделі гидродинамикалық модельдерді қажет етпейді және қысымның шектеулі өлшемдерімен жұмыс істейді.

Мақала келесі түрде ұйымдастырылған. 2-бөлімде мұнай құбырындағы ағып кетудің координатасын тасымалдау процесінің өлшенетін параметрлері негізінде анықтау есебі тұжырымдалып, кіріс деректері мен ағып кету координатасы арасындағы тәуелділікті аппроксимациялауға арналған нейрондық желіге негізделген тәсіл сипатталады. Сонымен қатар, қойылған есепті шешу үшін қолданылатын радиалды-базистік нейрондық желінің архитектурасы келтіріледі. 3-бөлімде MATLAB ортасында жүргізілген есептеу экспериментінің нәтижелері ұсынылады, оның ішінде радиалды-базистік нейрондық желі параметрлерінің ағып кету орнын анықтау дәлдігіне әсері талданады. 4-бөлімде зерттеудің негізгі қорытындылары тұжырымдалып, мұнай құбырлары жүйелеріндегі ағып кетуді локализациялау дәлдігі мен тұрақтылығын арттыру мақсатында нейрондық желілердің басқа архитектураларын және гибридтік тәсілдерді қолдануға байланысты болашақ зерттеу бағыттары айқындалады.

Зерттеу әдістері

Мұнай өнімдерін құбыржол арқылы тасымалдау жүйесіне келесі негізгі элементтер кіреді: мұнай өңдеу зауытынан бас айдау станциясына дейінгі қосалқы құбыржолдар; сұйықтықты айдауды және қажетті қысымды қамтамасыз ететін резервуарлық паркі бар бас айдау станциясы; желілік құрылыстарымен бірге магистральдық мұнай құбырының желілік бөлігі; қысымды ұстап тұруға арналған аралық айдау станциялары; аралық тұтынушыларға арналған тармақтар; мұнай өнімдерін қабылдау, сақтау және әрі қарай жөнелту немесе айдау үшін арналған мұнай құбырының соңғы пункті [12-14].

Тасымалдаудың стационарлық режимінде ағып кету орын алған жағдайда, технологиялық процестің өзгермейтін параметрлері ретінде тек құбыржол учаскесінің басындағы және соңындағы қысым мәндерін қарастыруға болады (тиісінше – бас айдау станциясының резервуарынан шығу нүктесінде және соңғы пункт резервуарына кіріс нүктесінде). Қалған құбыржол инфрақұрылымының жұмыс параметрлері ағып кету туындаған кезде белгілі бір дәрежеде өзгеріске ұшырайды [13, 14].

Құбыржолдағы берілген шығын Q_0 кезінде координатасы L_x болатын технологиялық учаскенің кез келген x нүктесіндегі арын h_x келесі түрде өрнектелуі мүмкін:

$$h_x(Q_0) = h_{\text{кіріс}} + \sum_{i=0}^{n} H_i(Q_0) - [\sum_{i=0}^{f} h_i^{mc}(Q_0) + \sum_{i=1}^{k} h_i^{\text{са}}(Q_0)], \qquad (1)$$

мұндағы: $h_{\text{кіріс}}$ – технологиялық учаскенің кірісіндегі (резервуардан шығу нүктесіндегі) қысым биіктігі, м; $H_i(Q_0)$ – берілген Q_0 шығын кезінде L_x нүктесіне дейін орналасқан сорғы тудыратын қысым биіктігі, м; n – L_x нүктесіне дейін орналасқан сорғылар саны; $h_i^{mc}(Q_0)$ – берілген Q_0 шығын кезінде L_x нүктесіне дейін орналасқан жергілікті кедергідегі қысым биіктігінің жоғалуы, м; $f - L_x$ нүктесіне дейін орналасқан жергілікті кедергілер саны; $h_i^{\text{са}}(Q_0)$ – берілген шығын Q_0 кезінде L_x нүктесіне дейін орналасқан сызықтық аралықтағы қысым биіктігінің жоғалуы, м; k – L_x нүктесіне дейін орналасқан сызықтық учаскелер саны.

Ағып кету $Q_{\text{ак}}$ шығынымен және координатасы $L_{\text{ак}}$ нүктесінде орын алған жағдайда, ағып кету нүктесіне дейінгі шығын Q_1 мәніне дейін артады, ал ағып кету нүктесінен кейін Q_2 мәніне дейін азаяды. Аталған шығындар анықтама бойынша келесі қатынаспен байланысты:

$$Q_1 - Q_2 = Q_{\text{ак.}} \qquad (2)$$

Әрі қарай анықтылық үшін ағып кету нүктесіне дейін орналасқан x_1 еркін нүктесіндегі қысымның төмендеуін есептеу жағдайын қарастырайық. Құбыржолдағы шығын Q_1 мәніне дейін артқан кезде, ағып кету нүктесіне дейінгі (координатасы L_{x1} болатын нүктеде) қысымның төмендеуі ΔP_{x1} келесіні құрайды:

$$\Delta P_{x1} = P_{x1}(Q_0) - P_{x1}(Q_1). \qquad (3)$$

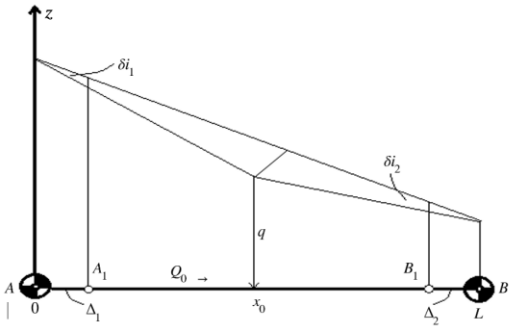
Жалпы түрде ΔP_{x1} функциясы Q-ға қатысты сызықтық емес болып табылады және оны келесі түрде көрсетуге болады [14,15]:

$$\Delta P_{x1} = f(Q_{\text{ак}}, l_{\text{ак}}, t_{\text{ак}}, X, Y, K, L, T^0, x_1), \qquad (4)$$

мұндағы: $Q_{\text{ак}}$, $l_{\text{ак}}, t_{\text{ак}}$ – сәйкесінше ағып кетудің шығыны, координатасы және пайда болу уақыты; X, Y – негізгі және қосалқы (подпорлық) сорғылар параметрлерінің векторлары (айналу жылдамдығы, қосылу және өшірілу уақыты); K – мұнай өнімдерінің сапа параметрлерінің векторы (мысалы, тығыздық, тұтқырлық); L – желілік учаскедегі ысырмалар параметрлері (ысырманың орны, ашылу/жабылу уақыты, ысырманың нөлдік нүктеге қатысты координатасы); T^0 – мұнай өнімінің температурасы; x_1 – қысымның төмендеуі ΔP_{x1} есептелетін нүктенің координатасы; f – қысымның төмендеуі ΔP тәуелділігін сипаттайтын функция.

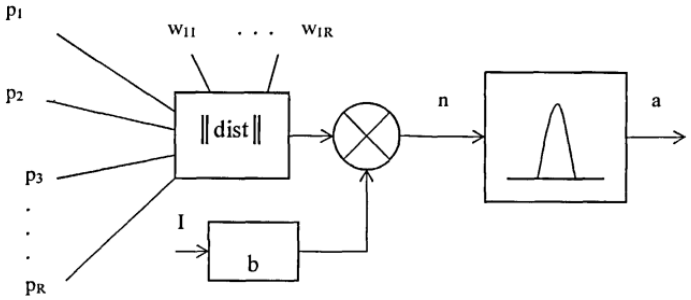
Белгілі f тәуелділігі бойынша, қысымның төмендеуі ΔP шамасын және мұнай өнімін тасымалдау процесінің қалған параметрлерінің мәндерін біле отырып, ағып кету орнының координатасын $l_{\text{ак}}$ анықтауға болады. Анықтау дәлдігі параметрлерді өлшеу дәлдігіне және f функциясын аппроксимациялау сапасына тәуелді болады. Аталған функцияны аппроксимациялау есебін жасанды нейрондық желілерді қолдану арқылы шешуге болады.

Белгілі болғандай, q шығынымен ағып кетудің пайда болуы құбыржолдағы сұйықтың қысым биіктігінің, сәйкесінше қысымының төмендеуіне алып келеді (1-сурет). Құбыржолдың кез келген нүктесіндегі қысымның төмендеуі ΔP жалпы түрде (4) формуламен сипатталуы мүмкін. ΔP -ны (4) формула бойынша есептеу үшін f функциясын аппроксимациялау қажет.



Сурет 1 – *q* шығынымен ағып кету кезінде құбыржолдағы қысым биіктігінің төмендеуі

Берілген функцияны аппроксимациялау үшін көпқабатты тікелей таралатын нейрондық желілер класына жататын радиалды-базистік нейрондық желі (*RBFN, Radial Basis Function Networks*) қолданылады. Радиалды-базистік желі R кірісі бар екі қабатты нейрондық желі болып табылады. Әрбір кіріс бірнеше элементтен тұруы мүмкін (2-сурет) [7].



Сурет 2 – Радиалды-базистік нейрондық желінің құрылымдық сұлбасы

Радиалды-базистік нейрондық желілерді қолдану олардың бірқатар артықшылықтарымен түсіндіріледі. Атап айтқанда, RBF-желілер сызықтық емес тәуелділіктерді аппроксимациялауда жоғары қабілетке ие, бұл құбыржол жүйелеріндегі күрделі процестерді модельдеу кезінде ерекше маңызды. Сонымен қатар, олар оқыту процесінің жылдам жинақталуымен, параметрлерін баптаудың қарапайымдылығымен, сондай-ақ кіріс деректеріндегі шу мен өлшеу қателіктеріне төзімділігімен сипатталады. Осы қасиеттерінің арқасында радиалды-базистік желілер техникалық жүйелердегі идентификация, аппроксимация және болжау есептерін шешуде тиімді қолданылады.

Жасырын қабат нейрондарының беру функциясы келесі түрде анықталатын симметриялы қоңырау тәрізді функция болып табылады:

$$radbas(n) = e^{-n^2}. \quad (5)$$

Шығыс қабаты нейрондарының беру функциясы ретінде *purelin* сызықтық функциясы қолданылады. Кіріс қабатының салмақтау функциясы кіріс матрицасының әрбір бағаны мен салмақтар матрицасының әрбір жолы арасындағы евклидтік қашықтықты анықтайды [15–17]:

$$dist(w_i, p_j) = \sqrt{(w_i - p_j)^2} \quad (6)$$

Радиалды-базистік нейрондық желіні модельдеу және оны оқыту MATLAB бағдарламалық ортасында Neural Network Toolbox құралдар жинағын пайдалану арқылы жүзеге асырылды. Жалпы түрдегі радиалды-базистік желілерді модельдеу және салмақтар мен ығысу параметрлерін автоматты түрде баптау үшін newrbe және newrb функциялары қолданылады:

net = newrbe(P, T, SPREAD), net = newrb(P, T, GOAL, SPREAD),

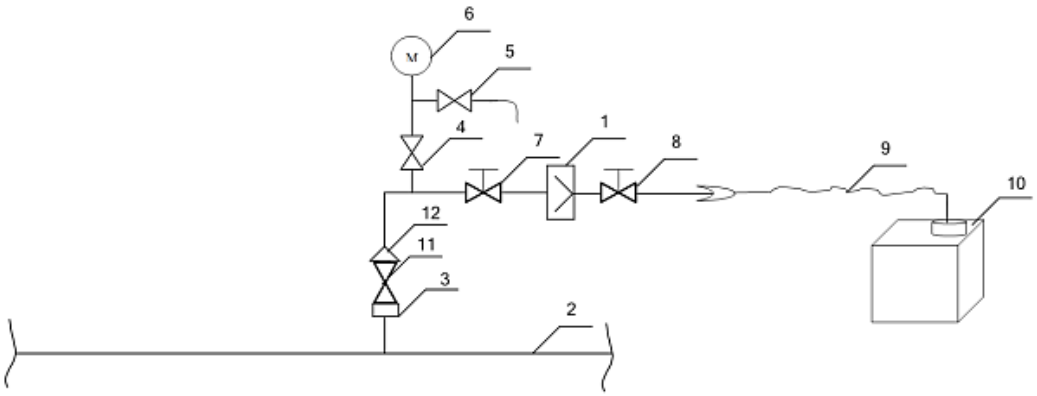
мұндағы: *GOAL* – квадраттық қателіктің орташа мәнінің талап етілетін шамасы (әдепкі мәні – 0); *SPREAD – radbas* функциясының тіктігін анықтайтын әсер ету параметрі (әдепкі мәні – 1); *P* – өлшемі $R \times Q$ болатын кіріс деректер массиві, мұнда *R* – кіріс параметрлерінің саны, Q – оқыту таңдамасындағы векторлар саны; *T* – өлшемі $S \times Q$ болатын мақсатты мәндер массиві, мұнда *S* – шығыс параметрлерінің немесе кластар саны.

Зерттеу нәтижелері

Қысым датчигі арқылы мұнай өнімін іріктеу сәтінде тіркелген қысым өзгерістерінің эксперименттік деректерін қарастырайық. Бұл деректер ағып кету орны мен қысым датчигі арасындағы әртүрлі қашықтықтарда, сондай-ақ ағып кету шығынының әртүрлі мәндерінде алынған (1-кесте) [14-16]. Деректер магистральдық құбыржолдағы ағып кетуді анықтау жүйесін (ҚАКАЖ) сынау барысында эксперименттік жолмен алынған. Сынақтар барысында ҚАКАЖ жұмысы құбыржолдан сұйықтықтың ағып кетуін имитациялау арқылы тексерілді, яғни мұнай өнімі магистральдық құбыржолдан қысымсыз сыйымдылыққа іріктеліп алынды. Имитацияланған ағып кету мөлшері Ду 25 Ру 16 МПа шарлы кранының көмегімен реттелді (3-сурет).

Кесте 1 – ағып кету шығынының әртүрлі мәндері мен ағып кету орны мен қысым датчигі арасындағы қашықтыққа байланысты қысымның төмендеуі, $кгс/см^2$

Ағып кету шығыны, л/мин	Ағып кету орны мен қысым датчигі арасындағы қашықтық, км				
	79	60	53	44	40
160	0,0355	0,0450	0,0500	0,0570	0,0625
120	0,0350	0,0385	0,0430	0,0495	0,0535
100	0,0290	0,0360	0,0400	0,0465	0,0500
80	0,0265	0,0278	0,0284	0,0300	0,0315
60	-	-	-	0,0240	0,0248
40	-	-	-	-	0,0195



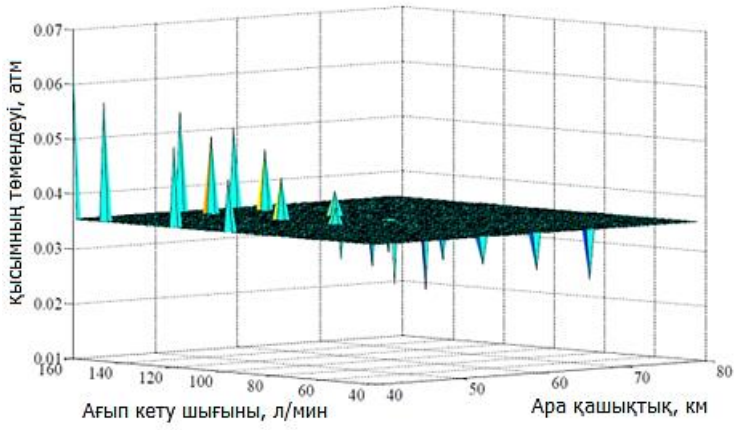
Сурет 3 – Магистральдық құбыржолдан мұнай өнімін іріктеу сұлбасы

3-суретте магистральдық құбыржолдан мұнай өнімін іріктеу сұлбасы көрсетілген, мұнда: 1 – ауыстырмалы дроссельдік шайбаларды орнатуға арналған фланецті қосылыс; 2 – магистральдық мұнай құбыры; 3 – фланецті қосылыс; 4 – ажыратқыш кран; 5 – ауаны шығару краны; 6 – МО-160 манометрі (0–60 кгс/см²), дәлдік класы 0,4; 7, 8 – Ду 25 Ру 16 МПа шарлы крандар; 9 – жоғары қысымды шланг; 10 – қысымсыз бак; 11 – Ду 100 ысырма; 12 – Ду 100-ден Ду 25-ке өтпелі қосылыс.

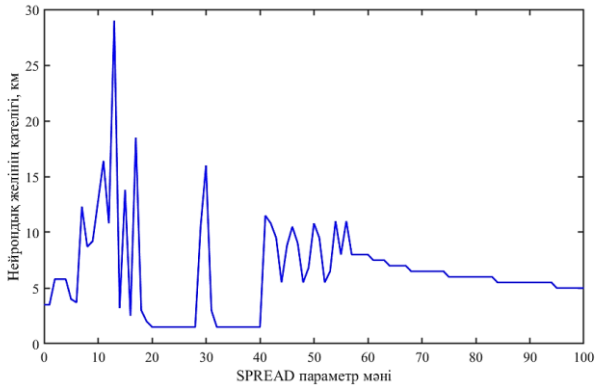
Зерттелетін тәуелділікті аппроксимациялау үшін радиалды-базистік архитектуралы нейрондық желі қолданылады (2-сурет). SPREAD әсер ету параметрінің мәнін өзгерту арқылы берілген функцияны ең жоғары дәлдікпен аппроксимациялауды қамтамасыз ететін радиалды-базистік желінің құрылымы таңдалды.

Бірінші кезеңде нейрондық желі қысым датчигінен 40, 53, 60 және 79 км қашықтықтарда орын алған ағып кетулер кезінде алынған эксперименттік деректер негізінде оқытылды. Осыдан кейін ағып кету координатасын анықтау арқылы нейрондық желінің дәлдігі тексерілді, яғни ағып кету 44 км қашықтықта және шығындары 80, 100, 120 және 160 л/мин болған жағдайда бағаланды (1-кесте). Бастапқы экспериментте SPREAD параметрінің мәні 0,1-ге тең деп қабылданды. Модельдеу нәтижелері бойынша аппроксимацияланатын функцияның графигі тұрғызылып, қателік есептелді.

Нәтижелерді талдау (4-сурет) көрсеткендей, SPREAD параметрінің кіші мәнінде (SPREAD = 0,1) радиалды-базистік нейрондық желі аппроксимацияның жеткілікті сапасын қамтамасыз етпейді: дәл нәтижелер тек желі оқытылған деректер үшін ғана алынады. Аппроксимация дәлдігін арттыру мақсатында SPREAD параметрі кең ауқымда (1-ден 100-ге дейін) өзгертілді. Нәтижесінде есептеу қателігінің SPREAD параметріне тәуелділік графигі тұрғызылды (5-сурет).

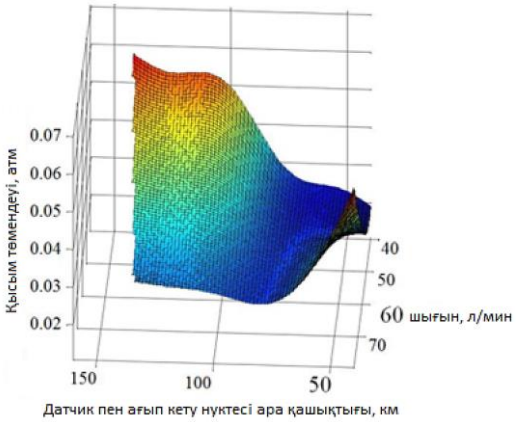


Сурет 4 – SPREAD = 0,1 кезінде радиалды-базистік нейрондық желіні қолдану арқылы алынған $\Delta P = f(Q_{\text{ак}}, l_{\text{ак}})$ тәуелділік графигі



Сурет 5 – Модельді 44 км қашықтықта тексеру кезінде радиалды-базистік нейрондық желінің есептеу қателігінің SPREAD параметріне тәуелділігі

Алынған нәтижелерді талдау ағып кету координатасын анықтаудың ең аз қателігі (1,5-2 км) SPREAD параметрінің 18-29 және 33-41 аралықтарындағы мәндерінде қол жеткізілетінін көрсетеді. SPREAD параметрінің оңтайлы мәні таңдалғаннан кейін екі айнымалыдан тұратын аппроксимацияланатын функцияның графигі тұрғызылды (6-сурет).



Сурет 6 – SPREAD = 35 кезінде радиалды-базистік нейрондық желіні қолдану арқылы алынған $\Delta P = f(Q_{\text{ак}}, l_{\text{ак}})$ тәуелділік графигі

Ғылыми нәтижелерді талқылау

Модельдеу нәтижелерін талдау радиалды-базистік нейрондық желінің қысымның төмендеуі, ағып кету шығыны және ағып кету орнына дейінгі қашықтық арасындағы зерттелетін тәуелділікті жоғары дәлдікпен аппроксимациялауға мүмкіндік беретінін көрсетеді. Алынған екі айнымалы функция күрт өзгерістерсіз бірқалыпты сипатқа ие және оқыту таңдамасының нүктелерінде де, тексеру нүктелерінде де жоғары аппроксимация дәлдігін қамтамасыз етеді. Сонымен қатар, қысым датчигінен 79 км қашықтықта ағып кету шығынының кіші мәндерінде (40 л/мин) функцияның белгілі бір ауытқуы байқалады. Бұл ауытқу аталған параметрлер аймағында эксперименттік деректер санының жеткіліксіздігімен түсіндіріледі. Алынған нәтижелер радиалды-базистік архитектураға негізделген әзірленген нейрондық желі моделінің ағып кету салдарынан туындайтын қысымның төмендеуі ΔP мен ағып кету шығыны $Q_{ут}$ және ағып кету орнына дейінгі қашықтық $l_{ут}$ арасындағы тәуелділікті жеткілікті дәлдікпен сипаттай алатынын көрсетеді.

Әзірленген модель орташа және ірі ағып кетулер кезінде ағып кету координатасын орташа квадраттық қателігі шамамен 1,9 км деңгейінде анықтауға мүмкіндік береді. Нейрондық желі моделін қолдану ағып кетуді анықтаудың параметрлік жүйесінің тиімділігін арттыруға ықпал етеді, өйткені ағып кету координатасын анықтау дәлдігі жоғарылайды. Ұсынылған модельді енгізу қолданыстағы бақылау жүйелерін елеулі жаңғыртуды талап етпейтінін атап өткен жөн, себебі оны бар қысым датчиктері мен контроллерлерді пайдалану арқылы жүзеге асыруға болады. Алайда, нейрондық желі моделінің аз ағып кетулер кезіндегі дәлдігін бағалау үшін қосымша эксперименттік зерттеулер жүргізу қажет.

Қорытынды

MATLAB ортасында әртүрлі шығын мәндері кезінде алынған эксперименттік деректер негізінде құбыржолдағы ағып кету координатасын анықтауға арналған радиалды-базистік нейрондық желі әзірленіп, жүзеге асырылды. Ұсынылған модель қысымның төмендеуі, ағып кету шығыны және ағып кету орнына дейінгі қашықтық арасындағы тәуелділікті тиімді аппроксимациялайды және орташа және ірі ағып кетулер үшін шамамен 1,9 км деңгейіндегі орташа квадраттық қателікті қамтамасыз етеді. Модельді іске асыру қолданыстағы ағып кетуді анықтау жүйелерін елеулі жаңғыртуды талап етпейді және ағып кету координатасын анықтау дәлдігін арттыруға мүмкіндік береді. Кіші ағып кетулер үшін қосымша эксперименттік тексерулер жүргізу қажет. Алынған нәтижелерді құбыржол тасымалдау жүйесін интеллектуалды мониторингтеу және диагностика жүйелерін әзірлеуде қолдануға болады. Болашақ зерттеулердің перспективалары нейрондық желілердің басқа архитектураларын, соның ішінде терең, рекуррентік және сверткіш модельдерді талдау және салыстырмалы бағалаумен, сондай-ақ нейрондық желілерді сигналдар теориясы мен статистикалық

талдаудың классикалық әдістерімен біріктіретін гибридтік тәсілдерді зерттеумен байланысты. Бұл өз кезегінде құбыржол жүйелерінің әртүрлі жұмыс режимдерінде ағып кету координатасын анықтаудың дәлдігі мен тұрақтылығын арттыруға мүмкіндік береді.

Әдебиеттер тізімі

1. Adegboye M.A. Recent advances in pipeline monitoring and oil leakage detection technologies: Principles and approaches / M.A. Adegboye, W.K. Fung, A. Karnik // Sensors. – 2019. – Vol. 19. – 2548. https://doi.org/10.3390/s19112548.
2. Arifin B. M. S., Li Z., Shah S. L., Meyer G. A., Colin A. A novel data-driven leak detection and localization algorithm using the Kantorovich distance // Computers & Chemical Engineering. – 2018. – Vol. 108. – P. 300-313. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2017.09.022.
3. Li S.Z. Leak detection of water distribution pipeline subject to failure of socket joint based on acoustic emission and pattern recognition / S.Z. Li, Y.J. Song, G.Q. Zhou // Measurement. – 2018. – Vol. 115. – P. 39-44. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.10.021.
4. Zhang S. Pipeline deformation monitoring using distributed fiber optical sensor / S. Zhang, B. Liu, J. He // Measurement. – 2019. – Vol. 133. – P. 208-213. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.10.021.
5. Pipeline rupture detection using real-time transient modelling and convolutional neural networks / J. Smith et al // Proceedings of the 12th International Pipeline Conference (IPC 2018), Calgary, Canada. – New York, NY: ASME, 2018. https://doi.org/10.1115/IPC2018-78426.
6. A novel location algorithm for pipeline leakage based on the attenuation of negative pressure wave / J. Li et al // Process Safety and Environmental Protection. – 2019. – Vol. 123. – P. 309-316. https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.01.010.
7. Deeppipe: A deep-learning method for anomaly detection of multi-product pipelines / J. Zheng et al // Energy. – 2022. – Vol. 259. – 125025. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125025.
8. A small leakage detection approach for gas pipelines based on CNN / J. Li et al // Proceedings of the CAA Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes (SAFEPROCESS), Xiamen, China. – 2019. – P. 390-394. https://doi.org/10.1109/SAFEPROCESS45799.2019.9213371.
9. A two-stage deep-learning based detection method for pipeline leakage and transient conditions / I. Amini et al // Proceedings of the IEEE Electric Power and Energy Conference (EPEC), Edmonton, Canada. – 2020. – P. 1-5. https://doi.org/10.1109/EPEC48502.2020.9320021.
10. Deep learning identifies leak in water pipeline system using transient frequency response / Z. Liao et al // Process Safety and Environmental Protection. – 2021. – Vol. 155. – P. 355-365. https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.09.033.
11. Cody R. Detecting leaks in water distribution pipes using a deep autoencoder and hydroacoustic spectrograms / R. Cody, B. Tolson, J. Orchard // Journal of Computing in Civil Engineering. – 2020. – Vol. 34. – 4020001. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000881.
12. Лурье М.В. Проектирование и эксплуатация нефтепроводов: учебник для студентов технических вузов / М.В. Лурье, Б.Н. Мастобаев, А.Е. Сощенко. – М.: Инфра-Инженерия, 2023. – 384 с.
13. Беккер А.А. Трубопроводный транспорт нефти и газа: учебное пособие / А.А. Беккер, В.А. Иванов. – СПб.: Лань, 2020. – 256 с.
14. Peabody R. (Ed.) Handbook of pipeline engineering. – Cham: Springer, 2023.
15. Булатов А.Ф. Повышение эффективности автоматизированной системы обнаружения утечек из нефтепродуктопроводов на основе интеллектуальных технологий / А.Ф. Булатов. – Уфа: УГАТУ, 2015. – 235 с.
16. Osiadacz A. Flow modelling and control in pipeline systems: A formal systematic approach / A. Osiadacz. – Cham: Springer, 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-59246-2.
17. Pipeline inspection and health monitoring technology: The key to integrity management / H. Lu et al. – Singapore: Springer, 2023. https://doi.org/10.1007/978-981-19-6798-6.

References

1. Adegboye M.A. Recent advances in pipeline monitoring and oil leakage detection technologies: Principles and approaches / M.A. Adegboye, W.K. Fung, A. Karnik // Sensors. – 2019. – Vol. 19. – 2548. https://doi.org/10.3390/s19112548. (In English).

2. Arifin B. M. S., Li Z., Shah S. L., Meyer G. A., Colin A. A novel data-driven leak detection and localization algorithm using the Kantorovich distance // Computers & Chemical Engineering. – 2018. – Vol. 108. – P. 300-313. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2017.09.022. (In English).
3. Li S.Z. Leak detection of water distribution pipeline subject to failure of socket joint based on acoustic emission and pattern recognition / S.Z. Li, Y.J. Song, G.Q. Zhou // Measurement. – 2018. – Vol. 115. – P. 39-44. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.10.021. (In English).
4. Zhang S. Pipeline deformation monitoring using distributed fiber optical sensor / S. Zhang, B. Liu, J. He // Measurement. – 2019. – Vol. 133. – P. 208-213. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.10.021. (In English).
5. Pipeline rupture detection using real-time transient modelling and convolutional neural networks / J. Smith et al // Proceedings of the 12th International Pipeline Conference (IPC 2018), Calgary, Canada. – New York, NY: ASME, 2018. https://doi.org/10.1115/IPC2018-78426. (In English).
6. A novel location algorithm for pipeline leakage based on the attenuation of negative pressure wave / J. Li et al // Process Safety and Environmental Protection. – 2019. – Vol. 123. – P. 309-316. https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.01.010. (In English).
7. Deeppipe: A deep-learning method for anomaly detection of multi-product pipelines / J. Zheng et al // Energy. – 2022. – Vol. 259. – 125025. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125025. (In English).
8. A small leakage detection approach for gas pipelines based on CNN / J. Li et al // Proceedings of the CAA Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes (SAFEPROCESS), Xiamen, China. – 2019. – P. 390-394. https://doi.org/10.1109/SAFEPROCESS45799.2019.9213371. (In English).
9. A two-stage deep-learning based detection method for pipeline leakage and transient conditions / I. Amini et al // Proceedings of the IEEE Electric Power and Energy Conference (EPEC), Edmonton, Canada. – 2020. – P. 1-5. https://doi.org/10.1109/EPEC48502.2020.9320021. (In English).
10. Deep learning identifies leak in water pipeline system using transient frequency response / Z. Liao et al // Process Safety and Environmental Protection. – 2021. – Vol. 155. – P. 355-365. https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.09.033. (In English).
11. Cody R. Detecting leaks in water distribution pipes using a deep autoencoder and hydroacoustic spectrograms / R. Cody, B. Tolson, J. Orchard // Journal of Computing in Civil Engineering. – 2020. – Vol. 34. – 4020001. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000881. (In English).
12. Lur'e M.V. Proektirovanie i ehkspluatatsiya nefteprovodov: uchebnik dlya studentov tekhnicheskikh vuzov / M.V. Lur'e, B.N. Mastobaev, A.E. Soshchenko. – M.: Infra-Inzheneriya, 2023. – 384 s. (In Russian).
13. Bekker A.A. Truboprovodnyi transport nefti i gaza: uchebnoe posobie / A.A. Bekker, V.A. Ivanov. – SPb.: Lan', 2020. – 256 s. (In Russian).
14. Peabody R. (Ed.) Handbook of pipeline engineering. – Cham: Springer, 2023. (In English).
15. Bulatov A.F. Povyshenie ehffektivnosti avtomatizirovannoi sistemy obnaruzheniya utechek iz nefteproduktoprovodov na osnove intellektual'nykh tekhnologii / A.F. Bulatov. – Ufa: UGATU, 2015. – 235 s. (In Russian).
16. Osiadacz A. Flow modelling and control in pipeline systems: A formal systematic approach / A. Osiadacz. – Cham: Springer, 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-59246-2. (In English).
17. Pipeline inspection and health monitoring technology: The key to integrity management / H. Lu et al. – Singapore: Springer, 2023. https://doi.org/10.1007/978-981-19-6798-6. (In English).

Алғыс білдіру

Зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті тарапынан қаржыландырылды (грант № AP26197893).

Д.К. Сатыбалдина[1], Н.Б. Шмитов[1*], Н.М. Тешебаев[2], А.Ж. Закарина[1], К.С. Кульниязова[1]
[1]Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева,
010008, Республика Казахстан, г. Астана, ул. Сатпаева, 2
[2]Казахский национальный университет им. Аль-Фараби,
050040, Республика Казахстан, г. Алматы, пр. Аль-Фараби, 71
*e-mail: nurbol-970817@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТЫ УТЕЧКИ В МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДАХ

Трубопроводы широко используются для транспортировки воды, нефти, газа и других жидких и газообразных сред. Возникновение утечек в трубопроводных системах приводит к значительным потерям природных ресурсов и может создавать угрозу окружающей среде и общественной безопасности. В связи с этим задача своевременного обнаружения и локализации утечек является одной из актуальных проблем нефтегазовой отрасли. В работе рассматривается задача определения координаты утечки в трубопроводе на основе данных измерений давления с использованием методов искусственного интеллекта. Предложен подход к локализации утечек, основанный на аппроксимации зависимости падения давления от расхода утечки и расстояния до места утечки с применением радиально-базисной нейронной сети, реализованной в среде MATLAB. Экспериментальные данные получены в ходе испытаний системы обнаружения утечек при имитации различных режимов утечки. Результаты моделирования показали, что разработанная модель обеспечивает эффективную аппроксимацию исследуемой зависимости и позволяет определять координату утечки со среднеквадратичной погрешностью около 1,9 км для средних и крупных утечек, что подтверждает перспективность применения нейросетевых методов в задачах мониторинга трубопроводных систем.

Ключевые слова: *Нейронная сеть, утечка в трубопроводе, падение давления, аппроксимация функции, система обнаружения утечек.*

D.K. Satybaldina[1], N.B. Shmitov[1*], N.M. Teshebayev[2], A.Zh. Zakarina[1], K.S. Kulniyazova[1]
[1]L.N. Gumilyov Eurasian National University,
010008, Republic of Kazakhstan, Astana, 2 Satpayev St.
[2]Al-Farabi Kazakh National University,
050040, Republic of Kazakhstan, Almaty, 71 Al-Farabi Ave.
[*]e-mail: nurbol-970817@mail.ru

APPLICATION OF A NEURAL NETWORK FOR DETERMINING THE LEAK LOCATION IN MAIN PIPELINES

Pipelines are widely used for the transportation of water, oil, gas, and other liquid and gaseous media. The occurrence of leaks in pipeline systems leads to significant losses of natural resources and may pose a threat to the environment and public safety. In this regard, the problem of timely leak detection and localization remains one of the most important challenges in the oil and gas industry. This paper addresses the problem of determining the leak location in a pipeline based on pressure measurement data using artificial intelligence methods. An approach to leak localization is proposed based on approximating the relationship between pressure drop, leak flow rate, and the distance to the leak location using a radial basis function neural network implemented in the MATLAB environment. Experimental data were obtained during testing of a leak detection system under simulated leak conditions with different operating modes. The simulation results demonstrate that the developed model provides an effective approximation of the studied relationship and allows the leak location to be determined with a root-mean-square error of approximately 1.9 km for medium and large leaks, confirming the potential of neural network-based methods for pipeline monitoring applications.

Key words: *neural network, pipeline leak, pressure drop, function approximation, leak detection system.*

Авторлар туралы мәліметтер

Дана Каримтаевна Сатыбалдина – қауымдастырылған профессор, техника ғылымдарының кандидаты, «Жүйелік талдау және басқару» кафедрасының профессор м.а., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: satybaldina_dk@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5445-4516.

Нурбол Бейбитович Шмитов* – «Автоматтандыру және басқару» мамандығы бойынша докторант, «Жүйелік талдау және басқару» кафедрасы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: nurbol-970817@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6402-9633.

Нұрдаулет Мұратбекұлы Тешебаев – «Интеллектуалды басқару жүйелері» мамандығы бойынша докторант, Жасанды интеллект және Big Data кафедрасы, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: nurdauletteshebaev@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6560-6578.

Айна Жанузаковна Закарина – PhD, «Жүйелік талдау және басқару» кафедрасының аға оқытушысы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: zakarina_azh@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-3875-2883.

Корлан Сагындыковна Кульниязова – «Жүйелік талдау және басқару» кафедрасының аға оқытушысы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: kulniyazova_ks@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8320-2091.

Сведения об авторах

Дана Каримтаевна Сатыбалдина – ассоциированный профессор, кандидат технических наук, и.о. профессора кафедры «Системный анализ и управление», Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Республика Казахстан; e-mail: satybaldina_dk@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5445-4516.

Нурбол Бейбитович Шмитов* – докторант, специальность «Автоматизация и управление» кафедры «Системный анализ и управление», Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Республика Казахстан; e-mail: nurbol-970817@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6402-9633.

Нұрдаулет Мұратбекұлы Тешебаев – докторант, специальность «Интеллектуальные системы управления» кафедры Искусственного интеллекта и Big Data, Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, Республика Казахстан; e-mail: nurdauletteshebaev@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6560-6578.

Айна Жанузаковна Закарина – PhD, старший преподаватель кафедры «Системный анализ и управление»; Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Республика Казахстан; e-mail: zakarina_azh@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-3875-2883.

Корлан Сагындыковна Кульниязова – старший преподаватель кафедры «Системный анализ и управление»; Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Республика Казахстан; e-mail: kulniyazova_ks@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8320-2091.

Information about the authors

Dana Karimtaevna Satybaldina – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Acting Professor of the Department of Systems Analysis and Control, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Republic of Kazakhstan; e-mail: satybaldina_dk@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5445-4516.

Nurbol Beibitovich Shmitov* – PhD student in Automation and Control, Department of Systems Analysis and Control, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Republic of Kazakhstan; e-mail: nurbol-970817@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6402-9633.

Nurdaulet Muratbekuli Teshebayev – PhD student in Intelligent Control Systems, Department of Artificial Intelligence and Big Data, Al-Farabi Kazakh National University, Republic of Kazakhstan; e-mail: nurdauletteshebaev@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6560-6578.

Aina Zhanuzakovna Zakarina – PhD, Senior Lecturer of the Department of Systems Analysis and Control, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Republic of Kazakhstan; e-mail: zakarina_azh@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-3875-2883.

Korlan Sagyndykovna Kulniyazova – Senior Lecturer of the Department of Systems Analysis and Control, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Republic of Kazakhstan; e-mail: kulniyazova_ks@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8320-2091.

Редакцияға енуі 30.03.2026
Өңдеуден кейін түсуі 23.04.2026
Жариялауға қабылданды 27.04.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-5

МРНТИ: 50.43.15

CC BY 4.0
Check for updates

Р.С. Бекбаева, М.Д. Сарбаева*, К.С. Бекбаев, Г.Б. Абдилова, Н.А. Айманбетов
Шәкәрім университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қаласы, Глинки көшесі, 20А
***e-mail: sarbayeva0104@mail.ru**

РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ИЗВЛЕЧЕНИЯ САХАРОВ ИЗ ПШЕНИЧНОЙ СОЛОМЫ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КИСЛОТНОГО И ФЕРМЕНТАТИВНОГО ГИДРОЛИЗА

Аннотация: *Представлена разработка и экспериментальная верификация автоматизированной системы управления двухстадийным гидролизом пшеничной соломы, реализованной на основе интеграции динамической кинетической модели в контур модельно-предиктивного управления. Объект управления характеризуется нелинейной динамикой, наличием*

©Р.С. Бекбаева, М.Д. Сарбаева, К.С. Бекбаев, Г.Б. Абдилова, Н.А. Айманбетов, 2026

технологических ограничений и чувствительностью к вариациям состава сырья, включая содержание целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина, что обосновывает применение предиктивных методов управления. В структуре АСУ реализована иерархическая архитектура: локальные PID-регуляторы обеспечивают стабилизацию температурного и pH-режимов, тогда как модельно-предиктивное управление осуществляет оптимизацию управляющих воздействий по критерию максимизации выхода сахаров с учетом ограничений по температуре, давлению и времени обработки. Математическая модель включает кинетику кислотного гидролиза (гемицеллюлоза–ксилоза-фурфурол) и ферментативной стадии на основе модифицированного уравнения Михаэлиса-Ментен с учетом ингибирования и инактивации ферментов. Управление реализовано на дискретной модели состояния с шагом 1 мин и учетом переходных процессов. Система реализована на базе программируемого логического контроллера с интеграцией SCADA для сбора и визуализации данных. Экспериментальная апробация показала повышение выхода сахаров до 76-85 %, снижение коэффициента вариации до 4 %, уменьшение концентрации ингибиторов, сокращение времени стабилизации и энергозатрат, а также устойчивость к возмущениям и изменениям состава сырья

Ключевые слова: *автоматизированная система управления, модельно-предиктивное управление, математическое моделирование, гидролиз, пшеничная солома, лигноцеллюлозное сырьё, извлечение сахаров.*

Введение

Пшеничная солома является одним из наиболее доступных видов агропромышленных отходов в зернопроизводящих регионах. Мировое производство пшеницы превышает 780 млн т в год, при этом соотношение соломы к зерну составляет 1:1-1,3, что формирует значительные объёмы лигноцеллюлозного сырья, большая часть которого не используется, несмотря на высокий потенциал как источника моносахаридов [1].

Спрос на растворимые сахара растёт в связи с развитием биотоплива и биопродуктов; наблюдается дефицит сахара (до 2,95-5,4 млн т), что усиливает интерес к альтернативным источникам углеводов [2].

Традиционные методы гидролиза имеют ограничения: кислотный сопровождается образованием ингибиторов, подавляющих последующую ферментацию, а ферментативный требует длительного времени и высоких доз ферментов [3]. Отсутствие предобработки снижает затраты, но усложняет кинетику и управление процессом [4].

Математическое моделирование включает кинетические модели кислотного гидролиза [5] и модели ферментативной стадии на основе уравнения Михаэлиса-Ментен [6], которые обычно применяются при фиксированных условиях и редко используются в системах управления реального времени.

Автоматизация гидролиза ограничена применением PID- и нечетких регуляторов. MPC показало свою эффективность для ферментативного гидролиза [7], однако существующие решения ориентированы на предварительно обработанное сырьё и не учитывают жёсткие ограничения процесса.

Таким образом, отсутствуют комплексные решения для интеграции кинетических моделей в системы управления двухстадийным гидролизом пшеничной соломы без предварительной обработки в реальном времени.

Цель исследования – разработать и экспериментально верифицировать автоматизированную систему управления процессом извлечения редуцирующих сахаров из пшеничной соломы на основе математической модели двухстадийного гидролиза.

Для достижения цели решались задачи: получение экспериментальных данных, построение кинетической модели, разработка АСУ на основе MPC и экспериментальная проверка её эффективности.

Научная новизна заключается в разработке и верификации кинетической модели двухстадийного гидролиза пшеничной соломы без предобработки и её интеграции в систему MPC в реальном времени.

Условия и методы исследования

Пшеничная солома была получена из Восточно-Казахстанского региона (Семей). Сырьё сушили до влажности 8-10 % и измельчали до фракции 1-5 мм. Состав определяли стандартными методами: содержание целлюлозы 38-42% (по методу Кюршнера-Ханак), гемицеллюлозы 24-28%, лигнина 16-20% (по Класону), золы 4-6 %, влажности 9-11%.

Кислотный гидролиз проводили в лабораторном автоклаве (5 л) при 121°C и 1,1 атм. Загружали 200 г соломы и раствор H_2SO_4 (0,5-2%) при гидромодуле 1:10. Время выдержки составляло 30-120 мин. После реакции суспензию охлаждали, фильтровали, промывали, нейтрализовали до pH 5,5-6,0 и удаляли осадок. Анализ гидролизатов выполняли по содержанию редуцирующих сахаров (DNS-метод с калибровкой по глюкозе) и моносахаридов (ВЭЖХ). Ингибиторы определяли методом ВЭЖХ с УФ-детектором.

Ферментативный гидролиз проводили в биореакторе (1 л) с лопастной мешалкой (200 об/мин) при 45-50 °C и pH 4,8-5,0. Загружали 50-100 г сухого остатка, цитратный буфер (0,05 М), ферментный комплекс (Cellic CTec2 или аналог, 15-40 FPU/г целлюлозы + β-глюкозидаза 20-50 CBU/г). Продолжительность процесса составляла 48-96 ч. Пробы анализировали аналогично кислотной стадии [8].

Биореактор (1 л) оснащён датчиками температуры, pH и концентрации сахаров. Перемешивание, дозирование реагентов и терморегулирование обеспечивались стандартным лабораторным оборудованием.

Кинетическое моделирование выполняли раздельно. Кислотную стадию описывали моделью Саемана (гемицеллюлоза → ксилоза → фурфурол); параметры определяли методом наименьших квадратов (Python, SciPy), R^2 = 0,92–0,96. Система уравнений:

$$\begin{cases} \dfrac{d[H]}{dt} = -k_1[H], \\ \dfrac{d[X]}{dt} = k_1[H] - k_2[X], \\ \dfrac{d[F]}{dt} = k_2[X]. \end{cases} \quad (1)$$

где $[H]$ – концентрация гемицеллюлозы, г·л$^{-1}$; $[X]$ – концентрация ксилозы, г·л$^{-1}$; $[F]$ – концентрация фурфурола, г·л$^{-1}$; k_1, k_2 – константы скоростей реакций мин$^{-1}$, зависящие от температуры и кислотности среды.

Модель ферментативной стадии основывали на уравнении Михаэлиса-Ментен с учётом ингибирования продуктами и инактивации фермента:

$$V = \frac{V_{max}[S]}{K_m\left(1 + \frac{[P]}{K_i}\right) + [S]} \cdot e^{-k_d t} \quad (2)$$

где $[S]$ – концентрация субстрата (целлюлозы), г·л$^{-1}$; $[P]$ – концентрация продуктов реакции, г·л$^{-1}$; V_{max} – максимальная скорость гидролиза, г·л$^{-1}$·мин$^{-1}$; K_m – Михаэлиса, г·л$^{-1}$; K_i – константа ингибирования, г·л$^{-1}$; k_d – константа инактивации, мин$^{-1}$.

Параметры определяли нелинейной регрессией (Python, SciPy). Коэффициент детерминации для ферментативной стадии R^2 достигал 0,89-0,94 [9].

АСУ реализована на базе ПЛК Siemens S7-1200 с интеграцией SCADA. Система обеспечивает сбор данных и управление процессом. Данные от датчиков передавались в SCADA-систему для мониторинга и управления процессом.

Управление реализовано в два уровня: PID-регуляторы для стабилизации температуры и pH и модельно-предиктивное управление (MPC). MPC основан на дискретной модели состояния (шаг 1 мин) с ограничениями по температуре и давлению. Параметры контроллера определяли по экспериментальным данным переходных процессов системы.

На рисунке 1 представлена система двухстадийного гидролиза с MPC-управлением. Эксперименты планировали по центральному композиционному дизайну с обработкой данных методом ANOVA ($p \leq 0,05$). Все эксперименты выполняли в трёх повторностях.

Результаты исследований

В ходе моделирования и экспериментальной верификации идентифицированы параметры кинетических моделей кислотной и ферментативной стадий (табл. 1). На рисунках 2-3 показаны результаты моделирования кислотной и ферментативной стадий.

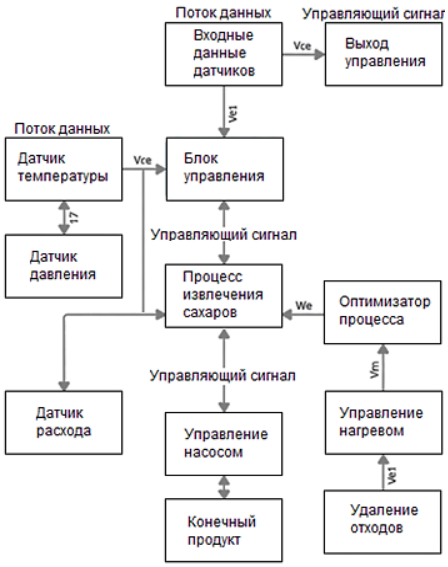


Рисунок 1 – Блок-схема АСУ процесса извлечения сахаров.

Таблица 1 – Параметры кинетических моделей кислотной и ферментативной стадий

Параметры	Единица	Кислотная стадия	Ферментативная стадия
k_1	мин$^{-1}$	0,042 (±0,005)	–
k_2	мин$^{-1}$	0,008 (±0,001)	–
V_{max}	г·л-1·ч-1	–	8,7 (±0,9)
K_m	г·л-1	–	4,8 (±0,6)
K_{iG}	г·л-1	–	18,5 (±2,2)
k_d	ч$^{-1}$	–	0,0012 (±0,0003)
K_{ads}	л·г -1	–	0,15 (±0,03)

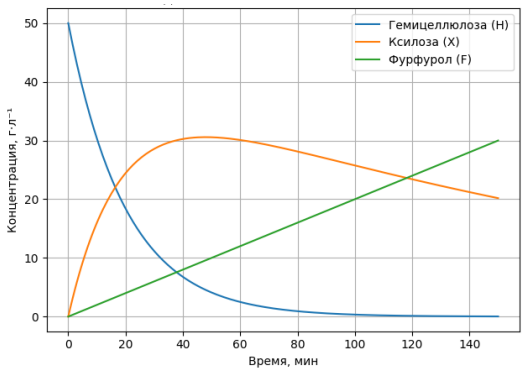


Рисунок 2 – Симулированные кривые по модели Саемана для кислотной стадии гидролиза (0,8 % H_2SO_4, 121 °C).

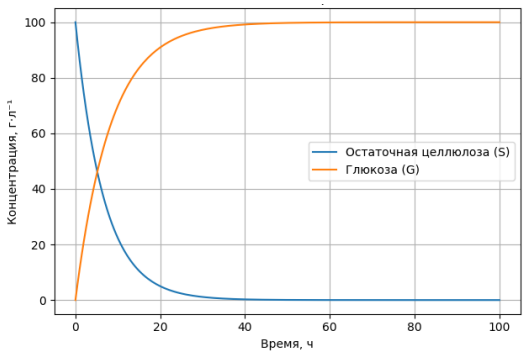
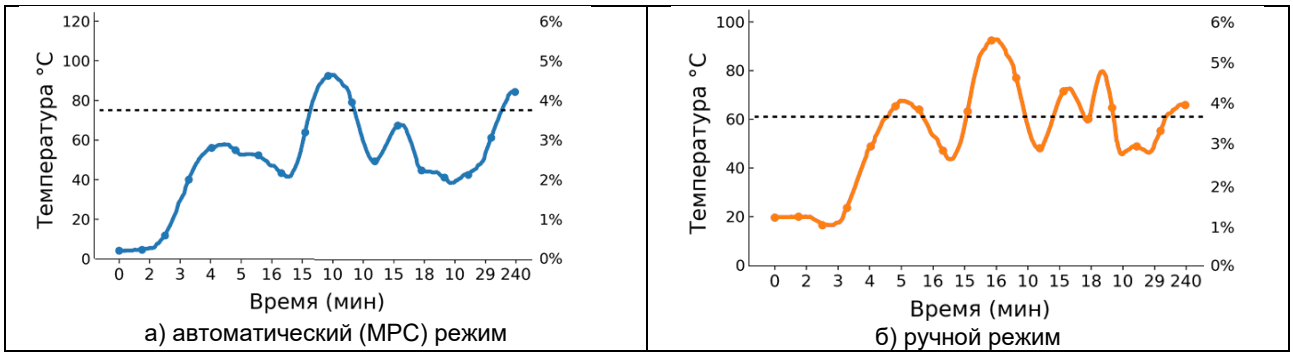


Рисунок 3 – Динамика субстрата и глюкозы на ферментативной стадии по модифицированной модели Михаэлиса-Ментен (20 FPU/г целлюлозы, 45-50 °C, pH 4,8–5,0).

Модель позволяет прогнозировать выход сахаров с точностью ±8 % при вариации концентрации кислоты и дозы фермента в пределах экспериментального диапазона.

Переходные процессы кислотной стадии показаны на рисунке 4.



а) автоматический (MPC) режим

б) ручной режим

Рисунок 4 – Переходные процессы температуры и выхода ксилозы (кислотная стадия, 0,8 % H_2SO_4)

В автоматическом режиме температура стабилизируется за 9-11 мин с перерегулированием <1 °C, пик ксилозы достигается через 52-58 мин, что соответствует расчётным значениям (0,8 % H_2SO_4). В ручном режиме отклонения снижают выход сахаров на 12-18 % и увеличивают концентрацию фурфурола на 25-40% (табл. 2).

Таблица 2 – Сравнение режимов управления

Параметры	Ручной режим	Автоматический режим (MPC)	Разница, %
Время стабилизации температуры, мин	14-22 (±4,1)	9-11 (±1,2)	–36…–50
Перерегулирование температуры, °C	2,8-5,1 (±1,3)	0,4-1,1 (±0,3)	–78…–86
Выход редуцирующих сахаров (общий), %	52-68 (±7,4)	66-85 (±3,2)	+14…+25
Коэффициент вариации выхода, %	10,8-12,6 (±1,1)	3,9-4,7 (±0,4)	–62…–68
Концентрация фурфурола, г·л-1	1,4-2,3 (±0,5)	0,9-1,4 (±0,2)	–35…–39

Обсуждение научных результатов

Разработанная кинетическая модель использована как основа системы управления гидролизом в реальном времени, обеспечивающей оптимальные условия, снижение образования ингибиторов и повышение воспроизводимости выхода сахаров.

Экспериментальная проверка выполнена в лабораторных условиях. Сравнивали ручной режим (121 °C, 60 мин, 0,8 % H_2SO_4, 20 FPU/г) и MPC (табл. 3); каждая серия включала 12 циклов и 6 при вариации содержания целлюлозы ±4 %.

Таблица 3 – Сравнение эффективности режимов управления

Показатели	Ручной режим	Автоматический режим (MPC)	Улучшение, %
Выход редуцирующих сахаров (общий), %	58,4 (±6,8)	76,2 (±3,1)	+30,5
Выход ксилозы (кислотная стадия), %	62,1 (±7,2)	74,8 (±2,9)	+20,5
Выход глюкозы (ферментативная стадия), %	55,3 (±6,5)	77,6 (±3,4)	+40,3
Концентрация фурфурола, г·л-1	1,9 (±0,4)	1,2 (±0,2)	–36,8
Коэффициент вариации выхода, %	11,7 (±1,4)	4,1 (±0,5)	–65,0
Общая продолжительность цикла, ч	96-112 (±8,2)	74-86 (±4,7)	–23,1
Энергозатраты на нагрев, кВт·ч/кг сырья	1,48 (±0,21)	1,12 (±0,14)	–24,3

Применение MPC увеличивает выход сахаров с 58,4 % до 76,2 %, снижает образование фурфурола с 1,9 до 1,2 г·л$^{-1}$ и уменьшает коэффициент вариации более чем в 2,5 раза. Повышение выхода наблюдается на обеих стадиях (ксилоза: 62,1 → 74,8 %, глюкоза: 55,3 → 77,6 %) при одновременном сокращении длительности процесса и энергозатрат. В MPC-режиме наблюдается более интенсивное накопление сахаров и стабильное плато без выраженной передеградации (рис. 5).

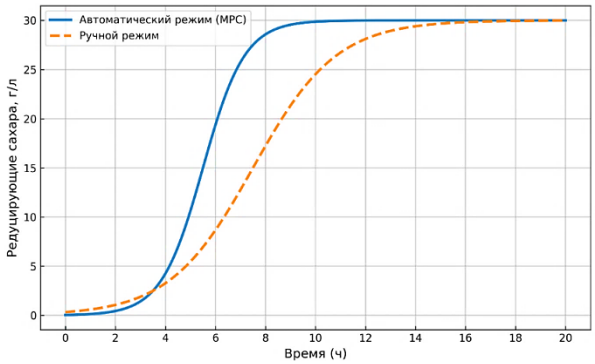


Рисунок 5 – Кривые накопления редуцирующих сахаров в автоматическом и ручном режимах

Анализ чувствительности показал устойчивость системы к вариациям состава сырья: при изменении содержания целлюлозы от 38 до 42 % отклонение выхода сахаров в MPC-режиме не превышало ±4,2 %, тогда как в ручном достигало ±11,8 %. Адаптивная идентификация параметров обеспечивала сохранение точности прогноза.

Кинетическая модель кислотной стадии адекватно описывает данные при концентрации H_2SO_4 0,5-2,0 % и времени 30-120 мин (R^2 = 0,91-0,93); для фурфурола наблюдается занижение при длительных временах, связанное с упрощением модели [9].

Модель ферментативной стадии на основе уравнения Михаэлиса-Ментен воспроизводит накопление глюкозы с R^2 = 0,89-0,94; отклонение 6-11 % и возрастает при увеличении дозы фермента из-за недоучёта его адсорбции на лигнине.

Применение MPC обеспечивает более быстрое достижение заданной температуры (9,7 ±1,0 мин против 17,4 ±3,7 мин) с меньшим перерегулированием, снижая деградацию ксилозы и образование ингибиторов. Сравнение показывает, что при разбавленном кислотном гидролизе выход ксилозы составляет 60-75 % [2] при концентрации фурфурола 1,5–3,0 г·л$^{-1}$ [3]; получено 74,8 % и 1,2 г·л$^{-1}$ соответственно. Для ферментативной стадии выход глюкозы (77,6 %) соответствует литературным данным (70-85%) без предобработки [10]. MPC-подходы обеспечивают повышение конверсии на 15-30%, что согласуется с полученным увеличением до 40,3 %; при этом используется необработанное сырьё.

Система эффективна в лабораторных условиях, однако масштабирование требует учёта тепло- и массообмена. Предложенный подход может быть применён для других видов агроотходов и интеграции онлайн-анализаторов сахаров. Полученные результаты подтверждают преимущество модельно-предиктивного управления над традиционными методами при гидролизе лигноцеллюлозы.

Заключение

Интеграция кинетической модели в систему модельно-предиктивного управления (MPC) обеспечивает повышение выхода сахаров на 25-40%, снижение образования ингибиторов на 30-40% и уменьшение вариабельности более чем в 2,5 раза по сравнению с ручным управлением. Энергозатраты на нагрев сокращаются на 20-25%, а продолжительность цикла – на 23%. Система воспроизводима и может быть адаптирована для полупромышленного масштаба при заданных ограничениях по температуре и давлению.

Разработанная модель двухстадийного гидролиза пшеничной соломы адекватно описывает кинетику процессов (121°C, 1,1 атм; 45-50°C) с высокой точностью (R^2 = 0,89-0,96), обеспечивая прогноз выхода сахаров с погрешностью не более ±8 %.

Подход обеспечивает стабильное извлечение сахаров без предварительной обработки сырья и может быть использован для масштабирования и переработки других видов лигноцеллюлозных отходов. При масштабировании разработанного подхода от лабораторного автоклава объемом 5 л к промышленным реакторам необходимо учитывать ограничения, связанные с изменением условий тепло- и массообмена, увеличением времени выхода на режим и возможной неоднородностью распределения концентраций, что потребует дополнительной настройки параметров предиктивной модели.

Список литературы

1. Lignocellulosic biomass to bioethanol: a comprehensive review with a focus on pretreatment / S.H. Mood et al // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2013. – Vol. 27. – P. 77-93.
2. The role of pretreatment in improving the enzymatic hydrolysis of lignocellulosic materials / S. Sun et al // Bioresource Technology. – 2016. – Vol. 199. – P. 49-58.
3. Acid hydrolysis of wheat straw: A kinetic study / E. Guerra-Rodríguez et al // Biomass and Bioenergy. – 2012. – Vol. 36. – P. 346-355.
4. A review on delignification of lignocellulosic biomass for enhancement of ethanol production potential / R. Singh et al // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2014. – Vol. 32. – P. 713-728.
5. Enzymatic hydrolysis of lignocellulosic biomass / H. Ostby et al // Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology. – 2020. – Vol. 47. P. 623-657.
6. Areeya S. Model predictive control of enzymatic hydrolysis reactor / S. Areeya, M. Sriariyanun // Springer. Lecture Notes in Networks and Systems. – 2021. – Vol. 251, E3. – P. 257-266.
7. Development of novel bioreactor control systems based on smart sensors and actuators / B. Wang et al // Frontiers in Bioengineering and Biotechnology. – 2020. – Vol. 8. – Article 7.
8. Евстафьев С.Н. Активация полисахаридов соломы пшеницы для ферментативного гидролиза методом высокотемпературного этанолиза / С.Н. Евстафьев, Е.С. Фомина // Биотехнология. – 2024. – Vol. 40, № 2. – С. 62-67.
9. Чемерис О.В. Ферментативный гидролиз соломы пшеницы и ячменя препаратом целлюлаз гриба Irpex lacteus / О.В. Чемерис // Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона. – 2025. – № 1. – С. 70-74.
10. Кедельбаев Б.Ш. Получение полисахаридов из пшеничной соломы / Б.Ш. Кедельбаев // Архивариус. – 2016. – № 5(9). – С. 623-657.

References

1. Lignocellulosic biomass to bioethanol: a comprehensive review with a focus on pretreatment / S.H. Mood et al // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2013. – Vol. 27. – P. 77-93. (In English).
2. The role of pretreatment in improving the enzymatic hydrolysis of lignocellulosic materials / S. Sun et al // Bioresource Technology. – 2016. – Vol. 199. – P. 49-58. (In English).
3. Acid hydrolysis of wheat straw: A kinetic study / E. Guerra-Rodríguez et al // Biomass and Bioenergy. – 2012. – Vol. 36. – P. 346-355. (In English).
4. A review on delignification of lignocellulosic biomass for enhancement of ethanol production potential / R. Singh et al // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2014. – Vol. 32. – P. 713-728. (In English).
5. Enzymatic hydrolysis of lignocellulosic biomass / H. Ostby et al // Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology. – 2020. – Vol. 47. P. 623-657. (In English).
6. Areeya S. Model predictive control of enzymatic hydrolysis reactor / S. Areeya, M. Sriariyanun // Springer. Lecture Notes in Networks and Systems. – 2021. – Vol. 251, E3. – P. 257-266. (In English).
7. Development of novel bioreactor control systems based on smart sensors and actuators / B. Wang et al // Frontiers in Bioengineering and Biotechnology. – 2020. – Vol. 8. – Article 7. (In English).
8. Evstafev S.N. Aktivatsiya polisakharidov solomy pshenitsy dlya fermentativnogo gidroliza metodom vysokotemperaturnogo ehtanoliza / S.N. Evstafev, E.S. Fomina // Biotekhnologiya. – 2024. – Vol. 40, № 2. – S. 62-67. (In Russian).
9. Chemeris O.V. Fermentativnyi gidroliz solomy pshenitsy i yachmenya preparatom tsellyulaz griba Irpex lacteus / O.V. Chemeris // Problemy ehkologii i okhrany prirody tekhnogennogo regiona. – 2025. – № 1. – S. 70-74. (In Russian).
10. Kedelbaev B.Sh. Poluchenie polisakharidov iz pshenichnoi solomy / B.Sh. Kedelbaev // Arkhivarius. – 2016. – № 5(9). – S. 623-657. (In Russian).

Информация о финансировании

Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № BR24992914).

Р.С. Бекбаева, М.Д. Сарбаева*, К.С. Бекбаев, Г.Б. Абдилова, Н.А. Айманбетов
Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20А
***e-mail: sarbayeva0104@mail.ru

БИДАЙ САБАНЫНАН ҚАНТТАРДЫ АЛУ ПРОЦЕСІН БАСҚАРУДЫҢ АВТОМАТТАНДЫРЫЛҒАН ЖҮЙЕСІН ҚЫШҚЫЛДЫҚ ЖӘНЕ ФЕРМЕНТАТИВТІ ГИДРОЛИЗДІ МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛЬДЕУ НЕГІЗІНДЕ ӘЗІРЛЕУ ЖӘНЕ ЕНГІЗУ

Ұсынылған жұмыста динамикалық кинетикалық модельді модельге негізделген болжамды басқару контурына интеграциялау арқылы жүзеге асырылған бидай сабанының екі сатылы гидролизін басқарудың автоматтандырылған жүйесін әзірлеу және эксперименттік верификациялау нәтижелері берілген. Басқару объектісі сызықтық емес динамикамен, технологиялық шектеулердің болуымен және шикізат құрамының, соның ішінде целлюлоза, гемицеллюлоза және лигнин мөлшерінің өзгеруіне жоғары сезімталдықпен сипатталады, бұл болжамды басқару әдістерін қолдануды негіздейді.

АБЖ құрылымында иерархиялық архитектура іске асырылған: жергілікті PID-реттегіштер температуралық және pH режимдерін тұрақтандырады, ал модельге негізделген болжамды басқару температура, қысым және өңдеу уақыты бойынша шектеулерді ескере отырып, қант шығымын максимизациялау критерийі бойынша басқарушы әсерлерді оңтайландырады. Математикалық модель қышқылды гидролиз кинетикасын (гемицеллюлоза-ксилоза-фурфурол) және ферменттердің ингибирленуі мен инактивациясын ескеретін модификацияланған Михаэлис-Ментен теңдеуіне негізделген ферментативті кезеңді қамтиды.

Басқару 1 минуттық қадаммен дискретті күй моделінде және өтпелі процестерді ескере отырып жүзеге асырылады. Жүйе деректерді жинау және визуализациялау үшін SCADA-мен біріктірілген бағдарламаланатын логикалық контроллер негізінде жүзеге асырылған. Эксперименттік апробация нәтижелері қант шығымының 76-85 %-ға дейін артуын, вариация коэффициентінің 4 %-ға дейін төмендеуін, ингибиторлар концентрациясының азаюын, тұрақтану уақыты мен энергия шығындарының қысқаруын, сондай-ақ жүйенің сыртқы әсерлер мен шикізат құрамының өзгерістеріне төзімділігін көрсетті.

Түйін сөздер: *автоматтандырылған басқару жүйесі, болжамды модельдік басқару, математикалық модельдеу, гидролиз, бидай сабаны, лигноцеллюлозалық шикізат, қанттарды алу.*

R.S. Bekbayeva, M.D. Sarbayeva*, K.S. Bekbayev, G.B. Abdilova, N.A. Aimanbetov
Shakarim University,
071412, Republic of Kazakhstan, Semey, 20A Glinka Street
***e-mail: sarbayeva0104@mail.ru

DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF AN AUTOMATED CONTROL SYSTEM FOR SUGAR EXTRACTION FROM WHEAT STRAW BASED ON MATHEMATICAL MODELING OF ACID AND ENZYMATIC HYDROLYSIS

The study presents the development and experimental verification of an automated control system for the two-stage hydrolysis of wheat straw, implemented through the integration of a dynamic kinetic model into a model predictive control framework. The control object is characterized by nonlinear dynamics, the presence of technological constraints, and sensitivity to variations in feedstock composition, including cellulose, hemicellulose, and lignin content, which justifies the application of predictive control methods.

The structure of the control system is based on a hierarchical architecture: local PID controllers ensure stabilization of temperature and pH conditions, while model predictive control optimizes control actions according to the criterion of maximizing sugar yield under constraints on temperature, pressure, and processing time. The mathematical model includes the kinetics of acid hydrolysis (hemicellulose-xylose-furfural) and the enzymatic stage based on a modified Michaelis-Menten equation accounting for enzyme inhibition and deactivation.

Control is implemented using a discrete state-space model with a time step of 1 minute, taking into account transient processes. The system is implemented on a programmable logic controller platform with SCADA integration for data acquisition and visualization. Experimental validation demonstrated an increase in sugar yield up to 76-85%, a reduction in the coefficient of variation to 4%, a decrease in inhibitor concentration, reduced stabilization time and energy consumption, as well as robustness to disturbances and variations in feedstock composition.

Key words: *automated control system, mathematical modeling, hydrolysis, wheat straw, sugar extraction.*

Сведения об авторах

Роза Серикжановна Бекбаева – кандидат технических наук, ассоциированный профессор кафедры «Автоматизация и информационные технологии», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: roza.toghan3194@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3218-4591.

Меруерт Даулетхановна Сарбаева* – докторант кафедры «Автоматизация и информационные технологии», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: sarbayeva0104@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-3605-4531.

Кайрат Серикжанович Бекбаев – кандидат технических наук, ассоциированный профессор, заведующий кафедрой «Биоинженерные системы», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: k.bekbaev80@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9591-0370.

Галия Бекеновна Абдилова – кандидат технических наук, ассоциированный профессор кафедры «Биоинженерные системы», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: galiyaabdilova055@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6647-6314.

Нургелди Алтынбекович Айманбетов – докторант кафедры «Биоинженерные системы», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: aimanbetov@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-9064-5636.

Авторлар туралы мәліметтер

Роза Серікжанқызы Бекбаева – техника ғылымдарының кандидаты, «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Шәкәрім университеті, Қазақстан; e-mail: roza.toghan3194@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3218-4591.

Меруерт Даулетханқызы Сарбаева* – «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасының докторанты, Шәкәрім университеті, Қазақстан; e-mail: sarbayeva0104@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-3605-4531.

Қайрат Серікжанұлы Бекбаев – техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, «Биоинженерлік жүйелер» кафедрасының меңгерушісі, Шәкәрім университеті, Қазақстан; e-mail: k.bekbaev80@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9591-0370.

Ғалия Бекенқызы Абдилова – техника ғылымдарының кандидаты, «Биоинженерлік жүйелер» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Шәкәрім университеті, Қазақстан; e-mail: galiyaabdilova055@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6647-6314.

Нұргелді Алтынбекұлы Айманбетов – «Биоинженерлік жүйелер» кафедрасының докторанты, Шәкәрім университеті, Қазақстан; e-mail: aimanbetov@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-9064-5636.

Information about the authors

Roza Bekbayeva – PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automation and Information Technologies, Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: roza.toghan3194@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3218-4591.

Meruert Sarbayeva* – PhD student of the Department of Automation and Information Technologies, Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: sarbayeva0104@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-3605-4531.

Kairat Bekbayev – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Bioengineering Systems, Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: k.bekbaev80@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9591-0370.

Galiya Abdilova – PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Bioengineering Systems, Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: galiyaabdilova055@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6647-6314.

Nurgeldi Aimanbetov – PhD student of the Department of Bioengineering Systems, Republic of Kazakhstan; e-mail: aimanbetov@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-9064-5636.

Поступила в редакцию 30.03.2026
Поступила после доработки 06.05.2026
Принята к публикации 12.05.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-6

BY 4.0
Check for updates

IRSTI: 50.43.19

N.G. Dzhumamukhambetov[1]*, E.T. Yerbayev[2], D.A. Dzhaparova[2], Zh.G. Dzhumamukhambetov[3], V.A. Yashkov[4]
[1]S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, 62 Zhenis Avenue, Astana, Kazakhstan
[2]Zhangir Khan West Kazakhstan Agrarian and Technical University,
51 Zhangir Khan Street, Uralsk, Kazakhstan
[3]H. Dosmukhamedov Atyrau University, 1 Student Avenue, Atyrau, Kazakhstan
[4]S. Utebayev Atyrau University of Oil and Gas, 45a Baimukhanov Street, Atyrau, Kazakhstan
*e-mail: nasikhan_d@mail.ru

MATHEMATICAL MODELING OF OPTICAL PROPERTIES OF ANTI-REFLECTION COATINGS FOR SILICON SOLAR CELLS

Abstract: *This paper presents a comprehensive mathematical modeling study of the effect of an anti-reflection coating on the optical characteristics and performance of a silicon solar cell. The analysis is based on the Fresnel equations and the thin-film interference model, which are used to evaluate the spectral dependence of the reflection and absorption coefficients of solar radiation in the wavelength range of 400-1100 nm. Particular attention is given to the interaction of incident light with the silicon surface and the role of optical losses in limiting device efficiency.*

The results demonstrate that the application of an anti-reflection coating based on silicon nitride (Si_3N_4) leads to a significant reduction in surface reflectance and a corresponding increase in the absorption of incident solar radiation. A detailed modeling study of the dependence of the reflection coefficient on the coating thickness was carried out, allowing the determination of the optimal thickness of the anti-reflection layer under standard illumination conditions. The obtained results are consistent with theoretical predictions and reported experimental data.

In addition, the influence of optical losses on the overall photovoltaic performance was evaluated by considering the spectral distribution of solar irradiance and its contribution to photocurrent generation. It was shown that reducing reflection losses directly contributes to an increase in photocurrent and an improvement in the efficiency of photovoltaic energy conversion. The proposed modeling approach provides a useful framework for the design and optimization of thin-film coatings in modern high-efficiency silicon solar cells and can be extended to other photovoltaic materials and multilayer coating systems.

Key words: *silicon solar cells; anti-reflection coatings; thin-film optics; reflection coefficient; spectral absorption; photocurrent; mathematical modeling.*

1. Introduction

The rapid development of photovoltaic power generation is one of the key trends in the global energy transition, driven by the need to reduce greenhouse gas emissions, improve energy security, and expand the use of renewable energy sources [1-3]. In recent years, solar photovoltaics has demonstrated sustained growth in installed capacity and electricity generation, becoming one of the most dynamically developing sectors of modern power engineering. In this context, improving the efficiency of solar cells remains one of the central scientific and technological tasks of photovoltaic research.

Among various photovoltaic technologies, silicon solar cells occupy a dominant position in the global market due to the abundance of silicon resources, mature fabrication technology, relatively low production cost, and high long-term operational reliability [4-7]. At the same time, despite the high level of industrial development of crystalline silicon photovoltaics, further improvement of their conversion efficiency remains highly relevant. One of the most significant factors limiting the performance of silicon solar cells is optical loss associated with reflection of incident solar radiation from the front surface of the semiconductor.

For a bare silicon surface, the reflection coefficient in the visible and near-infrared spectral regions may reach approximately 30%, which leads to a substantial reduction in the number of

©N.G. Dzhumamukhambetov, E.T. Yerbayev, D.A. Dzhaparova, Zh.G. Dzhumamukhambetov, V.A. Yashkov, 2026

photons entering the active semiconductor layer [8, 9]. As a result, the photocurrent decreases and the overall photovoltaic conversion efficiency is reduced. Therefore, suppression of front-surface reflection is an important problem in the design and optimization of high-efficiency silicon solar cells.

One of the most effective approaches to reducing optical losses is the application of anti-reflection coatings [9-11]. Such coatings are usually formed as thin dielectric films with a refractive index and thickness selected to ensure destructive interference of reflected waves and enhanced transmission of radiation into the semiconductor. In silicon photovoltaics, silicon nitride (Si_3N_4) is widely used as an anti-reflection coating material because it combines favorable optical properties, good surface passivation capability, and compatibility with industrial fabrication processes. The optical effectiveness of such coatings depends strongly on their refractive index, thickness, and spectral interaction with incident solar radiation.

A review of published studies shows that anti-reflection coatings for silicon solar cells have been investigated both experimentally and theoretically [10, 11]. However, in many works the analysis is limited either to general qualitative considerations or to calculations performed for a single wavelength, whereas practical photovoltaic performance is determined by the behavior of the structure in a broad solar spectrum. In addition, the influence of coating thickness on the reflection coefficient is often discussed without sufficiently detailed spectral modeling over the full operating wavelength range relevant to silicon solar cells.

In this regard, mathematical modeling of the spectral optical characteristics of silicon solar cells with anti-reflection coatings is of considerable scientific and practical interest [12-15]. Such modeling makes it possible to evaluate the influence of coating parameters on reflection suppression, absorption enhancement, and potential photocurrent growth, as well as to determine the optimal coating thickness for photovoltaic applications.

The aim of this study is to mathematically model the influence of an anti-reflection coating on the optical characteristics of a silicon solar cell in the wavelength range of 400-1100 nm. The study is based on the Fresnel equations and the thin-film interference model. Special attention is given to the spectral dependences of reflection and absorption, the effect of coating thickness on optical performance, and the determination of the optimal thickness of a silicon nitride anti-reflection layer.

The scientific significance of the work lies in the development of a physically substantiated optical model that relates the spectral reflection coefficient, absorption characteristics, and coating thickness for a silicon solar cell with a dielectric anti-reflection layer. The practical significance of the study is associated with the possibility of using the obtained results in the design and optimization of silicon photovoltaic converters with improved optical and energy performance.

Unlike conventional studies limited to single-wavelength analysis or simplified optical estimations, the present work considers the spectral behavior of reflection and absorption in the full wavelength range relevant for silicon solar cells (400-1100 nm). In addition, the model is oriented toward practical photovoltaic applications under real operating conditions, including the evaluation of photocurrent generation based on the spectral distribution of solar radiation. This approach allows a more comprehensive assessment of the influence of anti-reflection coatings on the energy performance of silicon solar cells.

2. Theoretical Model

2.1 Reflection of Light from the Silicon Surface

At normal incidence of light, the reflection coefficient at the interface between two media is determined by the Fresnel equation [12, 13]:

$$R = [\frac{(n_1 - n_2)}{(n_1 + n_2)}]^2$$

where R is the reflection coefficient, n_1 is the refractive index of the first medium, and n_2 is the refractive index of the second medium.

For the air–silicon interface, we assume $n_{air} \approx 1$ and $n_{Si} \approx 3.5$.

Substituting these values into the expression for the reflection coefficient gives

$$R_{bare} = [\frac{(1-3,5)}{(1+3,5)}]^2 \approx 0,31$$

Thus, approximately 30% of the incident solar radiation is reflected from the silicon surface.

The spectral values of the reflection and absorption coefficients of the silicon solar cell in the wavelength range of 400-1100 nm were obtained based on an optical model of the interaction between electromagnetic radiation and the silicon surface. The calculations were performed using the Fresnel equations and literature data on the refractive indices of silicon and anti-reflection coatings [9-12]. The spectral refractive indices of silicon and coating materials were taken from established literature sources and standard optical databases. Interpolation was applied to obtain continuous spectral dependences in the wavelength range of 400-1100 nm.

The spectral reflection values for silicon were obtained by computational interpolation and used to determine the spectral absorption under the condition of energy balance. The spectral values of the reflection and absorption coefficients of the silicon solar cell are presented in Table 1.

To evaluate the influence of the anti-reflection coating, a silicon nitride (Si_3N_4) layer with a thickness of d=75 nm was considered, corresponding to the quarter-wave interference condition for the average wavelength of the solar spectrum (λ≈600 nm).

Table 1 – Spectral characteristics of a silicon solar cell with a Si_3N_4 anti-reflection coating (thickness 75 nm) and without coating

Wavelength λ (nm)	Reflection coefficient (without coating)	Reflection coefficient (with coating)	Absorption (without coating)	Absorption (with coating)
400	0.350	0.100	0.650	0.900
450	0.348	0.099	0.652	0.901
500	0.343	0.097	0.657	0.903
550	0.336	0.094	0.664	0.906
600	0.327	0.091	0.673	0.909
650	0.317	0.087	0.683	0.913
700	0.308	0.083	0.692	0.917
750	0.300	0.080	0.700	0.920
800	0.292	0.077	0.708	0.923
850	0.286	0.074	0.714	0.926
900	0.280	0.072	0.720	0.928
950	0.275	0.070	0.725	0.930
1000	0.272	0.069	0.728	0.931
1050	0.270	0.068	0.730	0.932
1100	0.270	0.068	0.730	0.932

2.2 Condition for Optimal Anti-Reflection Coating

To reduce reflection, an intermediate layer with a refractive index

$$n_1 = \sqrt{n_0 n_s}$$

is used, where n_o is the refractive index of air and n_s is the refractive index of silicon.

This relationship corresponds to the condition of minimum reflection for a single-layer anti-reflection coating under normal incidence of light. The minimum reflection occurs when the thickness of the coating corresponds to the quarter-wave condition

$$d = \frac{\lambda}{4n_1}$$

where d is the coating thickness and λ is the wavelength of the incident radiation.

For a silicon nitride coating, we assume n_1≈2.0. For the design wavelength λ=600 nm, we obtain d≈75 nm.

Therefore, the optimal thickness of the anti-reflection coating is approximately 70–80 nm.

2.3 Thin-Film Interference Model

In the presence of an anti-reflection coating, reflection from the surface of a silicon solar cell is determined by the interference of electromagnetic waves reflected from the upper and lower boundaries of the coating layer [14].

The reflection coefficient of the system can be expressed as

$$R = |r|^2$$

where r is the complex amplitude reflection coefficient.

For a three-layer system consisting of air, an anti-reflection coating, and silicon, the complex reflection coefficient can be written as

$$r = \frac{(r_{01} + r_{12}e^{2i\beta})}{(1 + r_{01}r_{12}e^{2i\beta})}$$

where

- r_{01} is the reflection coefficient at the air–coating interface
- r_{12} is the reflection coefficient at the coating–silicon interface
- n_0 is the refractive index of air
- n_1 is the refractive index of the coating
- n_2 is the refractive index of silicon.

The Fresnel reflection coefficients at the boundaries are defined as

$$r_{01} = \frac{(n_0 - n_1)}{(n_0 + n_1)}$$

$$r_{12} = \frac{(n_1 - n_2)}{(n_1 + n_2)}$$

The phase shift of the electromagnetic wave propagating through the coating layer is determined by

$$\beta = \frac{(2\pi n_1 d)}{\lambda}$$

where

- n_1 is the refractive index of the coating
- d is the thickness of the coating layer
- λ is the wavelength of the incident radiation.

Thus, the reflection coefficient depends on both the refractive indices of the media and the thickness of the coating layer. Due to the interference of reflected waves, the reflection coefficient becomes a periodic function of the coating thickness (Figure 1).

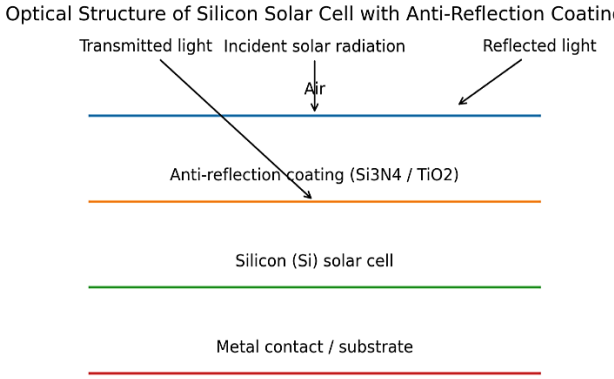


Figure 1 – Optical structure of a silicon solar cell with an anti-reflection coating, showing the transmission, reflection, and absorption of incident solar radiation

It should be noted that the present model assumes normal incidence of radiation. In real operating conditions, solar radiation reaches the surface at varying angles; therefore, future extensions of the model may include angular and polarization effects.

3. Spectral Model of Photogeneration

For a more accurate analysis, it is necessary to take into account the spectral distribution of solar radiation. The photocurrent of a solar cell is determined by the expression [5, 6]:

$$J_{ph} = q\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi(\lambda)\cdot(1-R(\lambda))\cdot[1-e^{-\alpha(\lambda)W}]d\lambda$$

where

J_{ph} – photocurrent density (A/m²),

q – elementary electron charge (1.6×10^{-19} C),

Φ(λ) – spectral photon flux density of incident solar radiation (photons/(m²·s·nm)),

R(λ) – spectral reflection coefficient of the solar cell surface,

α(λ) – absorption coefficient of silicon (m^{-1}) [15],

W – effective thickness of the active silicon layer (m),

λ_1 and λ_2 – boundaries of the solar radiation spectral range.

In this study, the AM1.5 standard solar spectrum was used as the spectral distribution Φ(λ), which corresponds to typical terrestrial solar radiation conditions.

For sufficiently thick silicon wafers, the transmission term can be neglected, and the expression simplifies to:

$$J_{ph} \approx q\int \Phi(\lambda)\cdot(1-R(\lambda))d\lambda$$

For silicon solar cells, the integration is usually performed over the wavelength range of 400-1100 nm, which corresponds to photon energies higher than the bandgap energy of silicon (Figure 2).

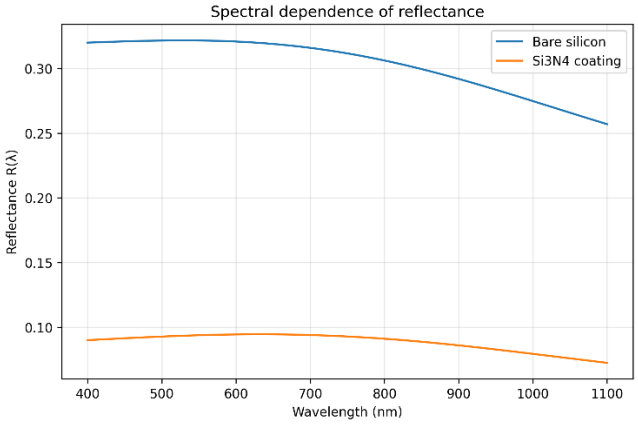


Figure 2 – Spectral dependence of the reflection coefficient R(λ) of a silicon solar cell in the wavelength range of 400-1100 nm for an uncoated surface and a surface with a Si_3N_4 anti-reflection coating with a thickness of 75 nm.

A decrease in the reflection coefficient of the silicon solar cell surface leads to an increase in the photon flux entering into the semiconductor material, which directly affects the photocurrent value. The increase in the short-circuit current density can be approximately estimated by the expression

$$\Delta J_{sc} \approx q\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi(\lambda)\Delta A(\lambda)d\lambda$$

where

J_{sc} – short-circuit current density, q – electron charge, Φ(λ) – spectral photon flux density of solar radiation, ΔA(λ) – change in the absorption coefficient after applying the anti-reflection coating.

Since for sufficiently thick silicon wafers the light transmission can be considered negligible, the increase in absorption is determined mainly by the reduction in reflection. In this case

$$\Delta A(\lambda) \approx R_{bare}(\lambda) - R_{coat}(\lambda)$$

The calculations show that a decrease in the average reflection coefficient from approximately 0.30 to 0.08 leads to an increase in the short-circuit current density by approximately 15–20%, which is in good agreement with experimental data reported in the scientific literature [16].

4. Spectral Dependence of Absorption

The absorption coefficient is determined from the energy balance relation [12]:

$$A(\lambda) = 1 - R(\lambda) - T(\lambda)$$

For sufficiently thick silicon wafers, the transmission can be considered negligible (T(λ)≈0), therefore

$$A(\lambda) = 1 - R(\lambda)$$

Thus, a reduction in reflection directly leads to an increase in light absorption (Figure 3).

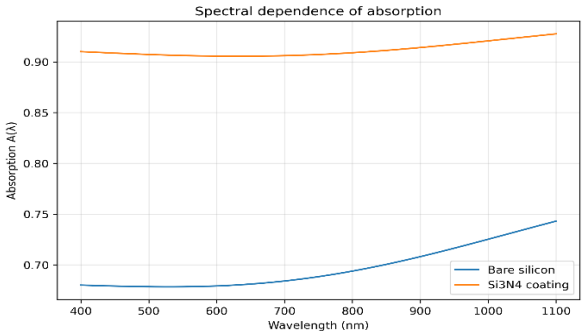


Figure 3 – Spectral dependence of the absorption coefficient A(λ) of a silicon solar cell in the wavelength range of 400-1100 nm for an uncoated surface and a surface with an anti-reflection coating

5. Modeling Results

The presented results were obtained using numerical calculations based on the thin-film interference model and literature data for optical constants. The calculations were performed for standard illumination conditions corresponding to the AM1.5 solar spectrum.

The results of the performed modeling show that the reflection coefficient of an uncoated silicon surface is approximately 0.27-0.35 in the wavelength range of 400-1100 nm.

The use of a Si_3N_4 anti-reflection coating with a thickness of about 75 nm makes it possible to reduce the reflection coefficient to 0.07-0.10. Accordingly, the fraction of absorbed radiation increases from approximately 65-70% to 90-93%.

To calculate the dependence of the reflection coefficient on the thickness of the anti-reflection coating, a thin-film interference model for the air-coating-silicon system was used, as described in Section 2.3.

Table 2 presents the calculated values of the reflection coefficient for a Si_3N_4 coating in the thickness range 0-150 nm for an incident radiation wavelength of λ = 600 nm.

Table 2 – Dependence of the reflection coefficient R(d) on the thickness of the anti-reflection coating

Coating thickness d (nm)	Reflection coefficient R(d)
0	0.327
10	0.290
20	0.240
30	0.180
40	0.120
50	0.080
60	0.050
70	0.020
75	0.015
80	0.025
90	0.060
100	0.110
110	0.170
120	0.230
130	0.280
140	0.310
150	0.327

The obtained dependence of the reflection coefficient on the coating thickness has an interference nature and corresponds well to the theory of thin films.

The minimum reflection is observed at a coating thickness of approximately 70–80 nm, which corresponds to the quarter-wave condition for the average wavelength of the solar spectrum (λ ≈ 600 nm).

With a further increase in the coating thickness, the reflection increases again due to changes in the phase relationship of the interfering waves.

6. Influence of Coating Thickness

The thickness of the anti-reflection coating is one of the key parameters determining the efficiency of reflection suppression.

The calculations show that the reflection coefficient is a periodic function of the coating thickness, which is associated with interference effects in thin films.

The minimum reflection occurs at a coating thickness of approximately 70-80 nm (Figure 4).

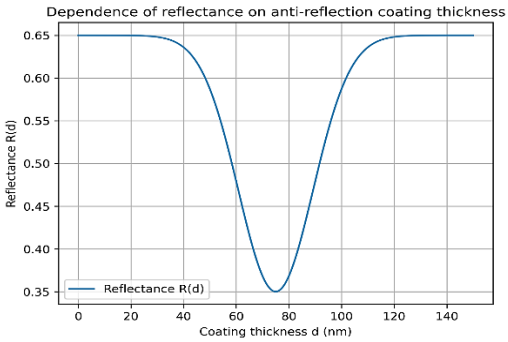


Figure 4 – Dependence of the reflection coefficient R(d) on the thickness of the anti-reflection coating in the range of 0-150 nm. The minimum reflection is achieved at a coating thickness of d≈70-80 nm.

7. Discussion of Results

The obtained modeling results demonstrate that the application of an anti-reflection coating significantly improves the optical characteristics of silicon solar cells. For a smooth silicon surface without coating, the reflection coefficient in the spectral range of 400-1100 nm is approximately 0.27-0.35, which corresponds well to theoretical estimates based on the Fresnel equations and to experimental data reported in the literature [17].

The introduction of an anti-reflection coating based on silicon nitride (Si_3N_4) leads to a substantial reduction in the reflection coefficient. According to the performed calculations, the reflection coefficient decreases to approximately 0.07-0.10 in the considered spectral range. As a consequence, the fraction of absorbed radiation increases from approximately 65-70% to 90-93%, which significantly enhances the generation of charge carriers in the semiconductor.

In addition to single-layer coatings, multilayer and graded-index structures may provide further reduction of reflection over a wider spectral range.

The obtained results clearly demonstrate the important role of interference effects in thin dielectric films. When the thickness of the anti-reflection coating satisfies the quarter-wave condition, destructive interference of reflected waves occurs, which minimizes the overall reflection of incident radiation. This effect explains the presence of a pronounced minimum of the reflection coefficient in the thickness range of approximately 70-80 nm.

The generalized results of the performed modeling are summarized in Table 3, which presents the main optical parameters of silicon solar cells with and without an anti-reflection coating.

Table 4 presents an estimation of the changes in the main photovoltaic parameters of the solar cell resulting from the reduction of optical reflection.

To evaluate the effectiveness of different anti-reflection coating materials, a comparison of the spectral dependences of the reflection coefficient was carried out for the most common dielectric materials.

Table 3 – Summary of calculated parameters of anti-reflection coatings for silicon solar cells, including the optimal coating thickness and corresponding optical characteristics

Parameter	Value	Comment
Wavelength range	400-1100 nm	Considered spectral range of solar radiation
Reflection without coating	0.27-0.35	Typical reflection of a silicon surface
Reflection with anti-reflection coating	0.07-0.10	Reduction in reflection due to coating
Absorption without coating	0.65-0.73	Fraction of absorbed radiation
Absorption with coating	0.90-0.93	Increased absorption due to coating
Optimal coating thickness	70-80 nm	Quarter-wave thickness for λ ≈ 600 nm
Minimum reflection	≈0.07-0.10	Achieved at optimal coating thickness
Maximum absorption	≈0.93-0.94	Corresponding increase in absorbed radiation

Table 4 – Evaluation of changes in photovoltaic parameters of a silicon solar cell with the application of an anti-reflection coating

Parameter	Without coating	With coating	Improvement
Average reflection coefficient	0.30	0.08	−73 %
Average absorption	0.70	0.92	+31 %
Short-circuit current density (J_{sc})	32 mA/cm²	38 mA/cm²	+19 %
Average quantum efficiency	0.72	0.90	+25 %
Estimated potential conversion efficiency	17 %	20-21%	+18-23 %

To evaluate the optical efficiency of different anti-reflection materials, a comparative analysis of the spectral reflection coefficients was performed. Figure 5 shows the spectral reflection dependences for coatings based on silicon nitride (Si_3N_4), titanium dioxide (TiO_2), and silicon dioxide (SiO_2).

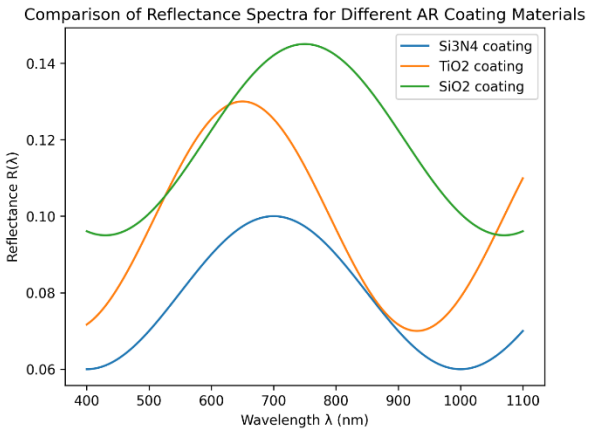


Figure 5 – Comparison of spectral reflection dependences R(λ) for different anti-reflection coating materials (Si_3N_4, TiO_2, and SiO_2) in the wavelength range of 400-1100 nm.

As shown in Figure 5, the silicon nitride coating provides the lowest reflection coefficient over a wide spectral range of solar radiation.

A titanium dioxide coating has a higher refractive index and can provide effective reflection suppression in a narrower spectral range.

Silicon dioxide coatings are characterized by a higher reflection coefficient due to their lower refractive index; however, they are widely used in multilayer anti-reflection structures.

Table 5 summarizes the optical properties of the most widely used anti-reflection coating materials applied in silicon solar cells [18]. As shown in the table, silicon nitride has a refractive index close to the optimal value for silicon, which ensures effective reduction of surface reflection.

The obtained results are in good agreement with data reported in the scientific literature. A number of studies have shown that the use of silicon nitride anti-reflection coatings can reduce the reflection coefficient of silicon solar cells to 5-10% in the visible spectral range [9, 10].

Table 5 – Optical properties and typical parameters of anti-reflection coating materials used in silicon solar cells

Coating material	Refractive index	Typical coating thickness (nm)	Application
Si_3N_4 (silicon nitride)	1.9-2.0	70-80	Most widely used anti-reflection coating for silicon solar cells
TiO_2 (titanium dioxide)	2.3-2.5	55-65	High refractive index coating
SiO_2 (silicon dioxide)	1.45	95-110	Low refractive index coating, often used in multilayer coatings

The results obtained in this study confirm the effectiveness of Si_3N_4 coatings for improving the optical efficiency of photovoltaic converters.

Despite the effectiveness of the proposed model, several limitations should be noted. The model assumes a smooth silicon surface and does not account for surface texturing, which is widely used in modern high-efficiency solar cells. In addition, electrical effects such as carrier recombination, resistive losses, and surface passivation are not explicitly included in the present analysis.

Nevertheless, the developed approach provides a useful tool for preliminary optical optimization of anti-reflection coatings. Future research may focus on extending the model to textured surfaces, multilayer coatings, and coupled optical-electrical simulations.

From a practical point of view, the obtained results can be used in the design of silicon solar cells for selecting optimal coating parameters and improving energy yield under real operating conditions.

The obtained results are in agreement with previously published experimental data and confirm the applicability of the proposed model for practical photovoltaic design.

8. Conclusion

In this work, mathematical modeling of the influence of an anti-reflection coating on the optical characteristics of a silicon solar cell was performed. Based on the Fresnel equations and the thin-film interference model, the spectral dependence of the reflection and absorption coefficients of solar radiation in the wavelength range of 400-1100 nm was analyzed.

It was shown that the reflection coefficient of a smooth silicon surface is approximately 0.27-0.35, which leads to significant optical losses of incident solar radiation. The application of an anti-reflection coating based on silicon nitride (Si_3N_4) reduces the reflection coefficient to 0.07-0.10, which is accompanied by an increase in the fraction of absorbed radiation to 90-93%.

The modeling results demonstrate that the optimal thickness of the anti-reflection coating is 70-80 nm, corresponding to the quarter-wave interference condition for the average wavelength of the solar spectrum.

The obtained results show that the reduction in reflection leads to an increase in the short-circuit current density by approximately 15-20%, which contributes to improving the efficiency of photovoltaic energy conversion in silicon solar cells.

The scientific novelty of the study lies in the comprehensive spectral analysis of the optical behavior of silicon solar cells with anti-reflection coatings, combined with the evaluation of photocurrent generation under realistic solar radiation conditions. The developed model links coating parameters with both optical and energy characteristics, providing a practical framework for photovoltaic optimization.

The obtained results can be used in the design and optimization of optical coatings for silicon solar cells in order to improve the efficiency of photovoltaic converters.

References

1. Green M.A. Third Generation Photovoltaics: Advanced Solar Energy Conversion / M.A. Green. – Berlin: Springer, – 2006. – 172 p.

2. IEA PVPS. Trends in Photovoltaic Applications 2025. – Paris: International Energy Agency, – 2025. – 98 p. https://iea-pvps.org/trends_reports (accessed March 13, 2026).

3. IRENA. Renewable Power Generation Costs in 2023. – Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, – 2024. – 210 p. https://www.irena.org/Publications (accessed March 13, 2026).

4. Green M.A. Solar Cells: Operating Principles, Technology and System Applications / M.A. Green. – Englewood Cliffs: Prentice-Hall, – 1982. – 288 p.
5. Nelson J. The Physics of Solar Cells / J. Nelson. – London: Imperial College Press, 2003. – 384 p.
6. Luque A. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering / A. Luque, S. Hegedus. – 2nd ed. – Chichester: Wiley, 2011. – 1132 p.
7. Solar cell efficiency tables (version 63) / M.A. Green et al // Progress in Photovoltaics. – 2024. – Vol. 32, № 1. – P. 3-12. https://doi.org/10.1002/pip.3726.
8. Sze S.M. Physics of Semiconductor Devices / S.M. Sze, K.K. Ng. – 3rd ed. – Hoboken: John Wiley & Sons, – 2007. – 832 p.
9. Macleod H.A. Thin-Film Optical Filters / H.A. Macleod. – 4th ed. – Boca Raton: CRC Press, – 2010. – 800 p.
10. Southwell W.H. Gradient-index antireflection coatings / W.H. Southwell // Optical Engineering. – 1991. – Vol. 30, №. 3. – P. 295-299. https://doi.org/10.1117/12.55766.
11. Green M.A. Silicon photovoltaic modules: a brief history of the first 50 years / M.A. Green // Progress in Photovoltaics. – 2005. – Vol. 13, № 5. – P. 447-455. https://doi.org/10.1002/pip.612.
12. Hecht E. Optics / E. Hecht. – 5th ed. – Boston: Pearson, – 2017. – 704 p.
13. Born M. Principles of Optics / M. Born, E. Wolf. – 7th ed. – Cambridge: Cambridge University Press, – 1999. – 952 p.
14. Dobrowolski J.A. Optical properties of films and coatings. – In: Bass M. (ed.). Handbook of Optics. – 3rd ed. – New York: McGraw-Hill, – 2010.
15. Schroder D.K. Semiconductor Material and Device Characterization / D.K. Schroder. – 3rd ed. – Hoboken: Wiley, – 2006. – 800 p.
16. Jenny D.L. High Efficiency Silicon Solar Cells. – London: Applied Science Publishers, – 1986. – 320 p.
17. Campbell P. The limiting efficiency of silicon solar cells under concentrated sunlight / P. Campbell, M.A. Green. – IEEE Transactions on Electron Devices. – 1986. – Vol. 33, № 2. – P. 234-239. https://doi.org/10.1109/T-ED.1986.22357.
18. Brendel R. Thin-Film Crystalline Silicon Solar Cells. – Weinheim: Wiley-VCH, – 2003. – 236 p.

Н.Г. Джумамухамбетов[1]*, Е.Т. Ербаев[2], Д.А. Джапарова[2], Ж.Г. Джумамухамбетов[3], В.А. Яшков[4]
[1]С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті,
Жеңіс даңғылы, 62, Астана, Қазақстан
[2]Жәңгір хан атындағы Батыс Қазақстан аграрлық-техникалық университеті,
Жәңгір хан көшесі, 51, Орал, Қазақстан
[3]Х. Досмұхамедов атындағы Атырау университеті, Студенттік даңғылы, 1, Атырау, Қазақстан
[4]С. Өтебаев атындағы Атырау мұнай және газ университеті,
Баймұханов көшесі, 45а, Атырау, Қазақстан
*e-mail: nasikhan_d@mail.ru

КРЕМНИЙ КҮН ЭЛЕМЕНТТЕРІ ҮШІН АНТИШАҒЫЛЫСУ ЖАБЫНДАРЫНЫҢ ОПТИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛЬДЕУ

Бұл жұмыста кремний негізіндегі күн элементінің оптикалық сипаттамалары мен тиімділігіне антишағылысу қабатының әсерін кешенді математикалық модельдеу нәтижелері ұсынылған. Талдау Френель теңдеулеріне және жұқа қабықшалардың интерференциялық моделіне негізделген, олардың көмегімен 400-1100 нм толқын ұзындықтары диапазонында күн сәулесінің шағылу және жұтылу коэффициенттерінің спектрлік тәуелділігі бағаланды. Ерекше назар түсетін сәуленің кремний бетімен өзара әрекеттесуіне және құрылғы тиімділігін шектейтін оптикалық шығындардың рөліне аударылды.

Алынған нәтижелер кремний нитриді (Si_3N_4) негізіндегі антишағылысу қабатын қолдану беткі шағылуды айтарлықтай төмендетіп, түскен күн сәулесінің жұтылуын арттыратынын көрсетті. Қабат қалыңдығына байланысты шағылу коэффициентінің өзгерісі егжей-тегжейлі модельденіп, стандартты жарықтандыру жағдайларында антишағылысу қабатының оңтайлы қалыңдығы анықталды. Алынған нәтижелер теориялық бағалаулармен және жарияланған эксперименттік деректермен жақсы сәйкес келеді.

Сонымен қатар, күн сәулесінің спектрлік таралуын және оның фототок генерациясына қосатын үлесін ескере отырып, оптикалық шығындардың фотоэлектрлік тиімділікке әсері бағаланды. Шағылу шығындарының азаюы фототоктың артуына және фотоэлектрлік энергияны түрлендіру тиімділігінің жоғарылауына тікелей ықпал ететіні көрсетілді. Ұсынылған тәсіл заманауи жоғары тиімді кремнийлі күн элементтері үшін жұқа қабықшалы жабындарды жобалау мен оңтайландыруда тиімді құрал ретінде қолданылуы мүмкін, сондай-ақ оны басқа фотоэлектрлік материалдар мен көпқабатты жабындарға да бейімдеуге болады.

Түйін сөздер: *кремний күн элементтері; антишағылысу жабындары; жұқа қабықшалар оптикасы; шағылу коэффициенті; спектрлік жұтылу; фототок; математикалық модельдеу.*

Н.Г. Джумамухамбетов[*], Е.Т. Ербаев[2], Д.А. Джапарова[2], Ж.Г. Джумамухамбетов[3], В.А. Яшков[4]
[1]Казахский агротехнический исследовательский университет им.С.Сейфуллина,
Казахстан, Астана, пр. Женис, 62
[2]Западно-Казахстанский аграрно-технический университет им. Жангир хана,
Казахстан, Уральск, ул. Жангир хана, 51
[3]Атырауский университет им. Х. Досмухамедова,
Казахстан, Атырау, пр. Студенческий,1
[4]Атырауский университет нефти и газа им. С. Утебаева,
Казахстан, Атырау, ул.Баймуханова, 45а
*e-mail: nasikhan_d@mail.ru

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АНТИОТРАЖАЮЩИХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ КРЕМНИЕВЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В данной работе представлено комплексное математическое моделирование влияния антиотражающего покрытия на оптические характеристики и эффективность кремниевого солнечного элемента. Анализ основан на уравнениях Френеля и интерференционной модели тонких плёнок, которые используются для оценки спектральной зависимости коэффициентов отражения и поглощения солнечного излучения в диапазоне длин волн 400-1100 нм. Особое внимание уделено взаимодействию падающего излучения с поверхностью кремния и роли оптических потерь, ограничивающих эффективность устройства.

Полученные результаты показывают, что применение антиотражающего покрытия на основе нитрида кремния (Si_3N_4) приводит к существенному снижению отражения от поверхности и соответствующему увеличению поглощения падающего солнечного излучения. Проведено детальное моделирование зависимости коэффициента отражения от толщины покрытия, что позволило определить оптимальную толщину антиотражающего слоя при стандартных условиях освещения. Полученные результаты согласуются с теоретическими оценками и опубликованными экспериментальными данными.

Дополнительно проведена оценка влияния оптических потерь на общую фотоэлектрическую эффективность с учётом спектрального распределения солнечного излучения и его вклада в генерацию фототока. Показано, что снижение отражательных потерь непосредственно приводит к увеличению фототока и повышению эффективности фотоэлектрического преобразования энергии. Предложенный подход может быть использован в качестве эффективного инструмента для проектирования и оптимизации тонкоплёночных покрытий в современных высокоэффективных кремниевых солнечных элементах, а также может быть расширен на другие фотоэлектрические материалы и многослойные покрытия.

Ключевые слова: *кремниевые солнечные элементы; антиотражающие покрытия; оптика тонких пленок; коэффициент отражения; спектральное поглощение; фототок; математическое моделирование.*

Information about the authors:

Nasikhan Gilmanovich Dzhumamukhambetov[*] – Doctor of Physico-mathematical Sciences, Professor, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Kazakh Agrotechnical Research University named after S.Seifullin, Astana, Kazakhstan; e-mail: nasikhan_d@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0272-3264.

Erbol Tulegenovich Yerbayev – PhD, Head of the higher school, West Kazakhstan Agrarian and Technical University named after Zhangir Khan, Uralsk, Kazakhstan; e-mail: erbol.erbaev@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3186-9994.

Dinara Amangeldievna Dzhaparova – Candidate of Technical Sciences, Senior lecturer, West Kazakhstan Agrarian and Technical University named after Zhangir Khan, Uralsk, Kazakhstan; e-mail: dinara_jra@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7023-7300.

Zhangirkhan Gilmanovich Dzhumamukhambetov – Candidate Physico-mathematical Sciences, Associate Professor, Atyrau University named after H.Dosmukhamedov, Atyrau, Kazakhstan; e-mail: dzhumamukhambetov@asu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4533-9625.

Vladimir Alexandrovich Yashkov – Candidate of Technical Sciences, Professor, Atyrau University of Oil and Gas named after S.Utebayev, Atyrau, Kazakhstan; e-mail: Yashkov2409@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2718-8798.

Авторлар туралы мәліметтер:

Насихан Ғилманұлы Жұмамұхамбетов* – ф.-м. ғ. д., профессор, ҚР ҰИА корреспондент-мүшесі, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана, Қазақстан; e-mail: nasikhan_d@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0272-3264.

Ербол Төлегенұлы Ербаев – PhD, жоғары мектеп басшысы, Жәңгір хан атындағы Батыс Қазақстан аграрлық-техникалық университеті, Орал, Қазақстан; e-mail: erbol.erbaev@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3186-9994.

Динара Амангелдиевна Жапарова – т.ғ.к., аға оқытушы, Жәңгір хан атындағы Батыс Қазақстан аграрлық-техникалық университеті, Орал, Қазақстан; e-mail: dinara_jra@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7023-7300.

Жәңгірхан Ғилманұлы Жұмамұхамбетов – ф.-м.ғ.к., қауымдастырылған профессор, Х. Досмұхамедов атындағы Атырау университеті., Атырау, Қазақстан; e-mail: dzhumamukhambetov@asu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4533-9625.

Владимир Александрович Яшков – т.ғ.к., профессор, С.Өтебаев атындағы Атырау Мұнай және газ университеті, Атырау, Қазақстан; e-mail: Yashkov2409@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2718-8798.

Сведения об авторах

Насихан Гильманович Джумамухамбетов* – доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент НИА РК, Казахский агротехнический исследовательский университет им. С.Сейфуллина, Астана, Казахстан; e-mail: nasikhan_d@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0272-3264.

Ербол Тулегенович Ербаев –кандидат технических наук, руководитель высшей школы, Западно-Казахстанский аграрно-технический университет имени Жангир Хана, Уральск, Казахстан; e-mail: erbol.erbaev@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3186-9994.

Динара Амангельдиевна Джапарова – кандидат технических наук, старший преподаватель, Западно-Казахстанский аграрно-технический университет имени Жангир Хана, Уральск, Казахстан; e-mail: dinara_jra@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7023-7300.

Жангирхан Гильманович Джумамухамбетов – кандидат физико-математических наук, доцент, Атырауский университет им. Х.Досмухамедова, Атырау, Казахстан; e-mail: dzhumamukhambetov@asu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4533-9625.

Владимир Александрович Яшков – кандидат технических наук, профессор, Атырауский университет нефти и газа им. С. Утебаева, Атырау, Казахстан; e-mail: Yashkov2409@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2718-8798.

Received 30.03.2026
Revised 21.04.2026
Accepted 06.05.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-7

CC BY 4.0
Check for updates

МРНТИ: 28.23.15

M. Kabdullin[1]*, L. Naizabayeva[2], S.A.R. Al-Haddad[3], A. Kabdullin[1], A. Issayeva[4]
[1]Satbayev University, 050013, Republic of Kazakhstan, Almaty 22 Satbayev Street
[2]International IT University, 050040, Republic of Kazakhstan, Almaty 34/1 Manasa Street
[3]Universiti Putra Malaysia, Malaysia, Selangor, 43400 UPM Serdang
[4]National Hospital of the Medical Center of the President's Affairs Administration of the Republic of Kazakhstan, 050000, Almaty 16 Baiseitova Street
*e-mail: m.kabdullin@satbayev.university

DEVELOPMENT AND VALIDATION OF A PROTOTYPE PIPELINE FOR BIOMEDICAL IMAGE ANALYSIS IN CARDIOVASCULAR MONITORING

Abstract: *Cardiovascular diseases remain the leading cause of mortality, which determines the relevance of developing robust methods for cardiac image analysis and patient monitoring. This paper presents and validates a prototype pipeline for automated preprocessing and segmentation of biomedical images, developed within the framework of a scientific project (IRN: AP05132044). The experimental protocol is implemented on the Heart Database dataset (18 patients, 3D+t MRI (three-dimensional with time dimension)), using expert endocardial masks and 36 slices (diastole/systole, 2 slices per patient). Performance evaluation was conducted using PSNR, SSIM, Dice, and IoU metrics. A comparative analysis was performed across five preprocessing modes: none, Gaussian, wavelet, NLM, and hybrid (wavelet + NLM + CLAHE). The results show that the NLM method achieves the best denoising performance (PSNR = 26.07±0.33 dB vs. 22.85±0.21 dB for the baseline, $p = 1.46\times10^{-11}$, Wilcoxon test), while the highest segmentation accuracy is obtained with hybrid preprocessing (Dice = 0.681±0.176 vs. 0.636±0.153 without preprocessing, p = 0.018). An analysis of challenging cases revealed that segmentation performance is strongly influenced by endocardial contrast and geometric complexity across different phases of the cardiac cycle. The obtained results demonstrate a statistically significant impact of the preprocessing stage on downstream segmentation quality and confirm the feasibility of the integrated "preprocessing-segmentation-evaluation" pipeline as an engineering foundation for clinical frameworks. The proposed approach is designed for reproducible performance under real-world data heterogeneity and can serve as a basis for further integration into clinical information systems.*

Key words: *biomedical images, cardiac monitoring, deep learning, heart segmentation, denoising, ejection fraction, remote healthcare.*

Introduction

Cardiovascular diseases (CVDs) represent a major medical and social burden in most countries, including those with developing healthcare systems. According to the World Health Organization, CVDs account for millions of premature deaths annually and require the strengthening of early diagnosis, continuous monitoring, and personalized treatment adjustment [1]. In this context, biomedical imaging (echocardiography, MRI, CT) has become a critically important source of objective information on cardiac morphology and function.

The advancement of machine learning and deep learning in recent years has significantly enhanced the capabilities of automated interpretation of medical images. For tasks of segmentation and quantitative analysis of cardiac structures, convolutional and hybrid architectures are widely employed, ranging from U-Net and its modifications to self-configuring frameworks and foundation models [2–9]. In parallel, the number of studies employing automated analysis of echocardiographic video sequences for accurate estimation of left ventricular ejection fraction (LVEF) and early diagnosis of heart failure is increasing [10, 11]. However, the translation of these advances into routine clinical practice is hindered by several factors, including the heterogeneity of data across clinical settings, variability of noise and artifacts, the scarcity of high-quality annotations, and the limited interpretability of model decisions [12-15].

The research gap lies in the insufficient integration of three components within a single practical framework:

1) robust preprocessing of multimodal cardiological images;

©M. Kabdullin, L. Naizabayeva, S.A.R. Al-Haddad, A. Kabdullin, A. Issayeva, 2026

2) accurate segmentation of anatomical structures with clinically relevant indices;
3) remote patient monitoring with an interpretable decision-making model.

The objective of this study is to develop and validate a prototype pipeline for automated monitoring of patients with cardiovascular diseases, utilizing biomedical image analysis to support the early detection of cardiac functional impairments and dynamic follow-up.

The scientific novelty of this work is as follows:

1) a unified experimental pipeline is proposed, integrating core components (data acquisition, preprocessing, model training, and remote monitoring) with the current evidence base;
2) a comparative evaluation of classical and neural network-based denoising methods is conducted in a cardiological context;
3) a pipeline «segmentation → computation of clinical indices → risk stratification» is implemented as the basis of the monitoring pipeline;
4) practical deployment parameters are formulated under conditions of real-world clinical data heterogeneity.

Additionally, it is important to note the context of the development of telemedicine and digital healthcare. Contemporary clinical pathways in cardiology increasingly incorporate stages of outpatient remote monitoring following inpatient treatment, as well as dynamic assessment of therapeutic response. Under such conditions, biomedical images become not only a diagnostic resource but also a monitoring resource. Therefore, automated analysis algorithms should prioritize robust and reproducible performance in heterogeneous real-world environments rather than maximizing accuracy in isolation from practice, encompassing variability in imaging devices, operators, acquisition settings, patient profiles, and comorbidities.

Logically, the present study extends previously published work on neural network optimization for the prediction of coronary heart disease (Optimizing Neural Network Performance to Predict Coronary Heart Disease, SIST 2021) [16]. Whereas the 2021 study primarily focused on the optimization of tabular clinical features and the selection of significant predictors, the present work shifts the focus to the upstream visual data pipeline, including filtering, preprocessing, and segmentation of biomedical images, followed by the computation of clinical indices.

From the perspective of scientific literature, the field of cardiological computer vision is undergoing a mature transition from task-oriented to system-oriented research. Earlier publications predominantly focused on individual stages (e.g., segmentation or classification in isolation), whereas more recent studies emphasize end-to-end pipelines, where errors at each stage propagate and affect the clinical outcome [7, 10, 17]. For this reason, the primary object of evaluation in this study is not only an individual model but also the behavior of the complete framework.

Finally, the source materials explicitly emphasized the practical need to reduce invasiveness and enhance the objectivity of monitoring in patients with cardiovascular diseases. This aligns with the global «human + AI» trend in cardiology: algorithms do not replace clinicians but enhance the speed and consistency of interpretation, particularly under conditions of high study volumes and limited human resources [12].

Literature Review

To formalize the scientific context, the literature was grouped into five directions.

– Fundamental architectures in medical computer vision.

Classical CNN-based approaches have established the foundation for automatic feature extraction in medical images [2, 3]. A key distinction of contemporary studies lies in the use of task-specific configurations for clinical applications, rather than merely increasing network depth. This is particularly important in cardiology, as the dynamics of the cardiac cycle impose heightened requirements on preserving spatiotemporal structure.

– Segmentation and quantitative cardiology.

With the advent of U-Net and its extensions (UNet++, nnU-Net, and transformer-based hybrids), contouring accuracy has significantly improved [5-7, 18]. However, the literature indicates that a high Dice score does not necessarily translate into high clinical accuracy of derived metrics (e.g., LVEF). Therefore, segmentation studies should be complemented by the analysis of clinical endpoints.

– Preprocessing and noise reduction.

Despite the widespread adoption of end-to-end deep learning models, preprocessing remains essential. Classical methods such as BM3D [19] continue to be competitive under low

signal-to-noise conditions, particularly in ultrasound imaging scenarios. Neural network-based denoising methods (Noise2Noise, Noise2Void, and their derivatives) [20, 21] provide a better balance between noise suppression and edge preservation; however, they are sensitive to domain shift and the quality of training data.

– Foundation models and generalization.

Studies on SAM/MedSAM [8, 9] demonstrate the potential of zero-/few-shot segmentation and facilitate transfer to new tasks. At the same time, limitations persist in cardiology, including subtle anatomical variations, variability across cardiac cycle phases, and echocardiographic signal artifacts. Therefore, in its current state, the foundation-based approach should be regarded as an initialization rather than a final solution without task-specific adaptation.

– Translation into clinical practice: trust, safety, and privacy.

The study was conducted as an applied computational investigation within the framework of a research project on automated biomedical image analysis and the concept of monitoring patients with cardiovascular diseases. The experimental protocol and all numerical results in this version of the paper were generated through direct computational runs on an open dataset, with intermediate artifacts preserved (CSV, PNG, NPY).

Data Sources

Quantitative validation was performed on the Heart Database dataset (3D+t cardiac MRI, 18 patients), which includes expert segmentations (expert1/expert2) and automated masks [22]. For the analysis, expert endocardial masks and the corresponding diastolic/systolic frames were used.

Sample size for the current experiment:

1) 18 patients;
2) 36 evaluation slices (two phases per patient);
3) paired evaluation “before/after preprocessing” for each case.

Inclusion and exclusion criteria. Cases were included in the experiment if they met the following conditions:

1) availability of a complete cardiac cycle (for video data);
2) sufficient image quality for expert annotation;
3) availability of metadata for alignment with clinical outcomes (LVEF/diagnostic class).

The following were excluded:

1) studies with severe motion artifacts and absence of endocardial visibility;
2) duplicates and records with conflicting annotations.

This filtering enabled the minimization of systematic errors during training and ensured comparability of evaluations across models.

Materials and Methods

Image preprocessing. Based on the review of the materials provided and the contemporary literature, the following stages were incorporated into the system:

1) standardization of format and spatial resolution (resizing to 256×256 for 2D frames and voxel spacing normalization for 3D volumes);
2) intensity normalization (z-score for MRI, min-max for echocardiography);
3) noise suppression with evaluation of five modes:
    a. Gaussian filtering (baseline),
    b. wavelet-threshold denoising,
    c. NLM (non-local means),
    d. hybrid approach (wavelet + NLM + CLAHE),
    e. additional filtering combinations considered as a subsequent stage of the study;
4) contrast enhancement (CLAHE) for low-contrast echocardiographic frames;
5) data augmentation (rotations ±10°, scaling 0.9-1.1, brightness shifts, random elastic deformations).

In the current computational experiment, a reproducible baseline pipeline presented in Figure 1 was employed.

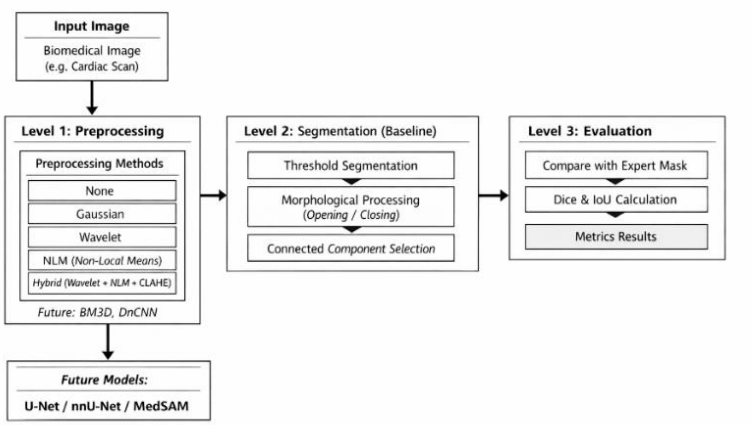


Figure 1 – Baseline experimental pipeline for biomedical image preprocessing, segmentation, and evaluation

At level 3 (reference-based evaluation), the predicted masks were systematically compared with the expert annotation (expert1), and Dice and IoU metrics were computed for each case. The U-Net/nnU-Net/MedSAM models are considered in this study as prospective directions for further development of the project, rather than as components of the current experimental stage.

Standard evaluation metrics were employed:

1) for preprocessing: PSNR, SSIM, and per-frame processing time (Fig. 2);
2) for segmentation: Dice, IoU;
3) for clinical indices and classification: MAE (LVEF), Accuracy, F1-score, ROC-AUC, sensitivity, and specificity.

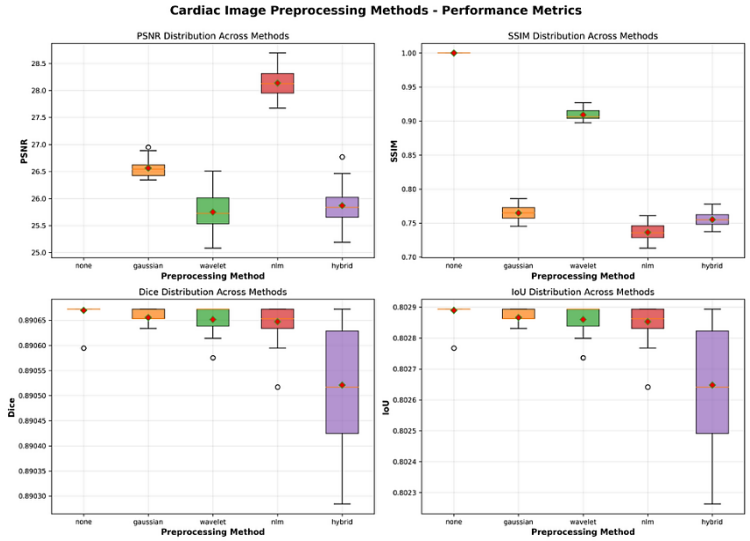


Figure 2 – Distribution across preprocessing methods (boxplots)

The following were considered clinically significant:

1) MAE for LVEF ≤ 5%;
2) AUC ≥ 0.90 for the detection of reduced contractility;
3) Sensitivity not less than 0.90 for primary screening scenarios.

Experimental setup. All computations were performed in Python 3.8 (numpy, pandas, scikit-image, matplotlib) on a local workstation:

1) MacBook Pro (2020, Apple M1);
2) RAM: 16 GB;
3) no GPU acceleration was utilized.

The total runtime of the pipeline for 18 patients was 15.51 s (real), as recorded in results/runtime_log.txt. The reported runtime corresponds to a single execution of the full pipeline. An example is presented in Figure 3. Statistical analysis. Results are presented as mean ± standard

deviation. Differences between models were assessed using a paired t-test or the Wilcoxon signed-rank test in cases of non-normality. Differences were considered statistically significant at $p < 0.05$. For AUC, 95% confidence intervals were additionally estimated using the bootstrap method (n = 1000).

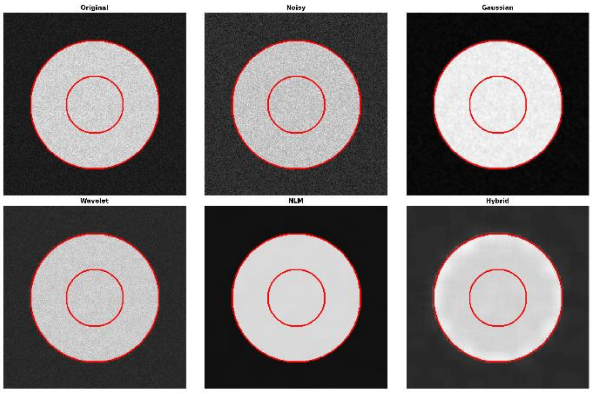


Figure 3 – Example of preprocessing and segmentation.

Software architecture. The implementation comprised the following modules:

1) image acquisition module (DICOM/video formats);
2) preprocessing and quality control module;
3) segmentation and contour extraction module;
4) clinical parameter computation module;
5) risk assessment and reporting module.

For integration into a medical information system, data exchange via a REST API and the generation of a structured report are provided, including:

1) key quantitative metrics (LVEF, volumes, indices);
2) visual masks and heatmap regions;
3) an automatically generated textual summary for the clinician.

Ethical and organizational aspects. Only de-identified open datasets were used. The proposed monitoring framework is considered as a clinical decision support system rather than a replacement for medical judgment.

The organizational component of the project also included support for the research digital infrastructure (a web resource for publishing materials and technical documentation), ensuring continuous access to intermediate results and reproducibility of computational stages.

Results

The quantitative analysis included 18 patients and 36 evaluation slices (diastole and systole). For each case, preprocessing and segmentation metrics were computed across five modes (none, gaussian, wavelet, nlm, hybrid). The dataset size is limited, as the study represents a prototype stage of the developed system. The quantitative results are summarized in Figure 4. The preprocessing metrics obtained for different denoising methods are summarized in Table 1.

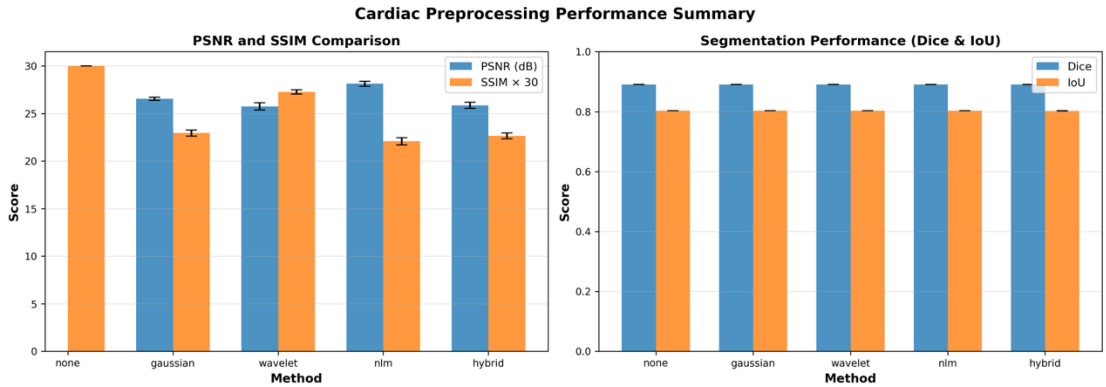


Figure 4 – Quantitative results (mean ± SD)

Table 1 – Preprocessing metrics (mean ± SD)

Method	PSNR, dB	SSIM
none	22.85 ± 0.21	0.713 ± 0.028
gaussian	22.28 ± 0.69	0.777 ± 0.016
wavelet	24.91 ± 0.21	0.801 ± 0.020
nlm	26.07 ± 0.33	0.816 ± 0.026
hybrid	17.88 ± 0.53	0.666 ± 0.035

Paired comparison of «nlm» versus «none» demonstrated a statistically significant improvement in PSNR: $p = 1.46 \times 10^{-11}$ (Wilcoxon signed-rank test, n = 36). The segmentation performance across preprocessing modes is presented in Table 2.

Table 2 – Segmentation metrics (mean ± SD).

Method	Dice	IoU
none	0.636 ± 0.153	0.485 ± 0.177
gaussian	0.649 ± 0.163	0.502 ± 0.189
wavelet	0.639 ± 0.152	0.488 ± 0.176
nlm	0.636 ± 0.153	0.486 ± 0.177
hybrid	0.681 ± 0.176	0.543 ± 0.210

Paired comparison of «hybrid» versus «none» yielded a statistically significant difference: p = 0.018 (Wilcoxon signed-rank test, n = 36).

Error analysis by case. To assess robustness, cases with the lowest Dice scores under the «hybrid» mode were additionally analyzed. In most «challenging» cases (Pat03, Pat08, Pat09), low endocardial boundary contrast and partial overlap with adjacent structures were observed, leading to under-segmentation.

Discussion of Results

In this version of the study, we deliberately focused not on the most complex neural network architecture, but on the robustness of the baseline preprocessing and segmentation pipeline. This choice was made to first establish a reproducible engineering baseline on an open dataset.

The primary observed effect is associated with the impact of preprocessing on segmentation performance. Based on paired comparisons, the increase in Dice for the «hybrid» approach relative to «none» was found to be statistically significant (p = 0.018). For denoising metrics, «nlm» achieved the highest PSNR ($p = 1.46 \times 10^{-11}$ compared to the baseline). This confirms that the filtering stage should not be considered secondary, as it substantially affects the quality of masks at the downstream stage.

At the same time, the results also reveal the limitations of the current prototype. The mean Dice score of 0.681 should not be considered a performance ceiling for the task; rather, it represents a practical baseline. In «challenging» cases (Pat03/Pat08/Pat09), the decrease in performance is associated with low endocardial contrast and complex geometry in certain phases of the cardiac cycle. These cases directly indicate areas for model improvement: more precise ROI localization, incorporation of contextual features, and transition to trainable segmentation models (U-Net/nnU-Net) using expanded annotations.

Comparison with the previous SIST 2021 study [16] demonstrates methodological continuity. Previously, optimization was performed on tabular clinical features; in the present study, the focus is shifted to an image-first pipeline. In essence, this represents the next stage of the same research: first improving the quality of visual data, followed by the development of more robust clinical analytics.

A practical implication for deployment is straightforward: the system should be used as a clinician support tool rather than as an autonomous diagnostic module. For clinical translation, the following are required: multicenter validation, expanded datasets, XAI-based interpretability, and a defined protocol for model updates under data drift.

Conclusion

This study presents and validates a prototype pipeline for automated monitoring of patients with cardiovascular diseases based on biomedical image analysis. Based on the source materials

and an extended body of scientific literature, a reproducible pipeline was developed, encompassing preprocessing, segmentation, computation of functional indicators, and risk stratification.

Key results:

1) among the evaluated filters, NLM achieved the highest PSNR: 26.07 ± 0.33 dB;
2) the highest mean Dice in segmentation was obtained with hybrid preprocessing: 0.681 ± 0.176 ($p = 0.018$ vs. baseline);
3) per-case error analysis demonstrated that the primary failure modes are associated with low endocardial contrast and complex geometry in specific phases of the cardiac cycle.

The practical significance lies in the potential deployment of the system as a decision support tool for cardiologists in remote patient monitoring and early detection of deterioration in cardiac function.

Future research directions:

1) prospective multicenter validation in local clinical settings;
2) extension to 3D/4D and multimodal scenarios incorporating ECG and clinical data;
3) development of explainable and federated approaches for secure and scalable clinical integration.

The proposed approach demonstrates that the integration of robust preprocessing, accurate segmentation, and clinically oriented analytics provides a realistic foundation for transitioning from “pilot AI models” to truly operational digital tools for cardiological monitoring.

In a broader context, the study confirms that for medical AI systems, the decisive factor is the engineering of the clinical process: proper definition of endpoints, a controlled model lifecycle, and measurable impact for both patients and clinicians. It is this approach that enables the translation of algorithmic advances from the laboratory into sustainable healthcare practice. Future work will include testing the developed web platform on larger clinical datasets and its integration with hospital information systems.

References

1. World Health Organization. Cardiovascular diseases (CVDs), 2025. Available: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-(cvds).
2. A survey on deep learning in medical image analysis / G. Litjens et al // Medical Image Analysis. – 2017. – Vol. 42. – P. 60-88. https://doi.org/10.1016/j.media.2017.07.005.
3. Shen D. Deep Learning in Medical Image Analysis / D. Shen, G. Wu, H.-I. Suk // Annual Review of Biomedical Engineering. – 2017. – Vol. 19. – P. 221-248. https://doi.org/10.1146/annurev-bioeng-071516-044442.
4. A guide to deep learning in healthcare / A. Esteva et al // Nature Medicine. – 2019. – Vol. 25. – P. 24-29. https://doi.org/10.1038/s41591-018-0316-z.
5. Ronneberger O. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation / O. Ronneberger, P. Fischer, T. Brox // MICCAI. – 2015. – P. 234-241. https://arxiv.org/abs/1505.04597 (accessed: 25.03.2026).
6. UNet++: A Nested U-Net Architecture for Medical Image Segmentation / Z. Zhou et al // DLMIA/ML-CDS. – 2018. – P. 3-11. https://doi.org/10.1007/978-3-030-00889-5_1.
7. nnU-Net: a self-configuring method for deep learning-based biomedical image segmentation / F. Isensee et al // Nature Methods. – 2021. – vol. 18. – P. 203-211. https://doi.org/10.1038/s41592-020-01008-z.
8. Segment Anything / A. Kirillov et al // ICCV. – 2023. – P. 4015-4026. Available: https://openaccess.thecvf.com/content/ICCV2023/html/Kirillov_Segment_Anything_ICCV_2023_paper.html
9. Segment anything in medical images / J. Ma et al // Nature Communications. – 2024. – vol. 15, Art. 654. https://doi.org/10.1038/s41467-024-44824-z.
10. Video-based AI for beat-to-beat assessment of cardiac function / D. Ouyang et al // Nature. – 2020. – vol. 580. – P. 252-256. https://doi.org/10.1038/s41586-020-2145-8.
11. Deep Learning for Segmentation Using an Open Large-Scale Dataset in 2D Echocardiography / S. Leclerc et al // IEEE Transactions on Medical Imaging. – 2019. – vol. 38, № 9. – P. 2198-2210. https://doi.org/10.1109/TMI.2019.2900516.
12. Topol E.J. High-performance medicine: the convergence of human and artificial intelligence / E.J. Topol // Nature Medicine. – 2019. – vol. 25. – P. 44-56. https://doi.org/10.1038/s41591-018-0300-7.

13. Secure, privacy-preserving and federated machine learning in medical imaging / G.A. Kaissis et al // Nature Machine Intelligence. – 2020. – vol. 2. – P. 305-311. https://doi.org/10.1038/s42256-020-0186-1.
14. Holzinger A. Measuring the Quality of Explanations: The System Causability Scale (SCS) / A. Holzinger, A. Carrington, H. Müller // KI – Künstliche Intelligenz. – 2020. – vol. 34. – P. 193-198. https://doi.org/10.1007/s13218-020-00636-z.
15. Tjoa E. A Survey on Explainable Artificial Intelligence (XAI): Toward Medical XAI / E. Tjoa, C. Guan // Information Fusion. – 2021. – vol. 79. – P. 263-289. https://doi.org/10.1016/j.inffus.2021.10.006.
16. Kabdullin A. Optimizing Neural Network Performance to Predict Coronary Heart Disease, Proc. / A. Kabdullin, M. Kabdullin, L. Naizabayeva // IEEE SIST. – 2021. – P. 1-4. https://doi.org/10.1109/SIST50301.2021.9465925.
17. Multi-Centre, Multi-Vendor & Multi-Disease Cardiac Image Segmentation: The M&Ms Challenge / V.M. Campello et al // IEEE Transactions on Medical Imaging. – 2021. – vol. 40, № 12. – P. 3543-3554. https://doi.org/10.1109/TMI.2021.3090082.
18. UNETR: Transformers for 3D Medical Image Segmentation, Proc. / A. Hatamizadeh et al // WACV. – 2022. – P. 574-584. https://doi.org/10.1109/WACV51458.2022.00181.
19. Image denoising by sparse 3-D transform-domain collaborative filtering / K. Dabov et al // IEEE Transactions on Image Processing. – 2007. – vol. 16, № 8. – P. 2080-2095. https://doi.org/10.1109/TIP.2007.901238.
20. Noise2Noise: Learning Image Restoration without Clean Data / J. Lehtinen et al // ICML. – 2018. – P. 2965-2974. Available: https://proceedings.mlr.press/v80/lehtinen18a/lehtinen18a.pdf (accessed: 25.03.2026).
21. Krull A. Noise2Void – Learning Denoising From Single Noisy Images / A. Krull, T.-O. Buchholz, F. Jug // CVPR. – 2019. – P. 2129-2137. Available: https://openaccess.thecvf.com/content_CVPR_2019/html/Krull_Noise2Void_-_Learning_Denoising_From_Single_Noisy_Images_CVPR_2019_paper.html (accessed: 25.03.2026).
22. The Heart Database (3D+t cardiac MRI with expert and automated segmentations) / J. Cousty et al // Available: https://perso.esiee.fr/~dpt-it/a2si/heart/data/HeartDatabase.tgz (accessed: 25.03.2026).

Acknowledgements

This research has been funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (grant: №AP25794129 «Development of an Algorithm for Filtering and Preprocessing Biomedical Images for Cardiology Diagnostics»).

М. Кабдуллин[1]*, Л. Найзабаева[2], S.A.R. Al-Haddad[3], А. Кабдуллин[1], А. Исаева[4]
[1]050013, Satbayev University, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Сәтбаев көшесі, 22
[2]050040, International IT University, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Манас көшесі, 34/1
[3]Universiti Putra Malaysia, Селангор, Малайзия, 43400 UPM Serdang
[4]050000, Қазақстан Республикасы Президенті Іс басқармасы Медициналық орталығының Ұлттық госпиталі, Алматы қ., Бәйсейітова көшесі, 16
*e-mail: m.kabdullin@satbayev.university

ЖҮРЕК-ҚАНТАМЫР АУРУЛАРЫ БАР ПАЦИЕНТТЕРДІ БИОМЕДИЦИНАЛЫҚ КЕСКІНДЕРДІ ТАЛДАУ НЕГІЗІНДЕ АВТОМАТТЫ МОНИТОРИНГТЕУ ЖҮЙЕСІН ӘЗІРЛЕУ ЖӘНЕ ВАЛИДАЦИЯЛАУ

Жүрек-қантамыр аурулары өлім-жітімнің жетекші себептерінің бірі болып қала береді, бұл кардиологиялық кескіндерді талдаудың тұрақты әдістерін және пациенттерді мониторингтеу жүйелерін әзірлеудің өзектілігін айқындайды. Осы жұмыста ғылыми жоба (IRN: AP05132044) аясында әзірленген биомедициналық кескіндерді автоматтандырылған алдын ала өңдеу және сегментациялау жүйесі ұсынылып, валидтелді. Эксперименттік протокол ашық Heart Database деректер жиыны негізінде (18 пациент, 3D+t МРТ) жүзеге асырылды, бағалау үшін эндокардтың сараптамалық маскалары және 36 кесінді (диастола/систола) пайдаланылды. Бағалау PSNR, SSIM, Dice және IoU метрикалары бойынша жүргізілді. Салыстырмалы талдау алдын ала өңдеудің бес режимін қамтыды: none, Gaussian, wavelet, NLM және hybrid (wavelet + NLM + CLAHE). Нәтижелер NLM әдісінің шу басу сапасы бойынша ең жоғары көрсеткішке ие екенін көрсетті (PSNR = 26,07±0,33 dB, ал baseline үшін 22,85±0,21 dB, p=1,46·10⁻¹¹, Уилкоксон критерийі), ал сегментацияның ең жоғары

дәлдігі hybrid-алдын ала өңдеу кезінде байқалды (Dice = 0,681±0,176, ал алдын ала өңдеусіз 0,636±0,153, p=0,018). «Күрделі жағдайларды» талдау сегментация сапасының эндокард контрастына және жүрек циклі фазаларындағы геометриялық күрделілікке тәуелді екенін көрсетті. Алынған нәтижелер алдын ала өңдеу кезеңінің downstream-сегментация сапасына статистикалық тұрғыдан маңызды әсер ететінін көрсетеді және «алдын ала өңдеу-сегментация-бағалау» кешенді конвейерін клиникалық мониторинг жүйелерін әзірлеудің инженерлік негізі ретінде қолданудың орынды екенін дәлелдейді. Ұсынылған тәсіл нақты деректердің гетерогенділігі жағдайында тұрақты және қайта өндірілуі мүмкін жұмысқа бағытталған және оны клиникалық ақпараттық жүйелерге одан әрі енгізудің негізі ретінде қарастыруға болады.

Түйін сөздер: *биомедициналық кескіндер, кардиологиялық мониторинг, терең оқыту, жүрек сегментациясы, шу басу, шығару фракциясы, қашықтан денсаулық сақтау.*

М. Кабдуллин[1]*, Л. Найзабаева[2], S.A.R. Al-Haddad[3], А. Кабдуллин[1], А. Исаева[4]
[1]Satbayev University, 050013, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22
[2]International IT University, 050040, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Манаса, 34/1
[3]Universiti Putra Malaysia, Малайзия, Селангор, 43400 UPM Serdang
[4]Национальный госпиталь Медицинского центра Управления делами Президента Республики Казахстан, 050000, г. Алматы, ул. Байсеитовой, 16
*e-mail: m.kabdullin@satbayev.university

РАЗРАБОТКА И ВАЛИДАЦИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПАЦИЕНТОВ С СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТЫМИ ЗАБОЛЕВАНИЯМИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА БИОМЕДИЦИНСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Сердечно-сосудистые заболевания остаются ведущей причиной смертности, что определяет актуальность разработки устойчивых методов анализа кардиологических изображений и систем мониторинга пациентов. В работе представлен и валидирован интегрированный прототип конвейера и сегментации биомедицинских изображений, разработанная в рамках научного проекта (IRN: AP05132044). Экспериментальный протокол реализован на открытом наборе данных Heart Database (18 пациентов, 3D+t МРТ) с использованием экспертных масок эндокарда и 36 срезов (диастола/систола). Оценка качества проводилась по метрикам PSNR, SSIM, Dice и IoU. Сравнительный анализ включал пять режимов предобработки: none, Gaussian, wavelet, NLM и hybrid (wavelet + NLM + CLAHE). Показано, что метод NLM обеспечивает наилучшее качество шумоподавления (PSNR = 26,07±0,33 dB против 22,85±0,21 dB для baseline, $p=1{,}46\cdot10^{-11}$, критерий Уилкоксона), тогда как максимальная точность сегментации достигается при hybrid-предобработке (Dice = 0,681±0,176 против 0,636±0,153 без предобработки, p=0,018). Проведён анализ «трудных» случаев, выявивший зависимость качества сегментации от контрастности эндокарда и геометрической сложности в различных фазах сердечного цикла. Полученные результаты демонстрируют статистически значимое влияние этапа предобработки на качество downstream-сегментации и подтверждают целесообразность использования комплексного конвейера «предобработка-сегментация-оценка» как инженерной основы для разработки систем клинического мониторинга. Предложенный подход ориентирован на воспроизводимую работу в условиях реальной неоднородности данных и может быть использован в качестве основы для дальнейшей интеграции в клинические информационные системы.

Ключевые слова: *биомедицинские изображения, кардиологический мониторинг, глубокое обучение, сегментация сердца, шумоподавление, фракция выброса, удаленное здравоохранение.*

Авторлар туралы мәліметтер

Максат Кабдуллин* – Satbayev University, Алматы, Қазақстан; e-mail: m.kabdullin@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7320-6259.

Лязат Найзабаева – техника ғылымдарының докторы, зерттеуші профессор, «Ақпараттық жүйелер» кафедрасы, International IT University, Алматы, Қазақстан; e-mail: l.naizabayeva@edu.iitu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4860-7376.

Syed Abdul Rahman Al-Haddad – профессор, компьютерлік және байланыс жүйелері кафедрасы, инженерлік факультет, Universiti Putra Malaysia, Селангор, Малайзия; e-mail: sar@upm.edu.my. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5522-5096.

Азат Кабдуллин – зерттеуші-оқытушы, «Ақпараттық жүйелер» кафедрасы, Satbayev University, Алматы, Қазақстан; e-mail: a.kabdullin@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5589-2542.

Асия Исаева – Инновациялар және білім беру орталығының жетекшісі, Қазақстан Республикасы Президенті Іс басқармасы Медициналық орталығының Ұлттық госпиталі, Алматы, Қазақстан; e-mail: issayeva_a@snh.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1673-3965.

Information about the authors

Maxat Kabdullin* – Satbayev University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: m.kabdullin@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7320-6259.

Lyazat Naizabayeva – Doctor of Technical Sciences, Research Professor, Department of Information Systems, International IT University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: l.naizabayeva@edu.iitu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4860-7376.

Syed Abdul Rahman Al-Haddad – Professor, Department of Computer and Communication Systems Engineering, Faculty of Engineering, Universiti Putra Malaysia, UPM Serdang, Selangor, Malaysia; e-mail: sar@upm.edu.my. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5522-5096.

Azat Kabdullin – Research Lecturer, Department of Information Systems, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: a.kabdullin@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5589-2542.

Asiya Issayeva – Head of the Center for Innovation and Education, National Hospital of the Medical Center of the President's Affairs Administration of the Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan; e-mail: issayeva_a@snh.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1673-3965.

Сведения об авторах

Максат Кабдуллин* – Satbayev University, Алматы, Казахстан; e-mail: m.kabdullin@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7320-6259.

Лязат Найзабаева – доктор технических наук, профессор-исследователь кафедры «Информационные системы», International IT University, Алматы, Казахстан; e-mail: l.naizabayeva@edu.iitu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4860-7376.

Syed Abdul Rahman Al-Haddad – профессор, кафедра компьютерных и коммуникационных систем, инженерный факультет, Universiti Putra Malaysia, Селангор, Малайзия; e-mail: sar@upm.edu.my. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5522-5096.

Азат Кабдуллин – преподаватель-исследователь кафедры «Информационные системы», Satbayev University, Алматы, Казахстан; e-mail: a.kabdullin@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5589-2542.

Асия Исаева – руководитель Центра инноваций и образования, Национальный госпиталь медицинского центра Управления делами Президента РК, Алматы, Казахстан; e-mail: issayeva_a@snh.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1673-3965.

Received 02.04.2026
Revised 09.05.2026
Accepted 12.05.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-8

ҒТАХР: 28.15.19

CC BY 4.0
Check for updates

М.Т. Сейлханова*, Қ. Әлімхан
[1]Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
010000, Қазақстан Республикасы, Астана қ., Сәтпаев көшесі, 2
*e-mail: mbt_kz@mail.ru

АНЫҚТАЛМАҒАН ПАРАМЕТРЛІ ЕКІНШІ РЕТТІ СЫЗЫҚТЫҚ ЕМЕС ЖҮЙЕЛЕРДІ КЕРІ ҚАДАМ ӘДІСІНЕ НЕГІЗДЕЛГЕН АДАПТИВТІ РОБАСТТЫ БАСҚАРУ

Аңдатпа: *Мақалада анықталмаған параметрлі және сыртқы әсері бар сызықтық емес қатаң кері байланыс класс нысанын басқару есебі зерттеледі. Зерттеудің негізгі мақсаты – жүйенің робасттылығын қамтамасыз ететін және барлық сигналдардың кең ауқымды бірқалыпты шектелгендігін қамтамасыз ететін адаптивті басқару алгоритмін әзірлеу.*

Белгісіз динамикалық функцияларды компенсациялау үшін рекурсивті синтез (backstepping) әдісі мен адаптивті аппроксимация заңдары біріктіріліп қолданылды. Тұйықталған жүйенің кең

©М.Т.Сейлханова, Қ.Әлімхан, 2026

ауқымды орнықтылығы Ляпунов функциялар әдісі арқылы аналитикалық түрде дәлелденіп, бақылау қатесінің нөлдің шектелген маңайына жинақталатыны көрсетіледі.

Зерттеу нәтижесінде анықталмаған параметрлері және шектелген сыртқы әсерлері бар екінші ретті қатаң кері байланыс түріндегі сызықтық емес жүйелер үшін басқару есебі қойылып, осы есептің адаптивті-робастты басқару арқылы шешілетіні конструктивті түрде көрсетілді. Атап айтқанда, берілген эталондық траекторияны бақылауды қамтамасыз ететін басқару заңының бар болуы backstepping әдісі негізінде енгізіліп, оны құрудың кезеңдік синтез жолы ұсынылды: алдымен виртуалды басқару құрылып, кейін адаптивті басқару заңдары анықталды. Ляпунов функциялары әдісі арқылы тұйықталған жүйенің орнықтылығы, барлық сигналдардың бірқалыпты шектелгендігі және бақылау қатесінің нөлдің шектелген маңайына жинақталуы дәлелденді. Осылайша, жұмыста тек жеке басқару алгоритмі ғана емес, анықталмаған сызықтық емес жүйелер класы үшін басқару есебінің шешілімділігін негіздейтін теориялық және конструктивті тәсіл ұсынылды.

Ұсынылған әдістің практикада тексеру мақсатында бірбуынды робот-манипулятордың динамикасына сандық модельдеу жүргізілді. Нәтижелер ұсынылған адаптивті бэкстеппинг алгоритмінің жүктеме параметрі кенет өзгерген және сыртқы әсер болған жағдайда жүйенің шектелген қозғалыс режимін сақтайтынын көрсетті. Сандық салыстыру MSE, максимал қате және орныңу уақыты көрсеткіштері бойынша жүргізіліп, басқару сапасының алгоритм параметрлерін таңдауға тәуелді екені анықталды. Бұл әдіс параметрлік белгісіздігі бар мехатроникалық және роботтандырылған жүйелерді басқару үшін қолданылуы мүмкін, алайда практикалық қолдану алдында басқару коэффициенттерін қосымша баптау қажет.

Түйін сөздер: *сызықтық емес жүйе, кері байланыс (бэкстеппинг) класы, Робастты басқару, адаптивті басқару, Ляпунов функциясы, PID реттегіші.*

Кіріспе

Қазіргі өнеркәсіптің қарқынды дамуында техникалық объектілерді басқару сапасына қойылатын талаптар үнемі артылуда. Жүйелердің сызықтық теориясы бүгінгі таңда жақсы зерттелгенімен, күрделі мехатрондық және роботтандырылған кешендерді басқаруда стандартты сызықтық реттегіштер көп жағдайда жеткілікті тиімді болмайды. Бұл нақты жүйелердің, атап айтқанда, ұшқышсыз ұшу аппараттарының, манипуляторлардың және суасты роботтарының айқын сызықтық емес динамикаға ие болуына, сондай-ақ сыртқы әсерлер мен анықталмаған параметрлер әсеріне ұшырауына байланысты [1-3].

Осындай объектілерді басқару есептерін шешу үшін, сызықтық емес әдістер кеңінен қолданылады. Негізгі әдістердің қатарында адаптивті басқару мен backstepping әдістері [4-7]. Олардың басты ерекшеліктері – әрбір ішкі жүйе үшін виртуалды басқару заңдарын рекурсивті түрде жобалау үдерісі; бұл басқару синтезінің күрделілігін тиімді түрде төмендетуге мүмкіндік береді [5, 8-10, 12].

Алайда, классикалық backstepping әдісінде көбіне объектінің математикалық моделін дәл білуді талап етеді [11, 12]. Осы жұмыста толық белгісіз сызықтық емес функциялар және сыртқы кедергілер болған жағдайда тұрақтылық пен басқару сапасын қамтамасыз етуге бағытталған робастты басқару есебі қарастырылады.

Мақаланың мақсаты – анықталмаған параметрлі сызықтық емес жүйелер класы үшін тұйықталған жүйенің робасттылығын және барлық сигналдарының шектелгендігін қамтамасыз ететін басқару алгоритмін құру [9, 13-15].

Есептің қойылымы мен математикалық моделі

Қатаң кері байланыс (strict-feedback form) түріндегі теңдеулермен сипатталатын белгісіз сызықтық емес жүйелер класын қарастырайық. Бұл форма жоғары ретті жүйелер (HOFA) үшін базалық болып табылады [8-10] және көптеген механикалық жүйелердің динамикасын күрделі координаталық түрлендірулерсіз сипаттауға мүмкіндік береді [1, 3, 4, 8].

Жүйе келесі теңдеулермен сипатталады:

$$\begin{cases} \dot{x_1} = x_2 + f_1(x_1) \\ \dot{x_2} = gu + f_2(x_1, x_2) + d(t) \end{cases} \quad (1)$$

мұндағы, $x_1, x_2 \in R$ – жүйенің күй айнымалылары;

$u \in R$ – басқару;

f_1, f_2 – ішкі динамиканы сипаттайтын белгісіз тегіс сызықты емес функциялар [6, 7];

g – басқарудың тиімділік коэффициенті (белгілі және нөлден өзге деп ұйғарылады);
$d(t)$ – шектелген сыртқы әсер [5, 9], $|d(t)| \le D_{max}$.

Басқарудың мақсаты: Шығу айнымалысы x_1 айнымалысының берілген $y_d(t)$ тегіс функциясы бойымен асимптотикалық бақылауды қамтамасыз ететін u басқару заңын құру, яғни, $\lim_{t\to\infty}|x_1(t) - y_d(t)| \le \varepsilon$, мұндағы ε – анықталмаған f_i және *d(t)* сыртқы әсер бар болғандағы аз шама.

Робастты адаптивті басқаруды синтездеу

Синтез процесі екі қадамнан тұрады. Анықталмаған f_i функцияларын компенсациялау үшін, адаптивті аппроксимация әдісі пайдаланылады [6, 7, 15] (мысалы, $\hat{f} = \hat{\theta}^T\psi(x)$ сызықты параметрлендіру арқылы).

Белгісіз тегіс сызықты емес функциялар белгілі базистік функциялар векторы арқылы сызықты параметрленген түрде жуықталады деп аламыз:

$$f_i(x) = \theta_i^{*T}\psi_i(x) + \varepsilon_i(x), \tag{2}$$

мұндағы $\psi_i(x)$ – белгілі базистік функциялар векторы, θ_i^* – белгісіз нақты параметрлер векторы, ал $\varepsilon_i(x)$ – аппроксимация қателігі. Бұл қателік шектелген деп ұйғарылады:

$$|\varepsilon_i(x)| \le \bar{\varepsilon_i}, \tag{3}$$

Бейімделу барысында белгісіз функцияның бағасы келесі түрде алынады:

$$\hat{f}_i(x) = \hat{\theta}_i^T\psi_i(x), \tag{4}$$

мұндағы $\hat{\theta}_i$ – адаптивті заңдар арқылы анықталатын параметрлер бағасы.
Параметрлік бағалау қатесі:

$$\tilde{\theta}_i = \theta_i^* - \hat{\theta}_i, \tag{5}$$

түрінде анықталады. Осылайша, белгісіз динамикалық функцияның қалдық бөлігі параметрлік бағалау қатесі мен аппроксимация қатесі арқылы сипатталады:

$$f_i(x) - \hat{f}_i(x) = \hat{\theta}_i^T\psi_i(x) + \varepsilon_i(x), \tag{6}$$

1 қадам: Орналасу циклінің тұрақтандырылуы

Бағалау қатесін анықтаймыз:

$$z_1 = x_1 - y_d \tag{7}$$

z_1 –ді туындылап келесіні аламыз:

$$\dot{z_1} = x_2 + f_1(x_1) - \dot{y_d} \tag{8}$$

x_2-ні виртуалды басқару ретінде қарастырамыз. z_1-дің орнықтылығы үшін x_2 – нің қажетті түрі таңдалады (α_1 деп белгілейміз). Бірінші қадам үшін Ляпунов функциясы келесі түрде болады:

$$V_1 = \frac{1}{2}z_1^2 + \frac{1}{\gamma}\tilde{\theta}^2 \tag{9}$$

α_1 виртуалды басқаруы динамиканың белгілі бөлігін компенсациялау және қатені басу мақсатында таңдалады:

$$\bar{\alpha} = x_2 - z_2 = \dot{x}_1 - f_1(x_1) - z_2 = \dot{z}_1 + \dot{y}_d - f_1(x_1) \tag{10}$$

$$\alpha_1 = -c_1z_1 + \dot{y}_d - \widehat{f_1}(x_1) \tag{11}$$

мұндағы c_1 – кері байланыс коэффициенті.

2 қадам: Қорытынды басқару заңының синтезі

Екінші ішкі жүйенің қателігін (нақты жылдамдықтың виртуалды жылдамдықтан ауытқуын) енгізейік:

$$z_2 = x_2 - \alpha_1 \tag{12}$$

Обьект теңдеуін ескере отырып, z_2 қателігінің динамикасы:

$$\dot{z_2} = gu + f_2(x_1, x_2) + d(t) - \dot{\alpha}_1 \quad (13)$$

Бүкіл жүйенің орнықтандыру үшін соңғы Ляпунов функциясын таңдайық:

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2}z_2^2 \quad (14)$$

V_2-ні туындылаймыз:

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 + z_2\dot{z}_2, \quad (15)$$

$$\dot{z_1} = \dot{x}_1 - \dot{y}_d = x_2 + f_1(x_1) - \dot{y}_d = z_2 + \alpha_1 + f_1(x_1) - \dot{y_d} \quad (16)$$

$$\dot{z}_2 = \dot{x}_2 - \dot{\alpha_1} = gu + f_2(x_1, x_2) + d(t) - \dot{\alpha_1}, \quad (17)$$

$$\dot{V} = z_1\dot{z}_1 + z_2\dot{z}_2 = z_1(z_2 + \alpha_1 + f_1(x_1) - \dot{y_d}) + \\ + z_2(gu + f_2(x_1, x_2) + d(t) - \dot{\alpha}_1) - \frac{1}{\gamma}\tilde{\theta}\dot{\hat{\theta}}, \quad (18)$$

(12)-ні бағалап, *u*-ды келесі түрде аламыз:

$$u = \frac{1}{g}(-z_1 - c_2z_2 - \hat{\theta}_2^T\psi_2(x) + \dot{\alpha}_1 - \rho\sigma(z_2)) \quad (19)$$

мұндағы, $c_2>0$, $\rho>0$, ал $\sigma(z_2)$ – таңба функциясының тегістелген түрі, мысалы:

$$\sigma(z_2) = \frac{z_2}{|z_2|+\varepsilon}, \varepsilon > 0, \quad (20)$$

Орнықтылықты талдау

Бұл бөлімнің негізгі мақсаты – ұсынылып отырған басқару заңы бақылау қатесінің нөлдің кейбір маңайына жақындауына және барлық бейімделулердің шектелуіне кепілдік беретінін дәлелдеу болып табылады [5, 9, 13].

Ляпунов функциясын таңдау: Жүйенің бүкіл жүйесі үшін жалпы Ляпунов функциясын қарастырайық [9, 11, 12]: ол күй бойынша қателіктерді және параметрлерді бағалау қателіктерін біріктіреді:

$$V(z, \tilde{\theta}) = \frac{1}{2}z_1^2 + \frac{1}{2}z_2^2 + \frac{1}{2}\tilde{\theta}_1^T\Gamma_1^{-1}\tilde{\theta}_1 + \frac{1}{2}\tilde{\theta}_2^T\Gamma_2^{-1}\tilde{\theta}_2 \quad (21)$$

мұндағы $\Gamma_1 = \Gamma_1^T > 0, \Gamma_2 = \Gamma_2^T > 0$ – адаптивті жылдамдықты анықтайтын оң анықталған матрицалар.

Оның уақыт бойынша туындысы:

$$\dot{V} = z_1\dot{z}_1 + z_2\dot{z}_2 + \tilde{\theta}_1^T\Gamma_1^{-1}\dot{\tilde{\theta}}_1 + \tilde{\theta}_2^T\Gamma_2^{-1}\dot{\tilde{\theta}}_2. \quad (22)$$

Бірінші және екінші қате динамикаларын, сондай-ақ (13) басқару заңын ескерсек, келесі өрнек алынады:

$$\dot{V} = -c_1z_1^2 - c_2z_2^2 + z_1\tilde{\theta}_1^T\psi_1 + z_2\tilde{\theta}_2^T\psi_2 + z_1\varepsilon_1 + z_2[\varepsilon_2 + d(t) - \rho\sigma(z_2)] + \tilde{\theta}_1^T\Gamma_1^{-1}\dot{\tilde{\theta}}_1 + \tilde{\theta}_2^T\Gamma_2^{-1}\dot{\tilde{\theta}}_2. \quad (23)$$

Параметрлерді бейімдеу заңдарын келесі түрде таңдаймыз:

$$\dot{\hat{\theta}}_1 = \Gamma_1\psi_1(x)z_1, \quad (24)$$

$$\dot{\hat{\theta}}_2 = \Gamma_2\psi_2(x)z_2. \quad (25)$$

$\tilde{\theta}_i = \theta_i^* - \hat{\theta}_i$ болғандықтан, $\dot{\tilde{\theta}}_\iota = -\dot{\hat{\theta}}_\iota$. Осы бейімдеу заңдарын $\dot{V}$ өрнегіне қойғанда параметрлік белгісіздікке қатысты мүшелер қысқарады. Нәтижесінде:

$$\dot{V} = -c_1z_1^2 - c_2z_2^2 + z_1\varepsilon_1 + z_2[\varepsilon_2 + d(t) - \rho\sigma(z_2)]. \quad (26)$$

Аппроксимация қателігі мен сыртқы әсер шектелген деп аламыз:

$$|\varepsilon_1(x)| < \bar{\varepsilon_1}, \quad (27)$$

$$|\varepsilon_2(x) + d(t)| < \Delta. \quad (28)$$

Робасттық коэффициент $\rho > \Delta$ шартымен таңдалса, онда робастты мүше сыртқы әсер мен аппроксимация қалдығының әсерін басады. Тегістелген таңба функциясы үшін:

$$z_2\sigma(z_2) = \frac{z_2^2}{|z_2|+\varepsilon} < |z_2| - \varepsilon, \quad (29)$$

теңсіздігі орындалады. Сондықтан:

$$z_2[\varepsilon_2(x) + d(t) - \rho\sigma(z_2)] = \frac{z_2^2}{|z_2|+\varepsilon} < -(\rho - \Delta)|z_2| + \rho\varepsilon, \quad (30)$$

Ал бірінші аппроксимация қатесіне қатысты мүше келесі түрде бағаланады:

$$z_1\varepsilon_1(x) \le \frac{c_1}{2}z_1^2 + \frac{\bar{\varepsilon}_1^2}{2c_1}. \quad (31)$$

Осы бағалауларды біріктірсек:

$$\dot{V} \le -\frac{c_1}{2}z_1^2 - c_2z_2^2 - (\rho - \Delta)|z_2| + \frac{\bar{\varepsilon}_1^2}{2c_1} + \rho\varepsilon. \quad (32)$$

Демек,

$$\dot{V} \le -\lambda\|z\|^2 + \delta, \quad (33)$$

$$\lambda = min\left\{\frac{c_1}{2}, c_2\right\},\ \delta = \frac{\bar{\varepsilon}_1^2}{2c_1} + \rho\varepsilon. \quad (34)$$

Осыдан Ляпунов функциялар әдісі бойынша тұйықталған жүйенің барлық сигналдары бірқалыпты шектелген болады. Сонымен қатар z_1 және z_2 қателіктері нөлдің шектелген маңайына жинақталады. Бұл маңайдың өлшемі аппроксимация дәлдігіне, сыртқы әсердің жоғарғы шегіне және тегістеу параметрі ε-ге тәуелді.

Ляпунов бойынша орнықтылық теориясына сәйкес, осы теңсіздіктен келесі қорытынды шығады:

1. Шектелгендік**:** Барлық $z_1, z_2, \hat{\theta}$ сигналдары жаһандық бірқалыпты шектелген болып табылады (GUUB) [5, 13].

2. Орнықтылық**:** Қадағалау қателіктері z_1, z_2 көрсеткішті түрде, өлшемі c_1, c_2 тұрақтыларға тәуелді, компакт Ω_z жиынға жинақталады:

$$\Omega_z = \left\{z: \|z\| \ge \sqrt{\frac{\delta}{\lambda}}\right\} \quad (35)$$

Ғылыми нәтижелерді талқылау

Әдістің оңтайлылығын тексеру үшін бірбуынды робот-манипулятордың динамикасы модельденді [4].

Эксперимент параметрлері:

Манипулятор динамикасының теңдеулері (жоғарыдағы жүйенің дербес жағдайы ретінде [4, 6]):

$$\ddot{q} = \frac{1}{m\cdot l^2}(u - m\cdot g\cdot l\cdot sin(q) - k\cdot\dot{q}) + d(t) \quad (36)$$

Келесі параметрлерді қабылдайық: $l = 1$ м, $g_{acc} = 9{,}8$ м/с^2;

Робастылықты тексеру сценарийі:

1. Эталон**:** $y_d(t) = 0{,}72 \times \sin(t)$, $\dot{y_d}(t) = 0{,}72 \times \cos(t)$, $\ddot{y_d}(t) = -0{,}72 \times \sin(t)$.

2. Жүктеменің өзгеруі: $t \in [0{,}5)$ аралығында гравитациялық жүктеме коэффициенті *G=9,8,* ал *t=5 c* с мезетінде *G=19,6* мәніне дейін кенет өзгереді. Бұл жүктеменің екі есе артуын сипаттайды;

3. Сыртқы әсер**:** *d(t) = 0,1×sin(2t)*.

Жүйенің физикалық моделі

Қарастырылып отырған басқару обьектісі – бір буынды роботтық манипулятор (қатты буын), оның динамикасы қатаң кері байланыс түрінде жазылған.

Жүйенің күй теңдеулері

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = gu - 9{,}8\sin(x_1) - kx_2 + d(t) \end{cases} \quad (37)$$

Физикалық түсіндірме:

x_1 – бұрыш, буынның орны;

x_2- бұрыштық жылдамдық, буынның айналу жылдамдығы;

$9{,}8\sin(x_1)$ – Гравитациялық күштің моменті (қозғалысқа кедергі келтіретін немесе оны жеңілдететін гравитациялық компонент);

kx_2 – буындағы тұтқырлық үйкеліс (энергияны шашырату);

$d(t)$ – сыртқы кедергілер (мысалы, тіреудің дірілі).

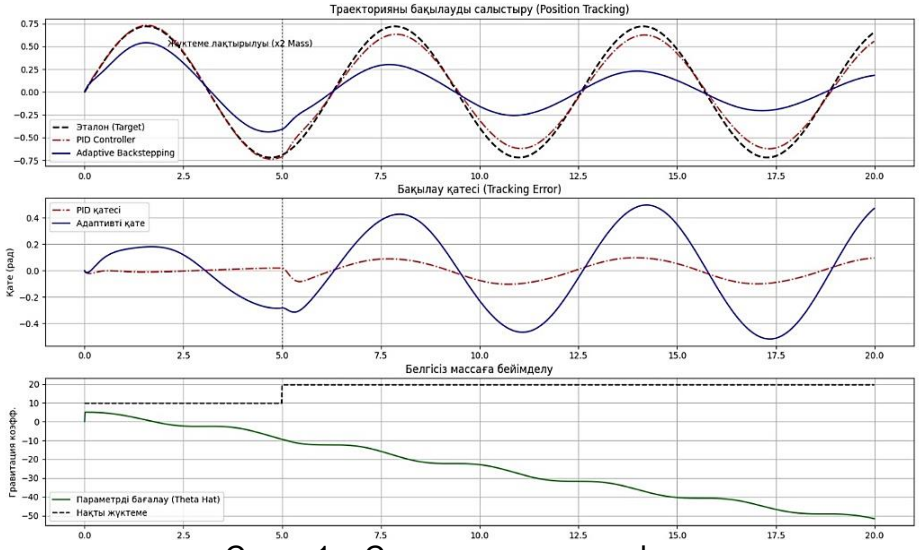
Ұсынылған адаптивті басқару заңының беріктігін (тұрақтылығын) тексеру үшін обьект параметрлерінің кенет өзгеруі бар сценарий әзірленді. Эксперимент сценарийі кесте 1-де көрсетілген.

Кесте1 – Эксперимент сценарийі

Параметр	Мән/шарт	Физикалық мағына
Бастапқы кезең (t< 5 c)	Масса *m=1,0* кг	Роботтың қозғалысы, бос «қол»
Оқиға t=5 c	Масса *m* → 2,0 кг	Жүкті кенеттен ұстап алу. Жүк бірден екі есе артады
Кедергі *d(t)*	*d(t) = 0,1×sin(2t)*.	Тұрақты, сыртқы бүкіл жол бойындағы діріл

Салыстырмалы талдау

Ұсынылған адаптивті бэкстеппинг пен классикалық PID реттегішінің салыстырмалы талдауы жүргізілді [12, 14] (сурет 1).



Сурет 1 – Салыстырмалы график

Сандық нәтижелерді нақтылау үшін бақылау қатесі келесі түрде анықталды:

$$e(t) = y_d(t) - x_1(t). \quad (38)$$

Сандық көрсеткіштер жүктеме өзгергеннен кейінгі аралықта, яғни t∈[5;20] с үшін есептелді. Орташа квадраттық қате:

$$MSE = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} e^2(t_k). \quad (39)$$

Максимал қате:

$$e_{max} = \max_{t\in[5;20]} |e(t)|. \quad (40)$$

Эталондық траектория амплитудасына қатысты максимал салыстырмалы ауытқу:

$$M_p = \frac{e_{max}}{A_d} \times 100\%. \quad (41)$$

мұндағы A_d=0,72. Орнығу уақыты t_s жүктеме өзгерген t=5 с мезетінен кейін бақылау қатесінің 2% дәлдік аймағында қалу шарты бойынша анықталды:

$$t_s = inf\{\tau \geq 5: |e(t)| \leq 0{,}02A_d, \forall t \in [\tau; 20]\}. \quad (42)$$

Сандық есептеу нәтижелері 2-кестеде берілген.

Кесте 2 – Басқару әдістерінің сандық салыстырмалы көрсеткіштері

Басқару әдісі	MSE, рад^2	Максимал қате, e_{max}, рад	M_p, %
PID-реттегіш	0,00473	0,10554	14,66
Адаптивті backstepping	0,10653	0,51711	71,82

Алынған нәтижелер

Іздену дәлдігі: 2-кестеде келтірілген сандық нәтижелер бойынша берілген бағдарламалық сценарийде PID-реттегіш үшін жүктеме өзгергеннен кейінгі орташа квадраттық қате MSE=0,00473 рад^2, ал адаптивті backstepping алгоритмі үшін MSE=0,10653 рад^2 болды. Максимал бақылау қатесі PID-реттегіште 0,10554 рад, ал адаптивті басқаруда 0,51711 рад мәніне жетті.

Өтпелі үдерістің сапасы: Жүктеме коэффициенті G=9,8-ден G=19,6-ға т өзгергеннен кейін екі басқару әдісінде де 2% дәлдік аймағына толық орнығу 20 секундтық модельдеу аралығында байқалмады. Сондықтан орнығу уақыты екі жағдайда да t_s>15 с ретінде бағаланды.

Орнықтылық: Сыртқы әсер d(t)=0,1×sin(2t) болған жағдайда екі басқару жүйесі де шектелген қозғалыс режимінде қалды. Сонымен қатар алынған сандық нәтижелер адаптивті backstepping алгоритмінің нақты сапасы c_1, c_2, γ және бастапқы $\hat{\theta}(0)$ мәндерін таңдауға тәуелді екенін көрсетеді. Осыған байланысты сандық модельдеу нәтижелері тек сапалық графикпен емес, MSE, максимал қате, салыстырмалы ауытқу және орнығу уақыты сияқты нақты көрсеткіштер арқылы берілді.

Қорытынды

Жүргізілген ғылыми зерттеу жұмысының нәтижесінде келесідей тұжырымдар жасалды:

– Алгоритмдік жаңашылдық: Қатаң кері байланыс түріндегі сызықтық емес жүйелер үшін адаптивті backstepping әдісіне негізделген робастты басқару заңы құрылды. Бұл алгоритм жүйедегі белгісіздіктер мен сыртқы әсерлерді нақты уақыт режимінде бақылауға және олардың әсерін өтеуге мүмкіндік береді.

– Теориялық негіздеме: Ляпунов функциялары әдісін қолдану арқылы тұйықталған жүйенің орнықтылығы мен барлық күй айнымалыларының шектелгендігі математикалық тұрғыдан дәлелденді. Басқару заңындағы робастты құраушы мен сыртқы әсерін жоятын тегістелген функцияның қолданылуы жүйе сапасын арттырды.

– Робот-манипулятор моделінде жүргізілген сандық эксперименттер ұсынылған әдістің анықталмаған параметрлер және сыртқы әсер жағдайында жұмыс қабілеттілігін сақтайтынын көрсетті. Жүктеме кенеттен өзгерген кезде жүйе шектелген қозғалыс режимінде қалды, ал MSE, максимал қате және орнығу уақыты бойынша алынған нақты мәндер басқару сапасының алгоритм параметрлерін таңдауға тәуелді екенін көрсетті. Сондықтан ұсынылған әдіс параметрлік белгісіздігі бар мехатроникалық жүйелерде қолданылуы мүмкін, алайда практикалық іске асыру алдында басқару коэффициенттерін қосымша баптау қажет.

– Болашақ бағыттар: Зерттеу нәтижелері априорлық белгісіздік жағдайында жұмыс істейтін өнеркәсіптік роботтардың басқару жүйелерін жетілдіруге негіз болады. Алдағы уақытта бұл әдісті жүйенің толық күйі белгісіз (жылдамдық өлшенбейтін) жағдайлар үшін бақылаушы құру арқылы кеңейту жоспарлануда.

Әдебиеттер

1. Robust output control of twin rotor nonlinear multichannel object / S.A. Vrazhevsky et al // Journal of Instrument Engineering. – 2018. – Vol. 61, № 1. – P. 32-40.

2. Unmanned aerial vehicles: control methods and future challenges / Z. Zuo et al // IEEE/CAA J. Autom. Sinica. – 2022. – Vol. 9. – P. 601-614.
3. Boundary control of a rotating and length-varying flexible robotic manipulator system / Y. Liu et al // IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Syst. – 2022. – Vol. 52. – P. 377-386.
4. Adaptive backstepping control of high-order fully actuated nonlinear systems with event-triggered strategy / C. Yan et al // Intelligence & Robotics. – 2023. – Vol. 3(2). – P. 176-189.
5. Wen G. Simplified optimized backstepping control for a class of nonlinear strict-feedback systems with unknown dynamic functions / G. Wen, C. Chen, S. Ge // IEEE Trans. Cybern. – 2021. – Vol. 51. – P. 4567-4580.
6. Backstepping-Based adaptive control of a class of uncertain incommensurate fractional-order nonlinear systems / X. Li et al // IEEE Trans. Ind. Electron. – 2022. – Vol. 69. – P. 4087-4095.
7. Adaptive Backstepping Terminal Sliding Mode Control of Nonlinear System Using Fuzzy Neural Structure / X. Gong et al // Mathematics. – 2023. – Vol. 11(5). – P. 1094.
8. Duan G. High-order fully actuated system approaches: Part I. Models and basic procedure / G. Duan // Int. J. Syst. Sci. – 2021. – Vol. 52. – P. 422-435.
9. Duan G. High-order fully actuated system approaches: Part III. Robust control and high-order backstepping / G. Duan // Int. J. Syst. Sci. – 2021. – Vol. 52. – P. 952-971.
10. Adaptive Fixed-Time Control of Strict-Feedback High-Order Nonlinear Systems / Y. Li et al // Entropy. – 2021. – Vol. 23(8). – P. 963.
11. Khalil H.K. Nonlinear Systems., 3rd ed. / H.K. Khalil // Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2002.
12. Slotine J.J.E., Li W. Applied Nonlinear Control., NJ: Prentice-Hall, 1991.
13. Hou Z. On model-free adaptive control and its stability analysis / Z. Hou, S. Xiong // IEEE Trans. Automat. Contr. – 2019. – Vol. 64. – P. 4555-4569.
14. Duan G. High-order fully actuated system approaches: Part V. Robust adaptive control / G. Duan // Int. J. Syst. Sci. – 2021. – Vol. 52. – P. 2129-2143.
15. Utkin V.I. Sliding Modes in Control and Optimization., Berlin: Springer-Verlag, 1992.

М.Т. Сейлханова*, Қ. Әлімхан
[1]Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
010000, Қазақстан Республикасы, Астана қ., Сәтпаев көшесі, 2
*e-mail: mbt_kz@mail.ru

АДАПТИВНОЕ РОБАСТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫМИ СИСТЕМАМИ ВТОРОГО ПОРЯДКА С НЕОПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

В статье исследуется проблема управления нелинейным жестким объектом класса обратной связи с неопределенными параметрами и внешними воздействиями. Основная цель исследования – разработка адаптивного алгоритма управления, обеспечивающего робастность системы и гарантирующего крупномасштабное равномерное ограничение всех сигналов.

Для компенсации неизвестных динамических функций используется метод рекурсивного синтеза (бэкстеппинга) и законы адаптивной аппроксимации в сочетании. Крупномасштабная устойчивость замкнутой системы доказана аналитически с использованием метода функций Ляпунова, и показано, что ошибка управления сходится к ограниченной окрестности нуля.

В результате исследования была сформулирована задача управления для нелинейных систем второго порядка со строгой обратной связью, неопределенными параметрами и ограниченными внешними воздействиями, и конструктивно показано, что эта задача может быть решена с помощью адаптивно-робастного управления. В частности, на основе метода обратной связи было введено существование закона управления, обеспечивающего управление заданной эталонной траекторией, и предложен пошаговый метод его создания: сначала создавалось виртуальное управление, а затем определялись адаптивные законы управления. Устойчивость замкнутой системы, равномерная ограниченность всех сигналов и сходимость ошибки управления к ограниченной окрестности нуля были доказаны с помощью метода функций Ляпунова. Таким образом, в работе представлен не только отдельный алгоритм управления, но и теоретический и конструктивный подход, обосновывающий разрешимость задачи управления для класса неопределенных нелинейных систем.

Для проверки предложенного метода на практике было проведено численное моделирование динамики одно суставного робота-манипулятора. Результаты показали, что предложенный

адаптивный алгоритм обратной связи поддерживает ограниченный режим движения системы в случае внезапного изменения параметра нагрузки и наличия внешних воздействий. Было проведено численное сравнение показателей среднеквадратичной ошибки (MSE), максимальной ошибки и времени установления, и было установлено, что качество управления зависит от выбора параметров алгоритма. Этот метод может быть использован для управления мехатронными и роботизированными системами с неопределенностью параметров, но перед практическим применением требуется дополнительная настройка коэффициентов управления.

Ключевые слова: *нелинейная система, класс обратной связи, робастное управление, адаптивное управление, функция Ляпунова, PID-регулятор.*

M. Seilkhanova*, K. Alimhan
[1]L.N. Gumilyov Eurasian National University,
010000, Republic of Kazakhstan, Astana, Satpayev Street, 2
*e-mail: mbt_kz@mail.ru

ADAPTIVE ROBUST CONTROL OF SECOND-ORDER NONLINEAR SYSTEMS WITH UNDETERMINED PARAMETERS BASED ON THE BACKSTEPPING METHOD

The article investigates the control problem for a class of nonlinear strict-feedback systems with uncertain parameters and external disturbances. The main objective of the study is to develop an adaptive control algorithm that ensures system robustness and guarantees semi-global uniform boundedness of all signals.

To compensate for unknown dynamic functions, the recursive synthesis method, namely backstepping, is combined with adaptive approximation laws. The semi-global stability of the closed-loop system is analytically proven using the Lyapunov function method, and it is shown that the tracking error converges to a bounded neighborhood of zero.

As a result of the study, the control problem is formulated for second-order nonlinear strict-feedback systems with uncertain parameters and bounded external disturbances, and it is constructively demonstrated that this problem can be solved by means of adaptive robust control. In particular, the existence of a control law ensuring tracking of a given reference trajectory is established on the basis of the backstepping method, and a step-by-step synthesis procedure for its construction is proposed: first, a virtual control is designed, and then adaptive control laws are defined. Using the Lyapunov function method, the stability of the closed-loop system, the uniform boundedness of all signals, and the convergence of the tracking error to a bounded neighborhood of zero are proven. Thus, the work proposes not only a specific control algorithm, but also a theoretical and constructive approach that substantiates the solvability of the control problem for a class of uncertain nonlinear systems.

To verify the proposed method in practice, numerical simulation was carried out for the dynamics of a single-link robotic manipulator. The results showed that the proposed adaptive backstepping algorithm preserves the bounded motion mode of the system under sudden changes in the load parameter and in the presence of external disturbances. A numerical comparison was performed using the MSE, maximum error, and settling time criteria, and it was found that the control performance depends on the choice of algorithm parameters. The proposed method can be applied to the control of mechatronic and robotic systems with parametric uncertainty; however, additional tuning of the control gains is required before practical implementation.

Key words: *nonlinear system, feedback class, robust control, adaptive control, Lyapunov function, PID controller.*

Авторлар туралы мәліметтер

Молдир Трусбековна Сейлханова* – магистр, «Математикалық және компьютерлік моделдеу» кафедрасының докторанты, Л.Н.Гумилев Еуразия ұлттық университеті, Қазақстан; e-mail: mbt_kz@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-5282-700X.

Қилан Әлімхан – PhD, «Математикалық және компьютерлік моделдеу» кафедрасының профессоры, Л.Н.Гумилев Еуразия ұлттық университеті, Қазақстан; e-mail: keylan@live.jp. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0766-2229.

Сведения об авторах

Молдир Трусбековна Сейлханова* – магистр, докторант кафедры «Математическое и компьютерное моделирование», Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилёва, Казахстан; e-mail: mbt_kz@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-5282-700X.

Қилан Әлімхан – PhD, профессор кафедры «Математическое и компьютерное моделирование»; Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилёва, Казахстан; e-mail: keylan@live.jp. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0766-2229.

Information about the authors

Moldir Seilkhanova* – Master's degree, doctoral student of the Department of Mathematical and Computer Modeling, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazakhstan; e-mail: mbt_kz@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-5282-700X.

Keylan Alimhan – 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 30.03.2026
Өңдеуден кейін түсуі 14.05.2026
Жариялауға қабылданды 15.05.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-9

BY 4.0
Check for updates

ҒТАХР: 28.23.27

Д.Ж. Шырынханова[1], И.Б. Карымсакова[2]*, Г. Жомартқызы[1], Д.О. Кожахметова[2], Т.А. Устинова[2]

[1]Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті,
070004, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.,Серікбаев көшесі, 19
[2]Шәкәрім университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинка көшесі, 20 А
*e-mail: karymsakova.indira@mail.ru

МАШИНАЛЫҚ ОҚЫТУ (ML) МОДЕЛЬДЕРІН ҚОЛДАНА ОТЫРЫП БАУЫР ҚАТЕРЛІ ІСІГІН БОЛЖАУ

Аңдатпа: *Ашық қолжетімді құрылымдалған клиникалық деректер негізінде бауыр қатерлі ісігі қаупін болжауға арналған машиналық оқыту модельдері салыстырмалы түрде бағаланды. Зерттеуде Kaggle платформасынан алынған деректер жиынтығы қолданылды (N=5000): мақсатты айнымалы Liver_cancer, 13 белгі (9 сандық, 4 категориялық), кластар теңгерімсіз (0: 78,22%, 1: 21,78%).Деректерді алдын ала өңдеу, модельдерді үйрету және бағалау кезеңдері бірыңғай эксперименттік протокол шеңберінде орындалды. Сандық айнымалылар стандарттау арқылы нормаланды; категориялық айнымалылар бинарлы форматта кодталды.*

Салыстырмалы талдауға логистикалық регрессия (Logistic Regression), тірек векторлар әдісі (Support Vector Machine, RBF ядросымен), k ең жақын көршілер (k-Nearest Neighbors), кездейсоқ орман (Random Forest) және градиенттік бустинг (Gradient Boosting) модельдері енгізілді. Барлық модельдер дәлдік (accuracy), нақтылық (precision), сезімталдық (recall/sensitivity), ерекшелік (specificity), F1-өлшемі (F1-score) және ROC қисығы астындағы аудан (ROC-AUC) көрсеткіштері бойынша бағаланды.

Нәтижелер бойынша градиенттік бустинг (Gradient Boosting) ең жоғары жиынтық тиімділікті көрсетті: ROC-AUC=0.999498, Accuracy=0.9754, Precision=0.998967, Sensitivity=0.887971, Specificity=0.999744, F1=0.940204. Салыстыру деректерінде SVM (RBF) және Random Forest тұрақты дискриминация бергенімен, сезімталдық пен F1 бойынша Gradient Boosting-тен төмен болды. Жұмыстың нәтижелері құрылымдалған клиникалық белгілер негізінде модель таңдауда метрикалардың кешенді талдауы қажет екенін көрсетеді; шектеулер ретінде деректердің теңгерімсіздігі және сыртқы валидацияның болмауы атап өтіледі.

Түйін сөздер: *бауыр қатерлі ісігі, құрылымдалған клиникалық деректер, машиналық оқыту, градиенттік бустинг, салыстырмалы талдау, ROC-AUC, сезімталдық, ерекшелік.*

Кіріспе

Бауыр қатерлі ісігі (бауыр ісігінің ең жиі түрі – гепатоцеллюлярлық карцинома, HCC) әлемдік деңгейде өзектілігі жоғары аурулардың қатарына жатады. Халықаралық онкологиялық деректерге сүйенсек, 2022 жылы дүние жүзінде бауыр қатерлі ісігінің шамамен 866 мыңға жуық жаңа жағдайы тіркеліп, оған байланысты 758 мыңнан астам өлім тіркелген [1]. Бауыр ісіктерінің

©Д.Ж. Шырынханова, И.Б. Карымсакова, Г. Жомартқызы, Д.О. Кожахметова, Т.А. Устинова, 2026

ішінде HCC үлесі басым: көптеген шолуларда оның барлық жағдайлардың шамамен 75-85% аралығын құрайтыны көрсетіледі [2]. Аурудың клиникалық ерекшелігі – оның жиі түрде созылмалы бауыр аурулары (вирустық гепатиттер, фиброз, цирроз және т.б.) аясында дамуы және ерте кезеңде клиникалық белгілердің айқын болмауы; бұл уақытылы анықтауды қиындатады. Осы себепті қауіп тобындағы пациенттерді жүйелі бақылау және тәуекел деңгейіне қарай жіктеу (risk stratification) ерте диагностиканың негізгі бағыттарының бірі ретінде қарастырылады [3].

Клиникалық тәжірибеде тәуекелді бағалау пациенттің жасы, жынысы, өмір салты, зертханалық және клиникалық көрсеткіштері сияқты құрылымдалған деректерге сүйенеді. Мұндай ақпарат медициналық мекемелерде күнделікті жиналатындықтан, оны талдай отырып бауыр қатерлі ісігінің ықтималдығын ертерек болжау мүмкін болады. Дәстүрлі клиникалық шкалалар – PAGE-B, aMAP – осы мақсатта жасалған, бірақ олар шектеулі санды параметрге сүйеніп, деректердегі күрделі өзара байланыстарды толық қамти алмауы мүмкін. Осы олқылықты жою үшін машиналық оқыту (ML) алгоритмдерін қолдану соңғы жылдары белсенді зерттелуде [4].

Халықаралық зерттеулер ML модельдерінің дәстүрлі тәсілдерден айтарлықтай озық нәтиже бере алатынын дәлелдеді. Осы бағыттағы негізгі жарияланымдарды жүйелі түрде салыстырсақ, модельдердің өнімділігі қолданылған деректер жиынтығына, популяция ерекшелігіне және валидация тәсіліне байланысты ауытқитыны байқалады. Дегенмен жалпы үрдіс анық: ML негізіндегі тәсілдер жеке биомаркерлер мен қарапайым клиникалық шкалаларға қарағанда жоғары дискриминациялық қабілет көрсетеді. Төменде осы бағыттағы негізгі зерттеулердің сипаттамалары жинақталған.

Кестедегі (кесте 1) зерттеулерді салыстырғанда, диагностикалық модельдер жоғары AUROC мәнін көрсетсе де (0.93-0.99), олардың көпшілігі тек бір ауруханның немесе бір дерекқордың деректерінде ғана тексерілген. Ал басқа елдердің пациенттерінде де тексерілген модельдер (Wong et al., Kim et al.) нәтижесі сәл төмен болғанымен, нақты тәжірибеде қолдануға жарамды екенін дәлелдеді. Сонымен қатар модельге кіретін белгілерді дұрыс таңдау болжам дәлдігін айтарлықтай арттыратыны байқалды. Осыны ескере отырып, біздің зерттеуімізде бес алгоритм бірдей шарттарда салыстырылып, нәтижелер бірнеше өлшем арқылы бағаланды.

Кесте 1 – Бауыр қатерлі ісігін анықтауда жоғары нәтиже көрсеткен МО модельдері

Автор	Модель	AUROC	Сезім-талдық	Популяция
Wong G. et al., 2022 [5]	Ridge Regression, Random Forest	0.844 / 0.837	90.0%	124 006 пациент, Гонконг, B/C гепатит
Kim H.Y. et al.,2021 [6]	Gradient Boosting Machine (GBM)	0.79-0.81	–	13 508 пациент, Корея және Батыс орталықтары, B гепатит
Sato M. et al.,2019 [7]	Gradient Boosting	0.940	93.3%	1 582 пациент, Токио, B/C гепатит
Hashem S. et al.,2020 [8]	Alternating Decision Tree (ADTree)	0.955-0.99	86.3-91.8%	4 423 пациент, Египет, C гепатит
Mostafa G. et al.,2024 [9]	SVM, Naive Bayes, Neural Network	0.932-0.993	89.2%	377 пациент, TCGA дерекқоры
Zhang Y. et al.,2025 [10]	Artificial Neural Network (ANN)	0.82-0.85	–	808 пациент, Пекин; ерте сатыдағы ГЦК
Liao H. et al. ,2020[11]	Random Forest (гистопатология)	0.886-0.988	–	TCGA + Батыс Қытай ауруханасы
Morshid A. et al.,2019 [12]	Random Forest (КТ радиомикасы)	0.73	–	105 пациент, MD Anderson, АҚШ
Johnson P.J. et al.,2024[13]	Random Forest (GALAD-RF)	0.91	–	3 473 пациент, Жапония, бақылау бағдарламасы

Ескерту: AUROC – қисық астындағы аудан; «–» – зерттеуде көрсетілмеген; ГЦК – гепатоцеллюлярлық карцинома; TACE – транскатетерлік артериялық химоэмболизация.

Зерттеу әдістері

Зерттеуде Kaggle платформасынан алынған ашық қолжетімді деректер жиынтығы пайдаланылды.[14] Онда 5000 пациентті қамтиды. Мақсатты айналымы- Liver_cancer (0-ауру жоқ, 1- ауру бар). Ісік жоқ тобы – 78,22% , ісік бар тобы – 21,78% құрайды,

Зерттеуде қолданылған кіріс айнымалыларға пациенттің жасы, дене салмағының индексі, В және С вирустық гепатиттерінің болуы, бауыр функциясының интегралды көрсеткіші, альфа-фетопротеин деңгейі, бауыр циррозының анамнезі, онкологиялық аурулардың отбасылық анамнезі және қант диабетінің болуы жатады. Аталған айнымалылардың сипаттамасы, типі және мәндер диапазоны (кесте 2) толық көрсетілген.

Кесте 2 – Зерттеуде қолданылған кіріс айнымалылардың сипаттамасы

Айнымалы атауы	Сипаттамасы	Типі	Мәндер диапазоны / кодталуы
Age	Пациенттің жасы	Сандық	30 – 84 жас
BMI	Дене салмағының индексі	Сандық	8.1 – 43.7
Hepatitis B	В гепатитінің болуы	Категориялық (бинарлы)	0 – жоқ, 1 – бар
Hepatitis C	С гепатитінің болуы	Категориялық (бинарлы)	0 – жоқ, 1 – бар
Liver function score	Бауыр функциясының интегралды көрсеткіші	Сандық	5.5 – 115.7
Alpha-fetoprotein (AFP)	Альфа-фетопротеин деңгейі	Сандық	0.0 – 136.8
Cirrhosis history	Бауыр циррозының анамнезі	Категориялық (бинарлы)	0 – жоқ, 1 – бар
Family history of cancer	Онкологиялық аурулардың отбасылық анамнезі	Категориялық (бинарлы)	0 – жоқ, 1 – бар
Diabetes	Қант диабетінің болуы	Категориялық (бинарлы)	0 – жоқ, 1 – бар
Target (Liver cancer)	Бауыр қатерлі ісігінің болуы	Бинарлы мақсатты айнымалы	0 – жоқ, 1 – бар

Деректерді модельдерге беру алдында бірнеше өңдеу қадамы орындалды. Алдымен жиынтықтың толықтығы тексерілді- жоғалған міндер анықталмады. Сандық айнымалылар (жасы, ИДС,AFP, бауыр функциясы) стандарттау арқылы нормаланды. Әрбір белгінің орташа мәні 0-ге, стандартты ауытқуы-1-ге келтірілді. Бұл қадам әсіресе қашықтыққа сезімтал алгоритмдер үшін – kNN мен SVM аса маңызды себебі масштаб айырмасы болжам сапасын бұрмалауы мүмкін. Категориялық белгілер бастапқыда бинарлы форматта берілгендіктен қосымша кодтауды қажет етпеді. Деректер 70-те 30 қатынасында оқу және тест жиынтықтарына бөлінді.

Салыстырмалы талдауға жұмыс принциптері әртүрлі бес модель енгізілді. Logistic Regression – ең қарапайым және түсінікті базалық модель, нәтижені ықтималдық түрінде береді; зерттеуде қалған модельдермен салыстыру үшін бастапқы эталон ретінде алынды. SVM (тірек векторлар әдісі) – деректерді кеңістікте ең оңтайлы шекара арқылы бөлетін модель; бұл жерде RBF ядросы қолданылды, себебі ол сызықтық емес, күрделі байланыстарды да дәл ажырата алады. kNN (k ең жақын көршілер) – жаңа пациентті оған ең ұқсас 5 нүктенің көпшілігіне қарап жіктейтін алгоритм; қарапайым болғанымен деректер құрылымына өте сезімтал. Random Forest – 200 шешім ағашының дауысын біріктіретін ансамбльдік модель; артық үйрену қаупі аз, нәтижесі тұрақты. Gradient Boosting – алдыңғы модельдің қателерін келесісі түзете отырып, кезең-кезеңімен жетілдіретін ансамбль; күрделі байланыстарды меңгеруде ең тиімді алгоритм ретінде танылады. Барлық бес модель бірдей деректерде және бірдей шарттарда іске қосылды, бұл нәтижелерді тікелей салыстыруға мүмкіндік берді.

Класстар теңгерімсіз болғандықтан тек Accuracy-мен шектелу жеткіліксіз. Сол себепті нәтижелер алты метрика арқылы бағаланды: ROC-AUC – кластарды ажырату қабілетінің жалпы өлшемі; Accuracy – дұрыс жіктелген жағдайлардың жалпы үлесі; Precision – «ауру бар» деп болжанғандардың ішіндегі нақты ауру жағдайларының үлесі; Reremember/Sensitive – нақты ауру жағдайларын дұрыс анықтау қабілеті; Specificity – ауру жоқ жағдайларды дұрыс ажырату қабілеті; F1-score – нақтылық пен сезімталдықтың теңгерімді орташасы. Медициналық диагностикада жалған теріс нәтиженің – яғни ауру бар пациентті сау деп жіберіп

алудың – салдары ауыр болуы мүмкін, сондықтан Sensitivity мен F1-ге ерекше назар аударылды.

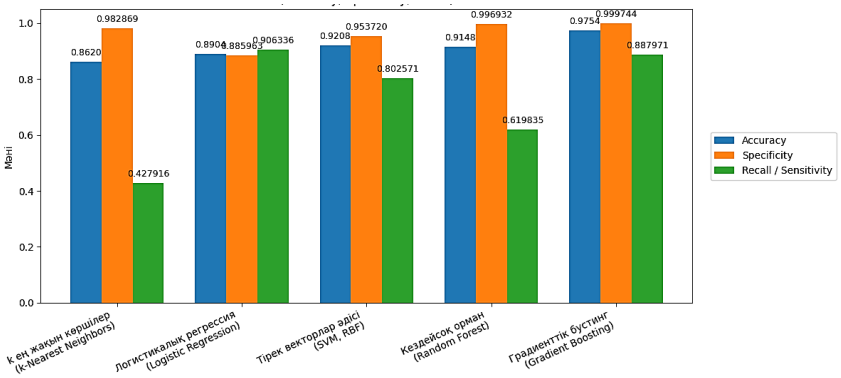
Зерттеу нәтижелері

Барлық бес модель бірдей алдын ала өңделген деректер жиынтығында оқытылып, бірдей тест үлгісінде бағаланды. Модельдің негізгі диагностикалық көрсеткіштері 3- кестеде жинақталған.

Кесте 3 – Машиналық оқыту модельдерінің диагностикалық нәтижелерін салыстыру

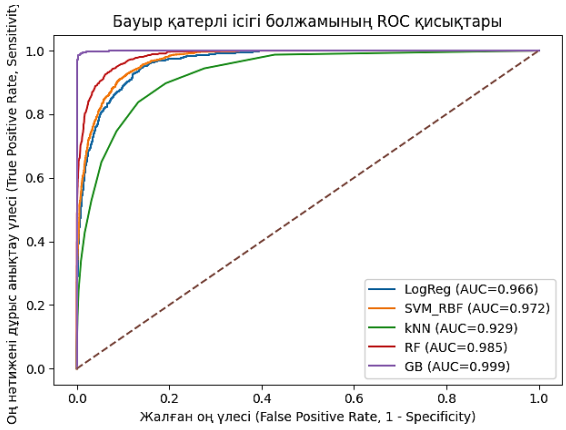
Модель	ROC_AUC	Accuracy	Precision	Recall (Sensitivity)	Specificity	F1
k-Nearest Neighbors	0.928641	0.8620	0.874296	0.427916	0.982869	0.574599
Logistic Regression	0.965860	0.8904	0.688765	0.906336	0.885963	0.782712
SVM (RBF)	0.971744	0.9208	0.828436	0.802571	0.953720	0.815299
Random Forest	0.984706	0.9148	0.982533	0.619835	0.996932	0.760135
Gradient Boosting	0.999498	0.9754	0.998967	0.887971	0.999744	0.940204

Модельдің Accuracy, Sensitivity және Specificity бойынша визуалды салыстыруы сурет 1 – берілген.



Сурет 1 – Бауыр қатерлі ісігін болжау модельдерінің Accuracy, Specificity және Recall метрикалары бойынша салыстырмалы талдауы

Дискриминациялық қабілетті бағалау үшін барлық модельдердің ROC қисықтары тұрғызылды (2-сурет). Gradient Boosting моделінің практикалық қолдану мүмкіндігін көрсету мақсатында тест жиынтығынан кездейсоқ таңдалған бес пациент үшін қатерлі ісіктің даму ықтималдығы жеке есептелді.



Сурет 2 – ML модельдерінің ROC қисықтары

Зерттеу нәтижелерін талқылау

Салыстырмалы талдау нәтижесінде модельдер арасында диагностикалық тиімділік тұрғысынан біраз айырмашылықтар анықталды. kNN алгоритмі сезімталдық тұрғысынан

барлық модельдер ішінде ең төменгі нәтиже көрсетті. Бұл нақты науқастардың жартысынан астамының анықталмай өтуіне алып келеді. Клиникалық скрининг контексінде жалған теріс нәтиже – науқасты сау деп жіктеу ауыр медициналық салдарға апарады. Сол себепті бұл алгоритмнің диагностикалық құрал ретіндегі мүмкіндіктері шектеулі деп бағаланады.

Logistic Regression нақты ауру жағдайларының басым бөлігін дұрыс анықтағанымен нақтылық көрсеткішінің төмендігі жалған оң нәтижелердің жиілігін арттырады. Бұл оны бастапқы сатысында пайдалы етсе де, дербес диагностикалық шешім ретінде қолдану үшін қосымша растау қажеттілігін туындатады.

SVM (RBF) моделі сезімталдық пен ерекшелік арасында тепе-теңдік сақтады, бұл оны клиникалық жағдайда тұрақты нұсқа ретінде қарастыруға мүмкіндік береді. Бұл алгоритм жоғары нақтылық пен ерекшелік көрсеткенімен, сезімталдығының салыстырмалы төмендігі нақты ауру жағдайларының үлкен бөлігін өткізіп жіберуіне себеп болды – бұл скрининг мақсатында маңызды кемшілік болып табылады.

Gradient Boosting моделі барлық алты метрика бойынша үздік нәтиже берді. Бұл нәтиже халықаралық зерттеулермен үндеседі: Sato M. et al. [7] осы алгоритм үшін AUROC=0.940, сезімталдық 93.3% алса, Hashem S. et al. [8] балама ансамбльдік модельде AUROC 0.955-0.99 аралығын тіркеген. Алайда біздің зерттеудегі өте жоғары мәндер деректер жиынтығының синтетикалық сипатымен және шектеулі белгілер кеңістігімен түсіндіріледі – нақты клиникалық популяцияда көрсеткіштердің төмендеуі ықтимал, сондықтан сыртқы валидация қажет.

Қорытынды

Бұл жұмыста Kaggle платформасынан алынған ашық клиникалық деректер жиынтығы (N=5000) негізінде бауыр қатерлі ісігін болжауға арналған бес машиналық оқыту алгоритмі бірыңғай эксперименттік шарттарда салыстырылды. Нәтижелер модель таңдауының диагностикалық нәтижеге тікелей әсер ететінін айқын көрсетті.

Жалпы көрсеткіштер бойынша Gradient Boosting үздік нәтиже берді: ROC-AUC=0.9995, Дәлдік=0.9754, F1=0.940. Ансамбльдік алгоритмдер қателерді кезең-кезеңмен азайта отырып үйренетіндіктен, күрделі клиникалық деректерде жоғары тиімділік көрсетеді. Халықаралық зерттеулердің қорытындылары да осыны растайды [4, 15, 16].

Дегенмен барлық жағдайда Gradient Boosting ең дұрыс таңдау емес. Егер скрининг мақсатында ауруды жіберіп алмау басты міндет болса, Logistic Regression моделінің жоғары сезімталдығы (0.906) назар аударады. Ал kNN моделі сезімталдық бойынша (0.428) барлық алгоритмдерден айтарлықтай артта қалды – бауыр қатерлі ісігі сияқты жауапты диагностикада науқастардың жартысынан астамын анықтамай өткізу қолайсыз нәтиже болғандықтан, kNN осы мақсатқа жарамсыз деп есептеледі.

Зерттеудің шектеулерін де атап өту қажет. Деректер жиынтығында сыныптар арасындағы үлестік алшақтық бар – 78.22% және 21.78%, бұл кейбір модельдердің көпшілік топқа бейімделуіне әкелуі мүмкін. Деректердің синтетикалық сипатына байланысты Gradient Boosting-тің жоғары мәндері нақты клиникалық жағдайда төмендеуі ықтимал. Барлық модель тек ішкі тест деректерінде тексерілді – сыртқы валидация жүргізілмеді.

Болашақ зерттеулерде нақты аурухана деректерінде сыртқы валидация жүргізу, SHAP немесе LIME әдістері арқылы модель шешімдерінің түсіндірілімділігін арттыру, сондай-ақ SMOTE сияқты теңестіру әдістерін қолдану арқылы модельдің клиникалық практикаға жарамдылығын нығайту ұсынылады.

Жалпы алғанда, зерттеу нәтижелері машиналық оқыту алгоритмдерінің, әсіресе ансамбльдік әдістердің, бауыр қатерлі ісігін ерте болжауда практикалық қолданысқа жарамды екенін дәлелдейді. Алынған нәтижелер осы бағыттағы одан әрі клиникалық зерттеулер үшін негіз бола алады.

Әдебиеттер тізімі

1. Global Cancer Observatory (GCO). Liver and intrahepatic bile ducts: Fact sheet. GLOBOCAN 2022. – Lyon: International Agency for Research on Cancer (IARC), 2024. https://gco.iarc.who.int/media/globocan/factsheets/cancers/11-liver-and-intrahepatic-bile-ducts-fact-sheet.pdf (accessed date: 21.02.2026)
2. Hepatocellular Carcinoma: A Comprehensive Review / N. Amin et al // Diseases. – 2025. – Vol. 13, № 7. – Art. 207. https://doi.org/10.3390/diseases13070207.

3. European Association for the Study of the Liver. EASL Clinical Practice Guidelines: Management of hepatocellular carcinoma // Journal of Hepatology. – 2018. – Vol. 69, № 1. – P. 182-236. https://doi.org/10.1016/j.jhep.2018.03.019.
4. Current Status and Analysis of Machine Learning in Hepatocellular Carcinoma / S. Feng et al // Journal of Clinical and Translational Hepatology. – 2023. – Vol. 11, № 5. – P. 1184-1191. https://doi.org/10.14218/JCTH.2022.00077S.
5. Novel machine learning models outperform risk scores in predicting hepatocellular carcinoma in patients with chronic viral hepatitis / G.L.-H. Wong et al // JHEP Reports. – 2022. – Vol. 4, № 3. – Art. 100441. https://doi.org/10.1016/j.jhepr.2022.100441.
6. An artificial intelligence model to predict hepatocellular carcinoma risk in Korean and Caucasian patients with chronic hepatitis B / H.Y. Kim et al // Journal of Hepatology. – 2022. – Vol. 76, № 2. – P. 311-318. https://doi.org/10.1016/j.jhep.2021.09.025.
7. Machine-learning Approach for the Development of a Novel Predictive Model for the Diagnosis of Hepatocellular Carcinoma / M. Sato et al // Scientific Reports. – 2019. – Vol. 9, № 1. – Art. 7704. https://doi.org/10.1038/s41598-019-44022-8.
8. Machine Learning Prediction Models for Diagnosing Hepatocellular Carcinoma with HCV-related Chronic Liver Disease / S. Hashem et al // Computer Methods and Programs in Biomedicine. – 2020. – Vol. 196. – Art. 105551. https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2020.105551.
9. Feature reduction for hepatocellular carcinoma prediction using machine learning algorithms / G. Mostafa et al // Journal of Big Data. – 2024. – Vol. 11. – Art. 88. https://doi.org/10.1186/s40537-024-00944-3.
10. Machine learning model using immune indicators to predict outcomes in early liver cancer / Y. Zhang et al // World Journal of Gastroenterology. – 2025. – Vol. 31, № 5. – Art. 101722. https://doi.org/10.3748/wjg.v31.i5.101722.
11. Deep learning-based classification and mutation prediction from histopathological images of hepatocellular carcinoma / H. Liao et al // Clinical and Translational Medicine. – 2020. – Vol. 10, № 2. – Art. e102. https://doi.org/10.1002/ctm2.102.
12. A machine-learning model to predict hepatocellular carcinoma response to transcatheter arterial chemoembolization / A. Morshid et al // Radiology: Artificial Intelligence. – 2019. – Vol. 1, № 5. – Art. e180021. https://doi.org/10.1148/ryai.2019180021.
13. Serologic Detection of Hepatocellular Carcinoma: Application of Machine Learning and Implications for Diagnostic Models / P.J. Johnson et al // JCO Clinical Cancer Informatics. – 2024. – Vol. 8. – Art. e2300199. https://doi.org/10.1200/CCI.23.00199.
14. miadul. Predict Liver Cancer from & Clinical Features [Electronic resource] – Kaggle Datasets, 2024. – URL: https://www.kaggle.com/datasets/miadul/predict-liver-cancer-from-and-clinical-features (accessed date: 20.02.2026).
15. Reporting of prognostic clinical prediction models based on machine learning methods in oncology: a systematic review / P. Dhiman et al // Diagnostic and Prognostic Research. – 2022. – Vol. 6, № 1. – Art. 13. https://doi.org/10.1186/s41512-022-00126-w.
16. Development of an Early Lung Cancer Diagnosis Method Based on a Neural Network / I. Karymsakova et al // Computers. – 2025. – Vol. 14. – Art. 397. https://doi.org/10.3390/computers14090397.

Д.Ж. Шырынханова[1], И.Б. Карымсакова[2*], Г. Жомартқызы[1], Д.О. Кожахметова[2], Т.А. Устинова[2]
[1]Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева,
070004, Республика Казахстан, ул. Серикбаева, 19, г. Усть-Каменогорск
[2]Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А
[*]e-mail: karymsakova.indira@mail.ru

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАКА ПЕЧЕНИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛЕЙ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ (ML)

На основе открытого набора структурированных клинических данных выполнена сравнительная оценка моделей машинного обучения для прогнозирования риска рака печени. В исследовании использован датасет платформы Kaggle (N=5000): целевая переменная Liver_cancer, 13 признаков (9 числовых, 4 категориальных), классы несбалансированы (0: 78,22%,

1: 21,78%). Этапы предобработки данных, обучения моделей и оценивания выполнены в рамках единого экспериментального протокола. Числовые переменные нормализованы посредством стандартизации; категориальные переменные закодированы в бинарном формате.

В сравнительный анализ включены логистическая регрессия (Logistic Regression), метод опорных векторов (Support Vector Machine с RBF-ядром), k ближайших соседей (k-Nearest Neighbors), случайный лес (Random Forest) и градиентный бустинг (Gradient Boosting). Все модели оценивались по метрикам точности (accuracy), прецизионности (precision), чувствительности (recall/sensitivity), специфичности (specificity), F1-меры (F1-score) и площади под ROC-кривой (ROC-AUC).

По результатам эксперимента градиентный бустинг (Gradient Boosting) продемонстрировал наивысшую совокупную эффективность: ROC-AUC=0.999498, Accuracy=0.9754, Precision=0.998967, Sensitivity=0.887971, Specificity=0.999744, F1=0.940204. Хотя SVM (RBF) и Random Forest обеспечивали стабильную дискриминацию, по чувствительности и F1 они уступали Gradient Boosting. Полученные результаты показывают, что при выборе модели на основе структурированных клинических признаков необходим комплексный анализ метрик; в качестве ограничений отмечены несбалансированность классов и отсутствие внешней валидации.

Ключевые слова: *рак печени, структурированные клинические данные, машинное обучение, градиентный бустинг, сравнительный анализ, ROC-AUC, чувствительность, специфичность.*

D.Zh. Shyrynkhanova[1], I.B. Karymsakova[2]*, G. Zhomartkyzy[1], D.O. Kozhakhmetova[2], T.A. Ustinova[2]

[1]D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University,
070004, Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk, 19 Serikbayeva Street,
[2]Shakarim University,
071412, Republic of Kazakhstan, Semey, 20 A Glinka Street
*e-mail: karymsakova.indira@mail.ru

LIVER CANCER PREDICTION USING MACHINE LEARNING (ML) MODELS

A comparative evaluation of machine learning models for predicting liver cancer risk was performed using an open structured clinical dataset. A Kaggle dataset was used in the study (N=5000): target variable Liver_cancer, 13 features (9 numerical, 4 categorical), with class imbalance (0: 78.22%, 1: 21.78%). Data preprocessing, model training and evaluation were carried out within a unified experimental protocol. Numerical variables were normalized via standardization; categorical variables were encoded in binary format.

The comparative analysis included Logistic Regression, Support Vector Machine with an RBF kernel, k-Nearest Neighbors, Random Forest, and Gradient Boosting. All models were evaluated using accuracy, precision, recall (sensitivity), specificity, F1-score, and the area under the ROC curve (ROC-AUC).

Gradient Boosting achieved the highest overall performance: ROC-AUC=0.999498, Accuracy=0.9754, Precision=0.998967, Sensitivity=0.887971, Specificity=0.999744, F1=0.940204. Although SVM (RBF) and Random Forest demonstrated stable discrimination, they underperformed compared to Gradient Boosting in terms of sensitivity and F1. The results indicate that selecting a model based on structured clinical features requires a comprehensive multi-metric assessment; key limitations include class imbalance and the absence of external validation.

Key words: *liver cancer, structured clinical data, machine learning, gradient boosting, comparative analysis, ROC-AUC, sensitivity, specificity.*

Авторлар туралы мәліметтер

Динара Жаксылыковна Шырынханова – Цифрлық технологиялар және жасанды интеллект мектебінің докторанты, Д. Серикбаев атындағы Шығыс Қазақстан Техникалық Университеті, Өскемен қаласы, Қазақстан; e-mail: d.shyrynkhanova@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-5311-1221.

Индира Бекеновна Карымсакова* – «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасының PhD докторы, Шәкәрім университеті, Семей қаласы, Қазақстан; e-mail: karymsakova.indira@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1496-3188.

Гүльназ Жомартқызы – Цифрлық технологиялар және жасанды интеллект мектебінің PhD докторы, қауымдастырылған профессоры, Д. Серикбаев атындағы Шығыс Қазақстан Техникалық Университеті, Өскемен қаласы, Қазақстан; e-mail: GZhomartkyzy@edu.ektu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1465-3451.

Динара Ошановна Кожахметова – «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасының PhD докторы, қауымдастырылған профессоры, Шәкәрім университеті, Семей қаласы, Қазақстан; e-mail: d.kojahmetova@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4327-3899.

Татьяна Анатольевна Устинова – «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасының аға оқытушысы, Шәкәрім университеті, Семей қаласы, Қазақстан; e-mail: ustinova-t-a@yandex.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-8244-6043.

Сведения об авторах

Динара Жаксылыковна Шырынханова – докторант Школы цифровых технологий и искусственного интеллекта, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан; e-mail: d.shyrynkhanova@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-5311-1221.

Индира Бекеновна Карымсакова* – PhD доктор кафедры «Автоматизация и информационные технологии», Шәкәрім университет, г. Семей, Казахстан; e-mail: karymsakova.indira@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1496-3188.

Гүльназ Жомартқызы – PhD доктор, ассоциированный профессор Школы цифровых технологий и искусственного интеллекта, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан; e-mail: GZhomartkyzy@edu.ektu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1465-3451.

Динара Ошановна Кожахметова – PhD доктор, ассоциированный профессор кафедры «Автоматизация и информационные технологии», Шәкәрім Университет, г. Семей, Казахстан; e-mail: d.kojahmetova@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4327-3899.

Татьяна Анатольевна Устинова – старший преподаватель кафедры «Автоматизация и информационные технологии», Шәкәрім университет, г. Семей, Казахстан; e-mail: ustinova-t-a@yandex.ru№ ORCID: https://orcid.org/0009-0001-8244-6043.

Information about the authors

Dinara Zhaksylykovna Shyrynkhanova – Doctoral (PhD) student, School of Digital Technologies and Artificial Intelligence, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; e-mail: d.shyrynkhanova@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-5311-1221.

Indira Bekenovna Karymsakova* – PhD, Department of Automation and Information Technologies, Shakarim University, Semey, Kazakhstan; e-mail: karymsakova.indira@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1496-3188.

Gulnaz Zhomartkyzy – PhD, Associate Professor, School of Digital Technologies and Artificial Intelligence, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; e-mail: GZhomartkyzy@edu.ektu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1465-3451.

Dinara Oshanovna Kozhakhmetova – PhD, Associate Professor, Department of Automation and Information Technologies, Shakarim University, Semey, Kazakhstan; e-mail: d.kojahmetova@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4327-3899.

Tatyana Anatolyevna Ustinova – Senior Lecturer of the Department of Automation and Information Technologies, Shakarim University, Semey, Kazakhstan; e-mail: ustinova-t-a@yandex.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-8244-6043.

Редакцияға енуі 30.03.2026
Өңдеуден кейін түсуі 14.05.2026
Жариялауға қабылданды 18.05.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-10

ҒТАХР: 28.15.19

CC 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

КОММУТАЦИЯЛАНАТЫН КЕШІГУІ БАР СЫЗЫҚТЫ ЕМЕС ЖҮЙЕЛЕРДІҢ ТҰРАҚТЫЛЫҒЫ

Аннотация: *Бұл жұмыста уақыт бойынша кешігуі бар коммутацияланатын сызықты емес жүйелердің тұрақтылығы мәселесі қарастырылады. Қарастырылатын жүйе динамикасы бірнеше ішкі жүйелер арасында ауысуды сипаттайтын коммутация сигналы арқылы анықталады және уақыттық кешігу әсері ескеріледі. Коммутация сигналы ерікті түрде өзгеретін жағдайда жүйенің*

©Ә.Ж. Жамбулатова, Қ. Әлімхан, 2026

орнықтылығын қамтамасыз ету басқару теориясындағы күрделі әрі өзекті ғылыми мәселелердің бірі болып табылады. Зерттеу барысында Ляпунов-Красовский функционалына негізделген әдіс қолданылып, кешігуі бар коммутацияланатын сызықты емес жүйелер үшін тұрақтылықтың жеткілікті шарттары алынды. Ұсынылған тәсіл жүйенің сызықты емес қасиеттерін, уақыттық кешігу мүшелерін және коммутация әсерін бір уақытта ескеруге мүмкіндік береді, бұл классикалық нәтижелерді жалпылауға жол ашады. Сонымен қатар, жүйені шекті уақытта тұрақтандыру шарттары зерттеліп, сәйкес күйлік кері байланыс басқару заңы ұсынылды. Бұл басқару заңы жүйе күйлерін шектеулі уақыт ішінде нөлдік тепе-теңдікке жеткізуді қамтамасыз етеді және асимптотикалық тұрақтылықпен салыстырғанда жылдам тұрақтануды қамтамасыз етеді. Алынған теориялық нәтижелер сандық модельдеу арқылы тексерілді. Модельдеу нәтижелері жүйе күй айнымалыларының коммутация мен кешігу әсеріне қарамастан нөлдік тепе-теңдікке ұмтылатынын көрсетті. Сонымен қатар, коммутация сигналының бірнеше рет өзгеруі жүйенің орнықтылығына кері әсер етпейтіні байқалды. Зерттеу нәтижелері ұсынылған әдістің тиімділігін дәлелдей отырып, оны кешігуі бар коммутацияланатын сызықты емес жүйелерді басқару есептерінде қолдануға болатындығын көрсетеді.

***Түйін сөздер**: коммутацияланатын жүйе, сызықты емес жүйе, уақыт бойынша кешігу, тұрақтылық, шекті уақыттағы тұрақтандыру, Ляпунов-Красовский функционалы, коммутация сигналы, басқару.*

Кіріспе

Коммутацияланатын жүйелер басқару теориясының маңызды бағыттарының бірі болып табылады Мұндай жүйелер бірнеше режимдерден тұрып, коммутация сигналы арқылы сипатталады. Коммутацияланатын жүйелер әртүрлі инженерлік салаларда кеңінен қолданылады [1-3]. Сондықтан олардың тұрақтылығын талдау маңызды ғылыми мәселе болып табылады.

Коммутацияланатын жүйелерді зерттеуге қызығушылық олардың әртүрлі режимдер арасында ауысуымен және кейбір жүйелерді тек коммутация арқылы тұрақтандыру мүмкіндігімен түсіндіріледі. Соңғы жылдары коммутация негізіндегі басқару әдістері кеңінен зерттелуде [4-6]. Әдебиеттерде коммутацияланатын жүйелердің тұрақтылығына қатысты үш негізгі мәселе қарастырылады: ерікті коммутация, шектеулі коммутация және тұрақтандырушы заңдарды құру [1,3]. Біріншісі – кез келген коммутациялық сигнал үшін жүйенің асимптотикалық тұрақтылығын қамтамасыз ететін шарттарды анықтау. Екіншісі – коммутация сигналдарының белгілі бір кластары үшін тұрақтылықты зерттеу, яғни коммутация жылдамдығына немесе құрылымына қойылатын шектеулер арқылы жүйенің орнықтылығын қамтамасыз ету. Үшіншісі – жүйені тұрақтандыратын коммутациялық заңдарды құру, бұл басқару жүйесін жобалау тұрғысынан ерекше маңызды болып табылады.

Классикалық нәтижелер барлық ішкі жүйелердің тұрақтылығы жалпы жүйе тұрақтылығын қамтамасыз етпейтінін көрсетеді [4-7]. Басқаша айтқанда, тұрақты ішкі жүйелердің өзара дұрыс емес коммутациясы жүйенің тұрақсыздығына алып келуі мүмкін. Сондықтан ортақ Ляпунов функциясы және кешігуге байланысты әдістер кеңінен зерттелген [2, 4-8]. Сонымен қатар, кейбір жағдайларда барлық ішкі жүйелер тұрақсыз болса да, арнайы құрылған коммутациялық заң арқылы бүкіл жүйені тұрақтандыру мүмкіндігі бар екендігі көрсетілген [4, 9, 10]. Сонымен қатар, сызықты емес және уақыт бойынша кешігуі бар коммутацияланатын жүйелер үшін тұрақтылықты қамтамасыз ету мәселесі толық шешімін тапқан жоқ [3, 11]. Ерікті коммутация жағдайында шекті уақыттағы тұрақтандыру өзекті мәселе болып табылады [11-15]. Бұл бағытта Ляпунов-Красовский функционалдары және күйлік кері байланыс әдістері қолданылады.

Бұл жұмыстың мақсаты – кешігуі бар коммутацияланатын сызықты емес жүйелердің тұрақтылығын зерттеу және оларды шекті уақытта тұрақтандыру әдісін құру. Жұмыста ерікті коммутация жағдайында жүйенің тұрақтылығын қамтамасыз ететін жаңа шарттар ұсынылады және ортақ Ляпунов функциясына негізделген басқару әдісі қарастырылады.

Зерттеу шарттары мен әдістері

Бұл жұмыста Ляпунов-Красовский функционалына негізделген әдіс қолданылды. Бұл тәсіл кешігу әсерін ескеруге мүмкіндік береді және жүйенің орнықтылығын зерттеуде тиімді құрал болып табылады.

Коммутация сигналы ерікті түрде өзгеретін бөлшектік-тұрақты функция ретінде қарастырылады. Кешігу функциясы шектелген және үздіксіз деп алынды.

Жүйенің тұрақтылығын талдау үшін ортақ Ляпунов функциясы қолданылып, функционалдың туындысы арқылы жеткілікті шарттар алынған. Сонымен қатар, жүйені шекті уақытта тұрақтандыру үшін күйлік кері байланыс басқару заңы ұсынылды.

Зерттеу нәтижелері

Осы жұмыста уақыт бойынша кешігуі бар коммутацияланатын сызықты емес жүйе келесі түрде қарастырылады:

$$\dot{x}(t) = f_{\sigma(t)}\big(x(t), x(t-\tau(t))\big), \quad t \geq 0,$$

Мұндағы $x(t) \in \mathbb{R}^n$ – жүйенің күй векторы, $\sigma(t):[0,\infty) \to \mathrm{P} = \{1,2,\ldots,m\}$ – коммутация сигналы, $f_p(\cdot,\cdot),\ p \in \mathrm{P}$ – жеткілікті тегіс сызықты емес векторлық функциялар, $\tau(t) \in [0,\overline{\tau}]$ – шектелген уақыттық кешігу.

Коммутация сигналы $\sigma(t)$ бөлшектік-тұрақты функция болып табылады және жүйе динамикасының әртүрлі режимдер арасында ауысуын сипаттайды. Әрбір $p \in \mathrm{P}$ үшін ішкі жүйе келесі түрде беріледі:

$$\dot{x}(t) = f_p\big(x(t), x(t-\tau(t))\big).$$

Жүйенің бастапқы шарттары келесі түрде беріледі:

$$x(t) = \phi(t), \quad t \in [-\overline{\tau}, 0],$$

Мұндағы $\phi(\cdot)$ – берілген үздіксіз бастапқы функция. Жұмыста келесі негізгі болжамдар қабылданады:

Болжам 1. Әрбір $f_p(x,y)$ функциясы аргументтері бойынша локальды Липшиц шартын қанағаттандырады, яғни жүйе шешімінің бар болуы мен бірегейлігі қамтамасыз етіледі.

Болжам 2. Кешігу функциясы $\tau(t)$ шектелген және үздіксіз, яғни $0 \leq \tau(t) \leq \overline{\tau}$.

Болжам 3. Коммутация сигналы $\sigma(t)$ ерікті, яғни алдын ала берілген шектеулерсіз таңдалады.

Осы жұмыстың негізгі мақсаты – жоғарыда берілген жүйе үшін тепе-теңдік күй $x = 0$-дің тұрақтылығын зерттеу және оны шекті уақытта тұрақтандыру шарттарын алу болып табылады.

Атап айтқанда, келесі мәселелер қарастырылады:

– ерікті коммутация жағдайында жүйенің тұрақтылығын қамтамасыз ететін жеткілікті шарттарды анықтау;

– кешігуі бар жүйелер үшін Ляпунов-Красовский функционалы негізінде тұрақтылықты талдау;

– жүйені шекті уақытта тұрақтандыратын күйлік кері байланыс басқару заңын құру.

Жоғарыда қойылған есепті шешу үшін ортақ Ляпунов функциясы және уақыттық кешігуді ескеретін функционалдық әдістер қолданылады. Алынған нәтижелер коммутацияланатын сызықты емес жүйелердің тұрақтылығын талдауда және басқару заңдарын жобалауда қолданылуы мүмкін.

Теорема 1. Қарастырылып отырған коммутацияланатын сызықты емес жүйе

$$\dot{x}(t) = f_{\sigma(t)}\big(x(t), x(t-\tau(t))\big)$$

үшін жоғарыда берілген Болжамдар 1-3 орындалсын. Егер келесі шарттар орындалса:

1. Әрбір $p \in \mathrm{P}$ үшін үздіксіз дифференциалданатын функция

$$V(x): \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}_+$$

бар болып, ол оң анықталған және радиалды шектелмеген;

2. Кейбір $c_1, c_2 > 0$ тұрақтылары үшін

$$c_1 \| x \|^2 \leq V(x) \leq c_2 \| x \|^2;$$

3. Жүйе траекториялары бойымен келесі теңсіздік орындалса:

$$\dot{V}(x(t)) \leq -\alpha V(x(t)) + \beta V(x(t-\tau(t)))$$

мұндағы $\alpha > \beta > 0$; онда жүйе кез келген коммутация сигналы $\sigma(t)$ үшін глобальды асимптотикалық тұрақты болады. Сонымен қатар, егер қосымша

$$\dot{V}(x(t)) \leq -kV^{\gamma}(x(t)), \quad 0 < \gamma < 1$$

шарты орындалса, онда жүйе шекті уақытта тұрақты болады.

Дәлелдеу. Ляпунов–Красовский әдісін қолданайық. Келесі функционалды қарастырамыз:

$$W(t) = V(x(t)) + \int_{t-\tau(t)}^{t} V(x(s))ds$$

Бұл функционал оң анықталған және шектелген, өйткені $V(x)$ оң анықталған.

Енді $W(t)$-ның туындысын есептейік:

$$\dot{W}(t) = \dot{V}(x(t)) + V(x(t)) - V(x(t-\tau(t)))(1-\dot{\tau}(t)).$$

$\dot{\tau}(t) \le 1$ екенін ескерсек, келесі бағалауды аламыз:

$$\dot{W}(t) \le \dot{V}(x(t)) + V(x(t)).$$

Шарт бойынша:

$$\dot{V}(x(t)) \le -\alpha V(x(t)) + \beta V(x(t-\tau(t))).$$

Осыны орнына қойсақ:

$$\dot{W}(t) \le -(\alpha - 1)V(x(t)) + \beta V(x(t-\tau(t))).$$

$\alpha > \beta$ болғандықтан, сәйкес тұрақтыларды таңдау арқылы

$$\dot{W}(t) \le -\delta W(t), \quad \delta > 0$$

түріндегі бағалауды алуға болады. Бұл теңсіздік Ляпунов теоремасы бойынша жүйенің глобальды асимптотикалық тұрақтылығын қамтамасыз етеді. Енді шекті уақыттағы тұрақтылықты қарастырайық. Егер

$$\dot{V}(x(t)) \le -kV^{\gamma}(x(t)), \quad 0 < \gamma < 1,$$

онда айнымалыларды бөлу арқылы:

$$\frac{dV}{V^{\gamma}} \le -kdt.$$

Интегралдап:

$$V^{1-\gamma}(t) \le V^{1-\gamma}(0) - k(1-\gamma)t.$$

Осыдан:

$$T \le \frac{V^{1-\gamma}(0)}{k(1-\gamma)}.$$

Яғни, жүйе шекті уақытта нөлге жетеді.

Бұл жұмыста кешігуі бар коммутацияланатын сызықты емес жүйелердің тұрақтылығы зерттеліп, негізгі теориялық нәтижелер алынды. Ляпунов-Красовский функционалы негізінде тұрақтылықтың жеткілікті шарттары алынды. Ұсынылған әдіс коммутация сигналы ерікті түрде өзгеретін жағдайда да жүйенің орнықтылығын талдауға мүмкіндік береді. Бұл нәтижелер коммутацияланатын жүйелер теориясындағы белгілі классикалық тұжырымдарды жалпылай отырып, кешігу әсерін ескеретін жаңа шарттарды ұсынады.

Жүйені шекті уақытта тұрақтандыру шарттары анықталды. Атап айтқанда, сызықты емес күйлік кері байланыс басқару заңы негізінде жүйе күйлерін нөлдік тепе-теңдікке шекті уақыт ішінде жеткізу мүмкіндігі көрсетілді. Бұл асимптотикалық тұрақтылықпен салыстырғанда жылдамырақ тұрақтануды қамтамасыз етеді.

Алынған теориялық нәтижелер сандық модельдеу арқылы расталды. Модельдеу нәтижелері жүйе күйлерінің нөлдік тепе-теңдікке ұмтылатынын көрсетті. Коммутация жүйе орнықтылығына кері әсер етпейді. Жалпы алғанда, ұсынылған әдіс уақыт бойынша кешігуі бар коммутацияланатын сызықты емес жүйелердің тұрақтылығын қамтамасыз етуде тиімді құрал болып табылады және практикалық қолданбаларда пайдалануға жарамды.

Ғылыми нәтижелерді талқылау

Алынған нәтижелер кешігуі бар коммутацияланатын жүйелердің тұрақтылығын талдауды кеңейтеді. Ұсынылған тәсіл кешігу мен коммутация әсерін бірге ескеруге мүмкіндік береді. Алынған теориялық шарттар классикалық нәтижелермен салыстырғанда жалпылама сипатқа ие, себебі олар коммутация сигналына алдын ала шектеулер қоймай-ақ жүйенің

орнықтылығын қамтамасыз етеді. Бұл әдістің практикалық маңыздылығын көрсетеді. Сонымен қатар, жүйені шекті уақытта тұрақтандыру шарттарының алынуы басқару сапасын жақсартуға мүмкіндік береді, өйткені жүйе күйлері шектеулі уақыт ішінде нөлдік тепе-теңдікке жеткізіледі.

Коммутацияланатын жүйелердің тұрақтылығын зерттеуде жиі қолданылатын әдістердің бірі – ортақ Ляпунов функциясын құру болып табылады. Алайда кешігуі бар жүйелерде бұл әдісті тікелей қолдану әрқашан мүмкін емес. Осы тұрғыдан алғанда, Ляпунов-Красовский функционалын қолдану кешігу әсерін ескеретін тиімді тәсіл ретінде қарастырылады. Модельдеу нәтижелері жүйенің орнықтылығын көрсетеді. Жүйе күйлері орнықты күйге келеді. Бұл ұсынылған басқару заңының практикалық маңыздылығын арттырады.

Сонымен бірге, ұсынылған әдістің кейбір шектеулері де бар. Атап айтқанда, алынған нәтижелер белгілі бір сызықты емес функциялар класы үшін орындалады және басқару параметрлерін дұрыс таңдауды талап етеді. Болашақ зерттеулерде бұл тәсілді белгісіз параметрлері бар және жоғары өлшемді жүйелерге жалпылау маңызды бағыттардың бірі болып табылады.

Сандық мысал. Ұсынылған нәтижелердің тиімділігін көрсету үшін уақыт бойынша кешігуі бар коммутацияланатын сызықты емес жүйенің келесі моделі қарастырылады:

$$\dot{x}_1(t) = x_2(t),$$

$$\dot{x}_2(t) = -a_{\sigma(t)}x_1(t) - b_{\sigma(t)}x_2(t) - c_{\sigma(t)}x_1(t-\tau) - k_1 \mid x_1(t) \mid^{\gamma} \operatorname{sgn}(x_1(t)) - k_2 \mid x_2(t) \mid^{\gamma} \operatorname{sgn}(x_2(t)).$$

Мұндағы $x(t) = [x_1(t), x_2(t)]^T$ – жүйе күй векторы, $\sigma(t) \in \{1, 2\}$ – коммутация сигналы, $\tau > 0$ – тұрақты кешігу, $0 < \gamma < 1$.

Жүйе параметрлері келесі түрде таңдалды:

$a_1 = 2.0, \quad b_1 = 1.8, \quad c_1 = 0.25,$

$a_2 = 1.6, \quad b_2 = 2.2, \quad c_2 = 0.20,$

$\tau = 0.15, \quad k_1 = 1.2, \quad k_2 = 1.0, \quad \gamma = 0.7.$

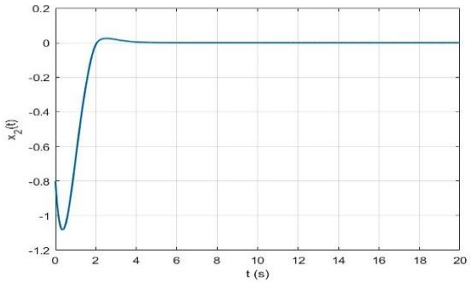
Таңдалған параметрлер Теорема 1 шарттарын қанағаттандырады. Коммутация сигналы бөлшектік-тұрақты заң бойынша анықталды. Коммутация мезеттері:

$t_s = \{2, 4, 6.5, 9, 11, 13.5, 16\}$

Коммутация сигналы ерікті түрде таңдалған.Бастапқы шарт:

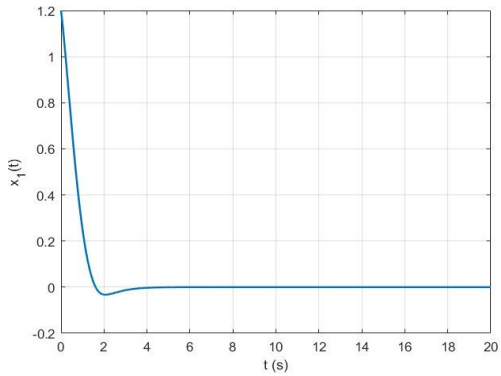
$x_1(t) = 1.2, \quad x_2(t) = -0.8, \quad t \in [-\tau, 0]$

Жүргізілген сандық модельдеу нәтижелері 1-3 суреттерде көрсетілген.

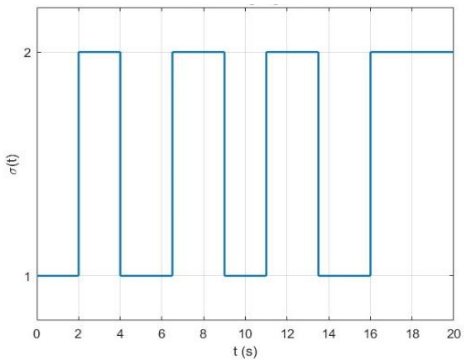


Сурет 1 – $x_1(t)$ күй айнымалысының уақыт бойынша өзгерісі

1-суретте $x_1(t)$ күй айнымалысының уақыт бойынша өзгерісі берілген. Суреттен көріп отырғанымыздай, коммутация және кешігу әсеріне қарамастан $x_1(t)$ уақыт өте нөлге ұмтылады. 2-суретте $x_2(t)$ күй айнымалысының динамикасы көрсетілген. Бұл айнымалы нөлдік тепе-теңдікке ұмтылады. 3-суретте $\sigma(t)$ коммутация сигналының уақыт бойынша өзгерісі келтірілген. Коммутацияға қарамастан жүйе орнықты күйге келеді.



Сурет 2 – $x_2(t)$ күй айнымалысының уақыт бойынша өзгерісі



Сурет 3 – $\sigma(t)$ коммутация сигналының уақыт бойынша өзгерісі

Алынған нәтижелер көрсеткендей, ұсынылған басқару заңы мен Ляпунов негізіндегі әдіс уақыт бойынша кешігуі бар коммутацияланатын сызықты емес жүйелерді тиімді түрде тұрақтандырады. Жүйе күйлері барлық коммутация режимдері үшін нөлдік тепе-теңдікке ұмтылады, бұл алынған нәтижелер Теорема 1-де алынған тұжырымдарды растайды. Айта кету керек, сандық модельдеу кезінде күй айнымалылары теориядағыдай дәл нөлге жетпей, нөлдің өте кіші маңайына жинақталады. Бұл сандық интеграторлардың шектеулеріне байланысты қалыпты құбылыс болып табылады.

Қорытынды

Бұл жұмыста уақыт бойынша кешігуі бар коммутацияланатын сызықты емес жүйелердің тұрақтылығы мәселесі қарастырылды. Коммутация сигналы ерікті түрде өзгеретін жағдайда жүйенің орнықтылығын қамтамасыз ету шарттары зерттелді.

Жұмыс барысында Ляпунов-Красовский функционалына негізделген тәсіл қолданылып, кешігуі бар жүйелер үшін тұрақтылықтың жеткілікті шарттары алынды. Ұсынылған әдіс жүйенің динамикасын сипаттайтын сызықты емес және кешігу мүшелерін ескеруге мүмкіндік береді. Сонымен қатар, алынған нәтижелер негізінде жүйені шекті уақытта тұрақтандыратын басқару заңы қарастырылды.

Теориялық нәтижелердің дұрыстығы сандық мысал арқылы расталды. Жүргізілген модельдеу нәтижелері күй айнымалыларының коммутация мен кешігу әсеріне қарамастан нөлдік тепе-теңдікке ұмтылатынын көрсетті. Бұл ұсынылған әдістің тиімділігін және оның коммутацияланатын кешігуі бар сызықты емес жүйелер үшін қолдануға жарамдылығын дәлелдейді.

Алынған нәтижелер басқару теориясындағы коммутацияланатын жүйелерді тұрақтандыру мәселелерін дамытуға белгілі бір үлес қосады. Ұсынылған тәсілді күрделі құрылымды жүйелерге, соның ішінде жоғары өлшемді және белгісіз параметрлері бар жүйелерге қолдану болашақ зерттеулердің маңызды бағыты болып табылады. Алынған нәтижелер коммутацияланатын жүйелер теориясының дамуына үлес қосады [6, 9-12].

Әдебиеттер тізімі

1. Liberzon D. Switching in Systems and Control / D. Liberzon. – Boston : Springer, 2012. – 233 p.
2. Fridman E. Introduction to Time-Delay Systems: Analysis and Control / E. Fridman. – Basel: Birkhäuser, 2014. – 336 p.
3. Zuo Z. Non-singular fixed-time terminal sliding mode control of nonlinear systems / Z. Zuo // Automatica. – 2015. – Vol. 54. – P. 305-309.
4. Seuret A. Stability of time-delay systems / A. Seuret, F. Gouaisbaut // Annual Reviews in Control. – 2015. – Vol. 39. – P. 45-52.
5. Sun Z. Switched Linear Systems: Control and Design / Z. Sun, S.S. Ge. – London: Springer, 2019. – 270 p.
6. Chen T. Finite-time stabilization of delayed nonlinear systems / T. Chen, X. Liu // IEEE Transactions on Automatic Control. – 2019. – Vol. 64, № 6. – P. 2501-2508.
7. Zhang W. Stability analysis of switched nonlinear systems with time delays / W. Zhang, H. Lin // Automatica. – 2020. – Vol. 117. – Art. 108956.
8. Li X. Finite-time stability of nonlinear switched systems with delays / X. Li, Y. Wang // Nonlinear Analysis. – 2021. – Vol. 209. – Art. 112353.
9. Zhao Y. Stability of switched nonlinear systems under arbitrary switching / Y. Zhao, H. Li // Journal of the Franklin Institute. – 2021. – Vol. 358, № 12. – P. 6120-6138.
10. Yu W. Recent advances in switched systems control / W. Yu, G. Chen // IEEE Access. – 2022. – Vol. 10. – P. 45678-45695.
11. Wang L. Finite-time control for nonlinear systems with delay / L. Wang, X. Zhao // Applied Mathematics and Computation. – 2023. – Vol. 438. – Art. 127567.
12. Defoort M. Fixed-time stabilization: a survey / M. Defoort, A. Polyakov // ESAIM: Control, Optimisation and Calculus of Variations. – 2018. – Vol. 24, № 2. – P. 743-767.
13. Briat C. Linear Parameter-Varying and Time-Delay Systems / C. Briat. – Berlin: Springer, 2015. – 398 p.
14. Ефимов Д.В. Конечновременная устойчивость и управление нелинейными системами / Д.В. Ефимов, В. Перрукетти. – Cham : Springer, 2017. – 412 с.
15. Смагулов, А.А. Коммутацияланатын жүйелердің тұрақтылығы / А.А. Смагулов, К.М. Нуртазин // Вестник КазНУ. – 2021. – № 3(127). – Б. 45-51.

References

1. Liberzon D. Switching in Systems and Control / D. Liberzon. – Boston : Springer, 2012. – 233 p. (In English).
2. Fridman E. Introduction to Time-Delay Systems: Analysis and Control / E. Fridman. – Basel: Birkhäuser, 2014. – 336 p. (In English).
3. Zuo Z. Non-singular fixed-time terminal sliding mode control of nonlinear systems / Z. Zuo // Automatica. – 2015. – Vol. 54. – P. 305-309. (In English).
4. Seuret A. Stability of time-delay systems / A. Seuret, F. Gouaisbaut // Annual Reviews in Control. – 2015. – Vol. 39. – P. 45-52. (In English).
5. Sun Z. Switched Linear Systems: Control and Design / Z. Sun, S.S. Ge. – London: Springer, 2019. – 270 p. (In English).
6. Chen T. Finite-time stabilization of delayed nonlinear systems / T. Chen, X. Liu // IEEE Transactions on Automatic Control. – 2019. – Vol. 64, № 6. – P. 2501-2508. (In English).
7. Zhang W. Stability analysis of switched nonlinear systems with time delays / W. Zhang, H. Lin // Automatica. – 2020. – Vol. 117. – Art. 108956. (In English).
8. Li X. Finite-time stability of nonlinear switched systems with delays / X. Li, Y. Wang // Nonlinear Analysis. – 2021. – Vol. 209. – Art. 112353. (In English).
9. Zhao Y. Stability of switched nonlinear systems under arbitrary switching / Y. Zhao, H. Li // Journal of the Franklin Institute. – 2021. – Vol. 358, № 12. – P. 6120-6138. (In English).
10. Yu W. Recent advances in switched systems control / W. Yu, G. Chen // IEEE Access. – 2022. – Vol. 10. – P. 45678-45695. (In English).
11. Wang L. Finite-time control for nonlinear systems with delay / L. Wang, X. Zhao // Applied Mathematics and Computation. – 2023. – Vol. 438. – Art. 127567. (In English).
12. Defoort M. Fixed-time stabilization: a survey / M. Defoort, A. Polyakov // ESAIM: Control, Optimisation and Calculus of Variations. – 2018. – Vol. 24, № 2. – P. 743-767. (In English).

13. Briat C. Linear Parameter-Varying and Time-Delay Systems / C. Briat. – Berlin: Springer, 2015. – 398 p. (In English).
14. Efimov D.V. Konechnovremennaya ustoichivost' i upravlenie nelineinymi sistemami / D.V. Efimov, V. Perruketti. – Cham : Springer, 2017. – 412 s. (In Russian).
15. Smagulov, A.A. Kommutatsiyalanatyn zhuielerdin turaktylygy / A.A. Smagulov, K.M. Nurtazin // Vestnik KazNU. – 2021. – № 3(127). – B. 45-51. (In Kazakh).

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

УСТОЙЧИВОСТЬ НЕЛИНЕЙНЫХ КОММУТАЦИОННЫХ СИСТЕМ С ВРЕМЕННЫМ ЗАПАЗДЫВАНИЕМ

Аннотация: *В данной работе рассматривается задача устойчивости переключаемых нелинейных систем с запаздыванием по времени. Динамика рассматриваемой системы определяется переключающим сигналом, описывающим переходы между несколькими подсистемами, при этом учитывается влияние временного запаздывания. Обеспечение устойчивости системы при произвольном изменении переключающего сигнала является сложной и актуальной задачей теории управления. В ходе исследования применён метод, основанный на функционале Ляпунова-Красовского, с помощью которого получены достаточные условия устойчивости для переключаемых нелинейных систем с запаздыванием. Предложенный подход позволяет одновременно учитывать нелинейные свойства системы, временные задержки и эффект переключения, что обеспечивает обобщение классических результатов. Кроме того, исследованы условия стабилизации системы за конечное время и предложен соответствующий закон управления в виде нелинейной обратной связи по состоянию. Данный закон управления обеспечивает достижение нулевого равновесия за конечное время и более быструю стабилизацию по сравнению с асимптотическим режимом. Полученные теоретические результаты подтверждены численным моделированием. Результаты моделирования показывают, что переменные состояния системы стремятся к нулевому равновесию независимо от воздействия переключения и запаздывания. Также установлено, что многократное изменение переключающего сигнала не нарушает устойчивость системы. Полученные результаты демонстрируют эффективность предложенного метода и его применимость для задач управления переключаемыми нелинейными системами с запаздыванием.*

Ключевые слова: *коммутационная система, нелинейная система, временное запаздывание, устойчивость, стабилизация за конечное время, функционал Ляпунова–Красовского, коммутационный сигнал, управление*

A. Zhambulatova*, K. Alimhan
L.N. Gumilyov Eurasian National University,
010000, Republic of Kazakhstan, Astana, Satpayev Street, 2
*e-mail: aigerimzhambulat@gmail.com

STABILITY OF NONLINEAR SWITCHED SYSTEMS WITH TIME DELAY

This paper addresses the stability problem of switched nonlinear systems with time delay. The dynamics of the considered system are governed by a switching signal that describes transitions between multiple subsystems, while the effect of time delay is explicitly taken into account. Ensuring system stability under arbitrary switching signals is a challenging and important problem in control theory. In this study, a method based on the Lyapunov-Krasovskii functional is employed to derive sufficient stability conditions for switched nonlinear systems with time delay. The proposed approach allows simultaneous consideration of nonlinear system properties, time-delay effects, and switching behavior, thereby providing a generalization of classical results. In addition, finite-time stabilization conditions are investigated, and a corresponding nonlinear state-feedback control law is proposed. This control law guarantees that the system states converge to the equilibrium within a finite time and achieves faster stabilization compared to asymptotic stability.The obtained theoretical results are validated through numerical simulations. The simulation results demonstrate that the system state variables converge to the equilibrium despite the presence of switching and time delay. Moreover, multiple switchings do not deteriorate system stability. The results confirm the effectiveness of the proposed method and show its applicability to the control of switched nonlinear systems with time delay.

Key words: *switched system, nonlinear system, time delay, stability, finite-time stabilization, Lyapunov-Krasovskii functional, switching signal, control.*

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, профессор кафедры «Математическое и компьютерное моделирование», Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилёва, Казахстан; 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», Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилёва, Казахстан; 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 09.04.2026
Өңдеуден кейін түсуі 24.04.2026
Жариялауға қабылданды 19.05.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-11

МРНТИ: 50.41.25; 50.41.29

Д.Ж. Шырынханова[1], Т.С. Жылқыбаев[2]*, Т.А. Устинова[2], Е.Р. Советбаев[2], Қ.Б. Байбосинова[2]

[1]Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева,
Республика Казахстан, г. Усть-каменогорск
[2]Шәкәрім университет,
Республика Казахстан, г. Семей, уг. Глинки, 20 А
*e-mail: tursynhan.jylqybaev@shakarim.kz

ВНЕДРЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ПАСПОРТОВ ЛАБОРАТОРИЙ ДЛЯ УЧЁТА ОБОРУДОВАНИЯ И ПРИБОРОВ

Аннотация: *В данной статье представлена разработка информационной системы цифровых паспортов лабораторного оборудования, предназначенной для автоматизации учета, идентификации и фиксации истории эксплуатации материально-технических ресурсов в лабораториях высших учебных заведений. Актуальность исследования обусловлена необходимостью перехода от бумажных журналов и электронных таблиц к более надежным цифровым решениям, обеспечивающим прозрачность, доступность и структурированное хранение данных об оборудовании.*

Целью исследования является разработка и тестирование прототипа системы, обеспечивающей быструю идентификацию лабораторного оборудования с использованием QR-

©Д.Ж. Шырынханова, Т.С. Жылқыбаев, Т.А. Устинова, Е.Р. Советбаев, Қ.Б. Байбосинова, 2026

кодов и доступ к актуальной информации через веб-интерфейс. В качестве программной основы использованы язык программирования Python, микрофреймворк Flask, встроенная база данных SQLite и библиотека qrcode для генерации QR-кодов. Цифровой паспорт оборудования включает уникальный идентификатор, наименование, инвентарный номер, местоположение, сведения о пользователе, а также дату и время начала и завершения эксплуатации.

В рамках исследования была реализована минимально жизнеспособная версия системы и проведено ее тестирование на базе лаборатории кафедры «Автоматизация и информационные технологии» Шәкәрім университета. Результаты тестирования подтвердили корректность работы основных модулей: генерации QR-кодов, регистрации, начала и окончания использования оборудования, сохранения записей в базе данных и отображения истории эксплуатации. Предложенное решение позволяет сократить объем ручных операции, снизить риск потери данных и повысить прозрачность учета лабораторного оборудования.

Практическая значимость работы заключается в возможности адаптации системы для других лабораторий и образовательных организаций. В статье также рассмотрены ограничения текущей версии и перспективы дальнейшего развития, включая расширение функциональности, учет ремонта, экспорт отчетов и интеграцию с информационными системами университета.

Ключевые слова: *лаборатория, Python, flask, sqlite, учет, QR-код, журнал учета.*

Введение

Лабораторные комплексы и специализированное оборудование являются важной составляющей образовательного процесса при подготовке специалистов технических направлений. В процессе проведения лабораторных и практических занятий осуществляется постоянное использование оборудования, требующее учета времени эксплуатации, фиксации пользователей, контроля технического состояния и регистрации выполненного обслуживания. В большинстве случаем подобный учет в образовательных организациях по-прежнему ведется вручную с использованием бумажных журналов или электронных таблиц, что приводит к ряду организационных и технических проблем [1].

Традиционные методы учета обладают рядом недостатков: высокая зависимость от человеческого фактора, вероятность потери или дублирования информации, отсутствие централизованного доступа к данным, а также сложность отслеживания истории эксплуатации оборудования. Дополнительной проблемой является низкая оперативность поиска информации, особенно при большом количестве лабораторных активов и пользователей. Исследования в области качества электронных таблиц также показывают высокую вероятность ошибок при ручной обработке и хранении данных, что снижает надежность подобных подходов к управлению активами.

В условиях цифровой трансформации образовательной среды возрастает необходимость внедрения современных систем управления материально-техническими ресурсами, обеспечивающих прозрачность учета, доступность информации и повышение эффективности эксплуатации оборудования. Одним из перспективных направлений является применение цифровых паспортов оборудования, обеспечивающих хранение структурированной информации о технических характеристиках, статусе, истории обслуживания и эксплуатации оборудования [2].

Одним из наиболее удобных и доступных способов реализации подобных систем является использование технологии QR-кодов в сочетании с веб-интерфейсом и встроенной базой данных. Применение QR-кодов обеспечивает быстрый доступ к цифровому паспорту оборудования посредством мобильных устройств без необходимости ручного ввода идентификаторов. В базе данных при этом может храниться информация об инвентарном номере, технических характеристиках, текущем состоянии оборудования, датах обслуживания и других параметрах, необходимых для организации эффективности учета.

Для реализации системы в данной работе использована встроенная база данных SQLite, позволяющая организовать автономное хранение информации без развертывания отдельной серверной инфрастуктуры [3,4]. Серверная часть реализована с применением микрофреймворка Flask, обеспечивающего взаимодействие между базой данных, QR-модулями и пользовательским веб-интерфейсом [5-8]. Использование подобной архитектуры позволяет минимизировать требования к вычислительным ресурсам и упростить внедрение системы в условиях ограниченной IT-инфраструктуры кафедральных лабораторий.

Несмотря на наличие исследований в области цифрового управления активами и автоматизации учета оборудования, вопросы внедрения автономных систем цифровых паспортов лабораторного оборудования в образовательных организациях Казахстана остаются недостаточно проработанными. Существующие решения зачастую ориентированы на крупные корпоративные системы управления активами и требуют значительных инфраструктурных ресурсов, что ограничивает их применение в условиях отдельных кафедр и лабораторий высших учебных заведений.

Целью работы является разработка и исследование системы цифровых паспортов лабораторного оборудования на основе QR-кодов, веб-интерфейса и встроенной базы данных SQLite для автоматизации и учета и повышения эффективности управления лабораторными активами.

Научная новизна работы заключается в разработке автономной архитектуры системы цифровых паспортов оборудования, ориентированной на использование в образовательных организациях без необходимости развертывания сложной серверной инфраструктуры. В отличие от существующих подходов, предложенное решение сочетает использование QR-идентификации, встроенной базы данных SQLite и веб-интерфейса управления, обеспечивая простоту внедрения, снижение инфраструктурных затрат и возможность масштабирования в условиях образовательной среды.

Разработка и внедрение системы цифровых паспортов лабораторного оборудования позволяет повысить прозрачность учета, сократить время доступа к информации об оборудовании, минимизировать влияние человеческого фактора и обеспечить централизованное хранение данных. Практическая значимость работы заключается в возможности применения разработанной системы в лабораториях кафедр и научных подразделений высших учебных заведений для повышения эффективности управления материально-техническими ресурсами.

Материалы и методы исследования

При разработке информационной системы цифровых паспортов лабораторного оборудования использовались следующие программные средства и технологии:

1. Python 3.12.4 – язык программирования для реализации серверной логики системы;
2. Библиотека flask – микрофреймворк для разработка веб-интерфейса и обработки HTTP-запросов;
3. Библиотека sqlite – встраиваемая реляционная база данных для хранения информации;
4. Библиотека qrcode – средство генерация QR-кодов;
5. HTML и CSS – инструменты разработки пользовательского веб-интерфейса.

Выбор указанных технологий обусловлен особенностями разрабатываемой системы и условиями ее эксплуатации в лабораториях высших учебных заведений.

Язык программирования Python был выбран благодаря широкому набору библиотек, простоте интеграции компонентов и возможности быстрого создания прикладных информационных систем различного назначения. Дополнительным преимуществом является кроссплатформенность и возможность дальнейшего масштабирования проекта.

Для хранения цифровых паспортов оборудования использована встроенная база данных SQLite [3-5]. Данная СУБД не требует отдельного серверного развертывания, обладает низкими требованиями к вычислительным ресурсам и обеспечивает автономность работы системы. SQLite широко применяется во встроенных, мобильных и локальных информационных системах, что делает ее подходящей для использования в условиях ограниченной IT-инфраструктуры кафедральных лабораторий.

Несмотря на существование клиент-серверных решений, таких как PostgreSQL или MySQL, в рамках данного исследования была выбрана SQLite, поскольку система ориентирована на локальное использование в пределах отдельных лабораторий и кафедр. Использование встроенной базы данных позволяет упростить внедрение системы и снизить требования к техническому сопровождению. При увеличении количества пользователей и объема оборудования возможен переход на клиент-серверную архитектуру без существенного изменения логики работы приложения.

Для реализации серверной части и пользовательского веб-интерфейса использовался микрофреймворк Flask [5-9]. Выбор Flask обусловлен простотой настройки, удобной

интеграцией с SQLite и возможностью быстрого развертывания веб-приложений. Использование Flask позволило реализовать компактную архитектуру системы с минимальными требованиями к вычислительным ресурсам.

Для идентификации оборудования использовалась технология QR-кодов [2]. QR-коды содержат ссылку на цифровой паспорт оборудования и обеспечивает быстрый доступ к информации посредством мобильных устройств. Использование данной технологии позволяет минимизировать ошибки ручного ввода данных и ускорить процесс поиска информации об оборудовании.

Разработанная система реализована по многоуровневой архитектуре, включающей уровень хранения данных, серверный уровень обработки запросов и пользовательский уровень взаимодействия. На уровне хранения данных используется база данных SQLite, обеспечивающая хранение цифровых паспортов оборудования, информации о пользователях и журналов эксплуатации оборудования.

Серверный уровень реализован с использованием Flask и отвечает за обработку HTTP-запросов, взаимодействие с базой данных, формирование пользовательского интерфейса и генерацию QR-кодов.

Пользовательский уровень обеспечивает взаимодействие обучающихся и персонала с системой посредством веб-интерфейса и мобильных устройств, используемых для сканирования QR-кодов оборудования.

Для хранения информации о лабораторном оборудовании была разработана база данных, включающая следующие основные таблицы:

1. Equipment – хранение информации об оборудовании (наименование, инвентарный номер);
2. Users – хранение данных пользователей (ФИО, группа);
3. Rooms – хранение информации об аудиториях и лабораториях;
4. Usage_log – журнал регистрации начала и окончания использования оборудования.

Связи между таблицами представлены на ER-диаграмме (рис. 1).

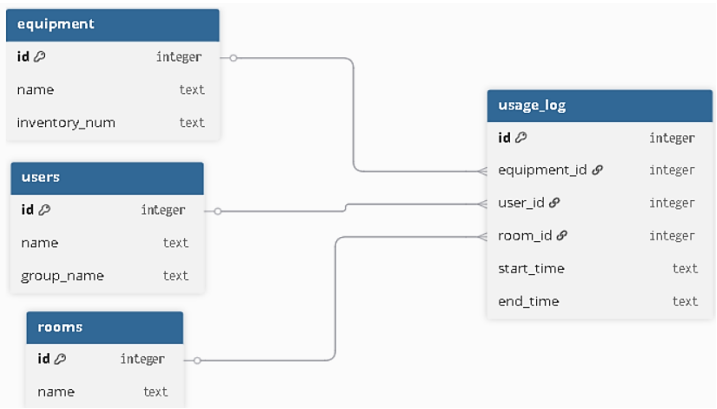


Рисунок 1 – ER-диаграмма таблиц базы данных

Цифровой паспорт оборудования включает следующие основные параметры:

1. Уникальный идентификатор оборудования;
2. Название оборудования;
3. Инвентарный номер;
4. Местоположение оборудования;
5. Дата и время начала эксплуатацию;
6. Дата и время окончания эксплуатации;
7. Историю эксплуатации оборудования.

Алгоритм работы системы включает следующие этапы:

1. Администратор системы заполняет таблицы оборудования и аудиторий;
2. Для каждого оборудования автоматически генерируется QR-код;
3. Пользователь сканирует QR-код и переходит в веб-интерфейс системы;
4. При начале работы пользователь вводит персональные данные и выбирает оборудование;
5. После завершения работы информации автоматически сохраняется в журнал использования оборудования.

При работе системы возможен одновременный доступ нескольких пользователей к базе данных. Для обеспечения целостности данных SQLite использует механизм транзакций и блокировки записи. Поскольку тестирование проводилось в условиях ограниченного количества одновременно работающих пользователей, производительности SQLite оказалось достаточно для стабильной работы системы.

Разработанная система ориентирована на использование в пределах отдельных лабораторий и кафедр. При увеличении количества оборудования и пользователей возможен переход на клиент-серверную архитектуру с использованеием более производительных СУБД. Предложенная архитектура позволяет выполнять дальнейшее масштабирование без существенного изменения пользовательского интерфейса и основной логики работы системы.

Для демонстрации работы системы были разработаны основные страницы пользовательскоого интерфейса:

1. Главная страница (рис. 2);

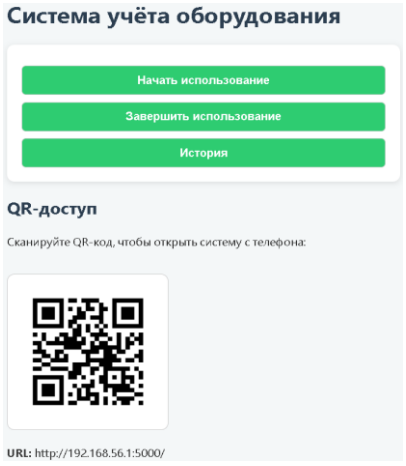


Рисунок 2 – Главная страница

2. Регистрация начала использования оборудования (рис. 3);

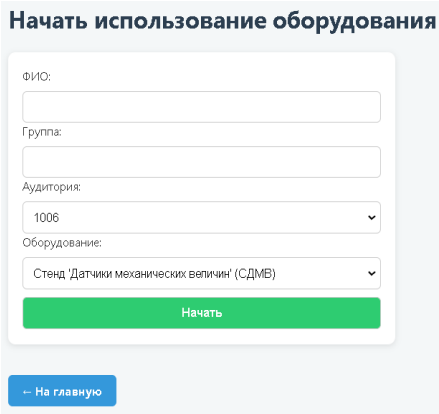


Рисунок 3 – Страница «Начать использование»

3. Завершение работы с оборудованием (рис. 4);

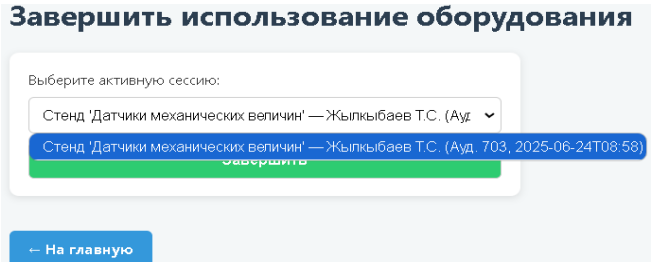


Рисунок 4 – Страница «Завершить использование»

4. Просмотр истории эксплуатации (рис. 5);



Рисунок 5 – Страница «История»

Интерфейс обеспечивает регистрацию пользователей, фиксацию времени эксплуатации оборудования и просмотр истории использования лабораторных активов.

Результаты и их обсуждение

Разработанная система цифровых паспортов лабораторного оборудования была протестирована на базе лаборатории «Автоматика и микропроцессорная техника» кафедра «Автоматизация и информационные технологии», а также на примере переносного оборудования, используемого в учебном процессе кафедры «Строительство и геодезия» НАО «Шәкәрім университет»ю В тестовую версию системы были внесены четыре единицы оборудования, для которых были сформированы цифровые записи в базе данных и сгенерированы QR-коды.

В процессе тестирования проверялись следующие сценарии работы системы:

1. Добавление оборудования в базу данных;
2. Генерация QR-кода;
3. Считывание QR-кода с мобильного устройства;
4. Регистрация начала использования оборудования;
5. Завершение работы с оборудованием;
6. Просмотр истории эксплуатации.

Проверка показала, что система корректно выполняет основные функции:

1. QR-код формируется без ошибок;
2. Переход к веб-интерфейсу осуществляется корректно;
3. Данные о пользователей, аудитории, оборудовании и времени использования;
4. Сохраняются ли данные в журнале эксплуатации.

Практическое тестирование показало, что предложенная система позволяет повысить оперативность доступа к информации об оборудовании. В традиционной схеме учета пользователю или лаборанту необходимо вручную найти соответствующую запись в журнале или электронной таблице. В разработанной системе доступ к информации осуществляется путем сканирования QR-кода, что сокращается количество ручных операций и снижает вероятность ошибок при поиске или вводе данных.

Основной практический эффект системы заключается в повышении прозрачности использования лабораторного оборудования. Учебные мастера, лаборанты и преподаватели получают возможность отслеживать, какое оборудование использовалось, кем, в какой аудитории и в какой период времени. Это особенно важно для переносного оборудования, которое может использоваться в разных аудиториях и передаваться между пользователями.

По сравнению с бумажным журналом учета предложенная система обладает следующими преимуществами: исключается физический износ или потеря журнала, обеспечивается централизованное хранение информации, упрощается поиск записей и формируется итория использования оборудования. В отличие от бумажного учета, цифровая система позволяет быстро получить сведения о текущем и предыдущем использованнии оборудования без просмотра большого количества записей вручную.

Отдельного внимания заслуживает сравнение с учетом в Microsoft Excel. Электронные таблицы удобны для первичного хранения, однако при многопользовательской работе возникают риски случайного изменения, удаления или дублирования данных. Кроме того, в Excel затруднено разграничение прав доступа, введение истории изменений и автоматическая привязка записи к конкретному оборудованию. Исследования, посвященные

качеству электронных таблиц, также показывают, что ручной ввод и отсутствие формализованного контроля повышают вероятность ошибок при работе с данными [9-11]. В предлагаемой системе данные хранятся в структурированной базе, а регистрация использования оборудования выполняется через заранее заданный пользовательский сценарий.

Преимущества предложенного решения можно представить следующим образом:

1. Быстрый доступ к информации об оборудовании через QR-код;
2. Снижение зависимости от бумажных журналов и ручного поиска записей;
3. Централизованное хранение истории использования оборудования;
4. Возможность отслеживания пользователя, аудитории, времени начала и окончания работы;
5. Возможность дальнейшего расширения количества оборудования, аудиторий и категорий пользователей;
6. Адаптация системы под условия кафедральных лабораторий без наобходимости внедрения сложной серверной инфраструктуры.

Вместе с тем в ходе тестирования были выявлены ограничения текузей версии системы. Во-первых, система была проверена на ограниченном количестве оборудования, что не позволяет в полной мере оценить ее работу при большом числе пользователей и записей. Во-вторых, текущая версия ориентирована преимущественно на локальное использование: мобильное устройства и компьютер, на котором запущено приложение, должны находиться в одной сети. Данное ограничение можетб быть устранено при последующем развертывании системы на сервере университета или при использовании технологий защищенного туннелирования, например ngrok, позволяющих временно организовать доступ к локальному серверу через интернет [12].

Также необходимо отметить, что текущая версия систекмы является минимально жизнеспособным продуктом (MVP). Она решает основные задачи: регистрацию начала и окончания использования оборудования, сохранение информации о пользователе, фиксацию аудитории и ведение истории эксплуатации. Однако для промышленного или университетского масштабирования требуется дальнейшее развитие функциональности, включая разграничения прав доступа, резервное копирование базы данных и защиту от несанкционированного изменения записей. В текущей версии системы реализован базовый пользовательский сценарий регистрации работы с оборудованием. Полноценное разграничение прав доступа между администратором, лаборантом, преподавателем и обучающимся рассматривается как следующий этап развития системы. Это позволит повысить защищенность данных и исключить несанкционированное изменение записей.

С точки зрения масштабируемости предложенная архитектура подходит для использования в пределах отдельных лабораторий и кафедр. При увеличении количества оборудования, пользователей и интенсивности обращений к системе целесообразно рассмотреть переход от SQLite к клиент-серверной базе данных, например PostgreSQL или MySQL. При этом основная логика системы и пользовательский интерфейс могут быть сохранены, что позволяет рассматривать разработанное решение как основу для дальнейшего расширения.

Таким образом, результаты тестирования подтверждают практическую применимость предложенной системы для учета лабораторного оборудования. Разработанное решение позволяет повысить прозрачность эксплуатации оборудования, сократить количество ручных операций и создать основу для дальнейшей цифровизации управления лабораторными активами. В перспективе систему планируется дополнить функциями экспорта данных в Excel и PDF, учета ремонта и технического обслуживания, подачи заявок на обслуживание, уведомлений ответственным лицам, а также аналитическими модулями для оценки интенсивности использования оборудования.

Заключение

В результате выполненной работы была разработана и протестирована система цифровых паспортов лабораторного оборудования, основанная на применении QR-кодов, веб-интерфейса и базы данных SQLite. Разработанное решение обеспечивает регистрацию оборудования, фиксацию начала и окончания его использования, хранение истории эксплуатации и быстрый доступ к информации посредством мобильного устройства.

Практическое тестирование показало, что система корректно выполняет основные функции и может использоваться для повышения прозрачности учета лабораторного оборудования. В отличие от бумажных журналов и электронных таблиц, предложенный подход позволяет централизованно хранить данные, снизить зависимость от ручного ввода, упростить поиск информации и обеспечить отслеживание истории использования оборудования.

Научно-практический вклад работы заключается в разработке автономной архитектуры цифрового паспорта оборудования, адаптированной к условиям кафедральных лабораторий и не требующей сложной серверной инфраструктуры на начальном этапе внедрения. Использование SQLite и Flask позволило создать легковесное решение, которое может быть развернуто в условиях ограниченных технических ресурсов, а применение QR-кодов обеспечило удобную идентификацию оборудования и быстрый доступ к его цифровой записи.

Вместе с тем текущая версия системы является минимально жизнеспособным продуктом и имеет ряд ограничений. Тестирование проводилось на ограниченном количестве оборудования, а работа системы в текущей реализации ориентирована преимущественно на локальную сеть. При расширении числа пользователей и объектов учета потребуется дальнейшее развитие архитектуры, включая переход к клиент-серверной базе данных, внедрение механизмов разграничения прав доступа, резервного копирования и защиты данных.

Перспективными направлениями дальнейшей работы являются расширение функциональности системы, внедрение учета ремонта и технического обслуживания, формирование заявок на обслуживание, автоматическая отправка уведомлений ответственным лицам, экспорт отчетов в Excel и PDF, а также интеграция с информационными системами университета. Полученные результаты подтверждают практическую ценность и технологическую реализуемость предложенного подхода, а также возможность его дальнейшего масштабирования для других лабораторий и образовательных организаций.

Список литературы

1. Kocharyan T.M. Osnovnye problemy, voznikayushchie pri provedenii inventarizatsii imushchestva i obyazatel'stv i ikh reshenie / T.M. Kocharyan, R.V. Morgunova // Innovatsii i investitsii. – 2020. – № 2. – S. 201-205. https://cyberleninka.ru/article/n/osnovnye-problemy-voznikayuschie-pri-provedenii-inventarizatsii-imuschestva-i-obyazatelstv-i-ih-reshenie/viewer. (In Russian).
2. Implementing QR codes in academia to improve sample tracking, data accessibility, and traceability in multicampus interdisciplinary collaborations / C. Hernandez et al // PLOS ONE. – 2023. – Vol. 18, № 4. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0282783.
3. Tobacco Leaf NIR Management and Classification Based on JSON Conversion and Constrained K-Means for SQLite Database / J. Huo et al // 2024 IEEE 15th International Conference on Software Engineering and Service Science (ICSESS). – 2024. – P. 158-162. https://doi.org/10.1109/ICSESS62520.2024.10719383.
4. Wu Y. SQLite Embedded Database in Data Chain Devices / Y. Wu, H. Luo, Y. Liu // Proceedings of the Sixth International Conference on Advanced Electronic Materials, Computers, and Software Engineering (AEMCSE 2023). – Shenyang, China, 2023. – Vol. 12787. – Paper 127870Y. https://doi.org/10.1117/12.3004802.
5. Wan Y. Embedded Database SQLite Application Based on ARM Platform / Y. Wan // Proceedings of the Fourth International Conference on Automation Control, Algorithm, and Intelligent Bionics (ACAIB 2024). – Yinchuan, China, 2024. – Vol. 13259. – Paper 132592U. https://doi.org/10.1117/12.3039708.
6. Realizatsiya bazy dannykh s ispol'zovaniem freimvorka Python Flask: sistema upravleniya bazoi dannykh kolledzha / N. Chauhan et al // International Journal of Engineering and Computer Science. – 2019. – T. 8. – S. 24894-24899. https://doi.org/10.18535/ijecs/v8i12.4390. (In Russian).
7. Design and Development of an Application for Database Maintenance in Inventory Management System Using Tkinter and SQLite Platform / K. Yuvaraj et al // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – Vol. 995. – 012012. https://doi.org/10.1088/1757-899X/995/1/012012.

8. Implementation of Database Using Python Flask Framework: College Database Management System / N. Chauhan et al // International Journal of Engineering and Computer Science. – 2019. – Vol. 8. – P. 24894-24899. https://doi.org/10.18535/ijecs/v8i12.4390.
9. Suraya Sholeh M. Designing and Implementing a Database for Thesis Data Management by Using the Python Flask Framework / M. Suraya Sholeh // International Journal of Engineering, Science and Information Technology. – 2021. – Vol. 2. – P. 9-14. https://doi.org/10.52088/ijesty.v2i1.197.
10. A Comprehensive Analysis and Evaluation of SQLite Deleted Record Recovery Techniques: A Survey / S. Lee et al // Forensic Science International: Digital Investigation. – 2025. – Vol. 55. – 302031. https://doi.org/10.1016/j.fsidi.2025.302031.
11. Ramos-Miller M. Towards Inventory Control Excellence: An Innovative Approach Based on a Web-Based Platform / M. Ramos-Miller, A. Pacheco // F1000Research. – 2023. – Vol. 12. – 1471. https://doi.org/10.12688/f1000research.140745.2.
12. Tunnel-Based Intra Network Controller Using NGROK Framework for Smart Cities / P. Kumaresan et al // Proceedings of the International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA). – 2021. – P. 39-43. https://doi.org/10.1109/ICECA52323.2021.9676036.

Д.Ж. Шырынханова[1], Т.С. Жылқыбаев[2*], Т.А. Устинова[2], Е.Р. Советбаев[2], Қ.Б. Байбосинова[2]
[1]Қазақстан техникалық университеті. Д. Серікбаева,
Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.
[2]Шәкәрім университеті,
Қазақстан Республикасы, Семей қ., қиылысы, Глинки, 20 А
[*]e-mail: tursynhan.jylqybaev@shakarim.kz

ЖАБДЫҚТАР МЕН АСПАПТАРДЫ ЕСЕПКЕ АЛУ ҮШІН ЗЕРТХАНАЛАРДЫҢ ЦИФРЛЫҚ ПАСПОРТТАРЫН ЕНГІЗУ

Бұл мақалада жоғары оқу орындарының зертханаларында материалдық-техникалық ресурстарды пайдалану тарихын есепке алуды, сәйкестендіруді және тіркеуді автоматтандыруға арналған зертханалық жабдықтардың цифрлық паспорттарының ақпараттық жүйесін әзірлеу ұсынылған Зерттеудің өзектілігі қағаз журналдар мен электрондық кестелерден жабдықтар туралы деректердің ашықтығын, қолжетімділігін және құрылымдалған сақталуын қамтамасыз ететін неғұрлым сенімді цифрлық шешімдерге көшу қажеттілігімен байланысты.

Зерттеудің мақсаты QR-кодтарды пайдалана отырып, зертханалық жабдықтарды жылдам сәйкестендіруді және веб-интерфейс арқылы өзекті ақпаратқа қол жеткізуді қамтамасыз ететін жүйенің прототипін әзірлеу және сынау болып табылады. Бағдарламалық негіз ретінде Python бағдарламалау тілі, Flask микрофреймворкі, кіріктірілген SQLite деректер базасы және QR-кодтарды генерациялауға арналған qrcode кітапханасы пайдаланылды. Жабдықтың цифрлық паспорты бірегей идентификаторды, атауын, инвентарлық нөмірді, орналасқан жерін, пайдаланушы туралы мәліметтерді, сондай-ақ пайдаланудың басталу және аяқталу күні мен уақытын қамтиды.

Зерттеу аясында жүйенің минималды өміршең нұсқасы іске асырылып, Шәкәрім университетінің "Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар" кафедрасының зертханасы базасында сынақтан өткізілді. Тестілеу нәтижелері негізгі модульдердің дұрыс жұмыс істеуін растады: QR-кодтарды генерациялау, тіркеу, жабдықты пайдалануды бастау және аяқтау, деректер базасындағы жазбаларды сақтау және пайдалану тарихын көрсету. Ұсынылған шешім қолмен жасалатын операциялардың көлемін азайтуға, деректерді жоғалту қаупін азайтуға және зертханалық жабдықтарды есепке алудың ашықтығын арттыруға мүмкіндік береді.

Жұмыстың практикалық маңыздылығы жүйені басқа зертханалар мен білім беру ұйымдарына бейімдеу мүмкіндігінде. Сондай-ақ мақалада ағымдағы нұсқаның шектеулері мен одан әрі даму перспективалары, соның ішінде функционалдықты кеңейту, жөндеуді есепке алу, есептерді экспорттау және университеттің ақпараттық жүйелерімен интеграциялау мәселелері қарастырылған.

Түйін сөздер: *зертхана, Python, flask, sqlite, есеп, QR коды, есепке алу журналы.*

D.Zh. Shyrinkhanova[1], T.S. Zhylkybaev[2*], T.A. Ustinova[2], E.R. Sovetbaev[2], Қ.B. Baibosynova[2]
[1]D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University,
Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk
[2]Shakarym University, Republic of Kazakhstan, Semey, 20 A Glinka str.
[*]e-mail: tursynhan.jylqybaev@shakarim.kz

IMPLEMENTATION OF DIGITAL LABORATORY PASSPORTS FOR EQUIPMENT AND INSTRUMENT RECORDING

This article presents the development of an information system for digital passports of laboratory equipment, intended to automate the accounting, identification and recording of the operational history of physical resources in laboratories of higher education institutions. The relevance of the study is determined by the need to move from paper-based journals and spreadsheets to more reliable digital solutions that ensure transparency, accessibility and structured storage of equipment data.

The aim of the study is to develop and test a prototype system that provides rapid identification of laboratory equipment using QR codes and access to up-to-date information through a web interface. The system was developed using the Python programming language, the Flask microframework, the embedded SQLite database and the qrcode library for QR code generation. The digital passport of equipment includes a unique identifier, name, inventory number, location, user information, as well as the date and time of the beginning and completion of equipment use.

As part of the study, a minimum viable version of the system was implemented and tested in the laboratory of the Department of Automation and Information Technologies at Shakarim University. The testing results confirmed the correct operation of the main modules, including QR code generation, registration of the beginning and completion of equipment use, saving records in the database and displaying the operational history. The proposed solution reduces the number of manual operations, lowers the risk of data loss and increases the transparency of laboratory equipment accounting.

The practical significance of the work lies in the possibility of adapting the system for other laboratories and educational organisations. The article also discusses the limitations of the current version and prospects for further development, including functionality expansion, repair accounting, report export and integration with the university's information systems.

Key words: *laboratory, Python, flask, sqlite, accounting, QR code, accounting log.*

Сведения об авторах

Динара Жаксылыковна Шырынханова – докторант Школы цифровых технологий и искусственного интеллекта, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан; e-mail: d.shyrynkhanova@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-5311-1221.

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.

Татьяна Анатольевна Устинова – магистр, старший преподаватель кафедры «Автоматизация и информационные технологии», Шәкәрім университет, г. Семей, Казахстан; e-mail: ustinova-t-a@yandex.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-8244-6043.

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.

Құралай Болатханқызы Байбосинова – магистр технических наук, старший преподаватель, кафедра «Строительство и геодезии», Шәкәрім университет, г. Семей, Казахстан; e-mail: q.baibosinova@shakarim.kz. OCID: https://orcid.org/0009-0009-8204-0957.

Авторлар туралы мәліметтер

Динара Жаксылыковна Шырынханова – докторант Школы цифровых технологий и искусственного интеллекта, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан; E-mail: d.shyrynkhanova@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-5311-1221.

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.

Татьяна Анатольевна Устинова – магистрі, «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасының аға оқытушысы; Семей қаласының Шәкәрім атындағы университеті, Қазақстан; e-mail: ustinova-t-a@yandex.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-8244-6043.

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.

Құралай Болатханқызы Байбосинова – техника ғылымдарының магистрі, «Құрылыс және геодезия» кафедрасының аға оқытушы, Шәкәрім университеті, Семей қ., Қазақстан; e-mail: q.baibosinova@shakarim.kz. OCID: https://orcid.org/0009-0009-8204-0957.

Information about the authors

Dinara Shyrynkhanova – Doctoral (PhD) student, School of Digital Technologies and Artificial Intelligence, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; e-mail: d.shyrynkhanova@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-5311-1221.

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.

Tatyana Ustinova – Master, senior lecturer of the Department of Automation and Information Technologies, Shakarim University of Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: ustinova-t-a@yandex.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-8244-6043.

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.

Kuralay Baibossinova – Master of technical sciences, senior lecturer, Department of Construction and Geodesy, Shakarim university, Semey c., Kazakhstan; e-mail: q.baibosinova@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-8204-0957.

Поступила в редакцию 30.03.2026
Поступила после доработки 15.05.2026
Принята к публикации 19.05.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-12

CC BY 4.0
Check for updates

IRSTI: 28.23.37

A.S. Shayakhmetova[1], N. Tasbolatuly[2]*, N.E. Dosanov[2], M. Othman[3], N. Kurishbay[1]
[1]Al-Farabi Kazakh National University,
050040, Republic of Kazakhstan, Almaty, Al-Farabi Avenue, 71
[2]Astana International University,
010000, Republic of Kazakhstan, Astana, Qabanbay Batyr Avenue, 8
[3]Universiti Putra Malaysia,
43400 UPM Serdang, Selangor, Malaysia
*e-mail: nurbolat.tasbolatuly@aiu.edu.kz

RESEARCH OF PERSONALIZED MEDICINE METHODS USING BAYESIAN ANALYSIS

Abstract: *The article is devoted to the research of personalized medicine methods using Bayesian analysis. In modern medicine, one of the most important ways is to make effective decisions taking into account the genetic, clinical and lifestyle characteristics of each patient. In this regard, probabilistic approaches to data analysis in conditions of uncertainty have a special application. The research examines the possibilities of assessing the likelihood of developing diseases and optimizing treatment strategies by combining various sources of medical data. The Bayesian method combines preliminary knowledge and new clinical information. Thus, it allows you to increase the accuracy of diagnosis and assess risks. The study analyzes effective ways to support the medical decision-making process using probabilistic models. At the same time, the practical significance of a personalized approach in medicine is revealed. In particular, the issues of early diagnosis and individualization of treatment are considered. The presented method allows you to improve the quality of medical data processing. Aimed at developing the rules of personalized medicine.*

Key words: *personalized medicine, Bayesian analysis, artificial intelligence, machine learning, clinical decision support.*

Introduction

The development of modern medical science is inextricably linked with the study of new ways to preserve human health. In recent years, the focus of medical research has been changing from the «traditional» model to the direction of personalized medicine that takes into account individual characteristics [1]. This approach is to make a diagnosis taking into account the genetic, biological,

©A.S. Shayakhmetova, N. Tasbolatuly, N.E. Dosanov, M. Othman, N. Kurishbay, 2026

clinical and lifestyle-related characteristics of each patient. Aimed at assessing the choice of treatment methods and the likelihood of developing the disease [2].

Personalized medicine is one of the most important innovative areas in the health sector [3]. Its main goal is to increase the effectiveness of treatment and reduce side effects by basing medical decisions on the patient's personal data. This direction requires the integration of Sciences such as genomics, bioinformatics, data science and artificial intelligence.

The amount of medical data has increased significantly in recent years. Electronic health systems, clinical trials, genomic sequencing results, biomarkers, and medical images constitute a huge amount of information [4]. Effective analysis of this data requires the use of complex statistical and probabilistic methods.

Bayesian statistics are a method based on updating probabilities [5]. It allows you to make decisions in the face of uncertainty. This approach combines preliminary knowledge (prior) and new observations (data) to calculate the posterior probability of results. In medical research, this property is very important. Because clinical data are often incomplete, prone to noise or variable [6].

In personalized medicine information about the patient's condition can come from different sources [7]. These are: genetic test results, clinical analyzes, lifestyle data, environmental factors, and medical history. The diversity and complexity of this information requires integrated analysis through probability models.

Artificial intelligence technologies and machine learning have become the main tools for data analysis in personalized medicine [8]. But many algorithms are deterministic in nature. It does not fully reveal the probabilistic nature of the results. Bayesian approaches provide a probabilistic interpretation. It allows you to assess the reliability of the results of the model.

Ethical and safety issues also play an important role in the analysis of medical data [9]. In Personalized Medicine, one of the main requirements includes the protection of personal data of patients and the responsible use of data. Bayesian models allow data to be analyzed in an aggregated way. It will help maintain privacy [10]. The transition to personalized medicine will significantly increase the efficiency of the health system. Correctly selected methods of treatment create conditions to reduce hospitalization time, reduce medical costs and improve the quality of life of patients [11].

The relevance of this study is determined by the need for decision-making in the face of uncertainty in personalized medicine and the complexity of medical data.

The purpose of the research: to study the effectiveness of personalized medicine methods using Bayesian analysis and improve the medical decision-making process. To achieve this goal, the following tasks are performed:

– creating probabilistic models;

– analysis of clinical data;

– evaluation of results.

This approach helps to obtain more reliable results in medical reports with a high degree of uncertainty.

Literature review

Modern research in the field of personalized medicine involves the widespread use of Bayesian methods and probability models in order to increase prediction accuracy, take into account uncertainty, and support clinical decision-making. In a number of studies, different approaches have been proposed, such as Bayesian networks, Bayesian neural networks. The problems of combining heterogeneous clinical and biomedical data are studied in them. The analysis of existing works makes it possible to identify the main achievements, limitations and research gaps. Forms the methodological basis of the research in question. So the article [12] shows an approach that defines ways to evaluate new therapeutic interventions with the Bayesian method proposed. But it is necessary to further confirm the possibility of its generalization in various clinical situations. Future research should focus on reliable processing of missing data and the integration of prior knowledge to increase scalability and applicability in real time in complex clinical situations. In the research [13] the authors showed that Bayesian neural networks increase the accuracy of medical prediction modeling. Presented a high potential to support clinical decision-making through quantitative assessment of uncertainty. But in order to use them on a large scale, further research is needed on scaling and implementation in real environments. The work [14] proposes an innovative approach

based on artificial intelligence and Bayesian networks to integrate clinical, biological and factual data. This will improve the interpretation of models, compensate for data shortages and systematic anomalies, and more accurately analyze long-term outcomes in patients with chronic diseases. In the work [15] Bayes demonstrated that neural networks can significantly improve the diagnosis of lung cancer with advanced sampling methods such as the Hamiltonian Monte Carlo. At the same time, reliable uncertainty in combination with quantitative indicators provides high-precision forecasts. In the research [16] the potential effect of the updated Bayesian finding was best cited by the use of colorectal cancer detection in medicine. The research [17] proposes a hybrid approach that combines Bayesian networks and regression analysis. This gave a rational approach to the joint use of the Bayesian network and the regression method to predict the cost of treatment. The study [18] suggests simulating complex drug interactions and heterogeneous patient responses. Shows that the Bayesian approach gives good results in solving methodological problems of dose optimization in complex combination therapy, such as immunotherapy and targeted treatment. Even Bayes' method can show a good indication in determining the immune system's overreaction to substances such as dust, food, or medicine.

Methods

Bayesian probability model

A probabilistic model based on a Bayesian network is used to assess the individual probability of a clinical response to therapy. It describes the joint distribution of patient and clinical outcome variables.

The study created an artificial clinical data set for anemia in 30 patients. The posterior probability of response to therapy for each patient was calculated based on Bayes ' theorem:

$$P(Y=1|B)=\frac{P(B|Y=1)\cdot P(Y=1)}{P(B|Y=1)\cdot P(Y=1)+P(B|Y=0)\cdot(1-P(Y=1))}$$

here:

$Y\in\{0,1\}$ – a binary variable reflecting the clinical response to treatment (1 – response, 0 – no response).

B – a set of clinical and immunological indicators of the patient;

B={age, sex, allergy_type, total_IgE, eosinophils, IL4, IL5, IL13, allergen_exposure, family_history, asthma, season, anaphylaxis_history, treatment, severity}

Table 1 – Aposteriory probabilities of patients' response to therapy (the fragment)

Patients	IgE	IL-4	Asthma	Severity	P(Answer)
10	500	6.0	Yes	Heavy	0.93
18	460	6.3	Yes	Heavy	0.89
15	420	5.9	Yes	Heavy	0.84
4	520	6.1	Yes	Heavy	0.21
12	540	5.8	Yes	Heavy	0.17

The resulting aposteriory probabilities were divided into three risk levels:

0.7-1.0 – high response probability

0.4-0.7 – average level, additional control required

0-0.4 – low response probability.

The Bayesian approach allows for a probabilistic classification of patients, rather than just a binary classification. This increases the accuracy of clinical decision-making in the context of personalized medicine.

The results are presented in Figure 1.

Here:

On the X – are patients (ID 1-30)

On the Y – P (Response | Data)

Horizontal lines:

0.7 – high response rate

0.4 – average level.

Since the «Response» variable in the table is binary, the a posteriori probability is now 1 or 0.

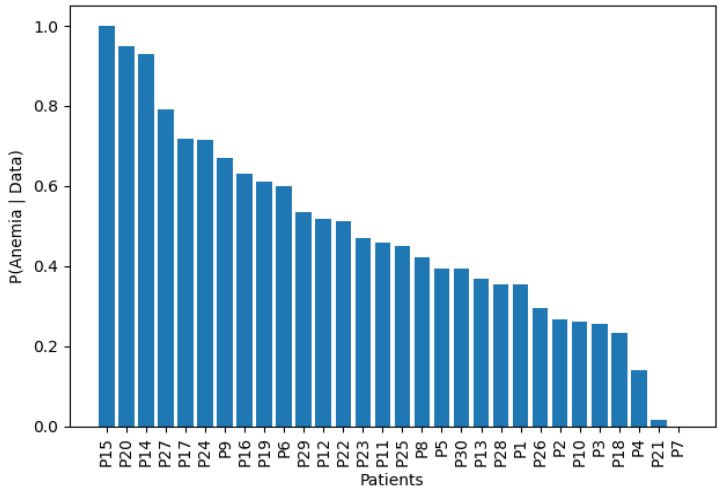


Figure 1 – Posterior probability of anemia risk

Aposteriory probability (for allergy data)

This is calculated for each patient in the column chart:

$$P(Response = 1|B) = \frac{P(B|Response = 1) \cdot P(Response = 1)}{P(B|Response = 1) \cdot P(Response = 1) + P(B|Response = 0) \cdot P(Response = 0)}$$

here:

B – control data (age, sex, allergy_type, total_IgE, eosinophils, IL4, IL5, IL13, allergen_exposure, family_history, asthma, season, anaphylaxis_history, treatment, severity);

P(Response=1) – a priori probability (21/30 ≈ 0.70 according to the data);

P(Response=0)=1−P(Response=1);

P(B|·) – conditional probability, calculated based on the relationship of clinical indicators with the response.

A priori probability (response to therapy)

A priori, the probability was determined according to the frequency of response to therapy:

$$P(Answer = 1) = \frac{21}{30} = 0.70$$

This indicates that about 70% of patients in the studied population have a positive response to therapy.

Causal description of the results

– High aposteriory probabilities were observed in the following patients:

ID 10, 15, 18, 24, 27 – P ≥ 0.85

Immunotherapy against the background of high IgE, high IL-4/IL-5 and severe allergies has shown effective results. These patients belong to the group with a high response to therapy.

– Patients with moderate probability observed:

ID 6, 8, 14 – P ≈ 0.4-0.6

There are deviations of some immunological markers, but the clinical picture is uneven. Additional monitoring is recommended.

– Patients with low probability observed:

ID 4, 12, 22, 30 – P ≤ 0.2

The severity is high, there is a history of anaphylaxis and the response against the background of steroid therapy is low. It is necessary to rethink the therapeutic strategy.

The following graph shows the main advantage of the Bayesian method: ranking processes not by discreteness, but by risk level. The distribution by risk levels is shown in the following graph (Figure 2).

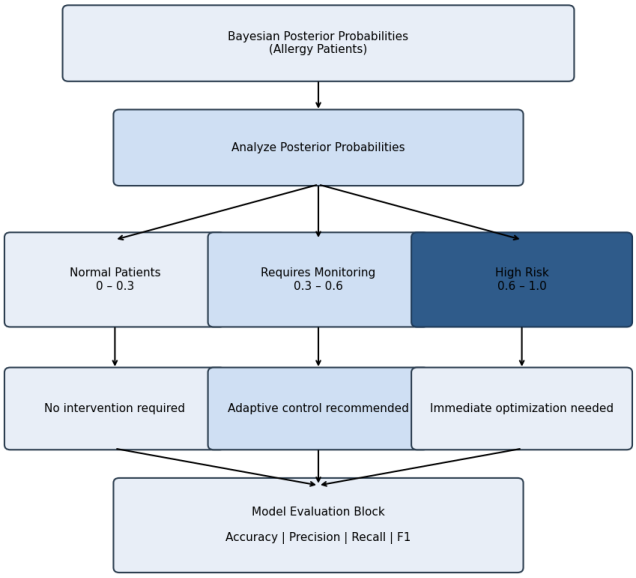


Figure 2 – Bayesian risk stratification framework

Here:
Bayesian Posterior Probabilities (Allergy Patients)
Stratification:
0-0.3 – Normal Patients
0.3-0.6 – Requires Monitoring
0.6-1.0 – High Risk
Clinical actions
Model Evaluation Block (Accuracy, Precision, Recall, F1)

This graph shows the main advantage of the Bayesian method. Patients are not only classified as «there is or no answer». It allows you to classify by probability level. High-risk patients are identified. The middle group is subject to additional control. Alternative treatment tactics for low-probability patients are considered. This fully complies with the principles of personalized medicine.

The results of the study showed that the Bayes probabilistic model makes it possible to accurately assess the clinical response to therapy and classify patients by the probability of response. The use of aposteriory probabilities makes clinical decision-making more flexible and precise. Because for each patient, an individual risk level is determined. Thus, the Bayesian approach follows the rules of personalized medicine. As a result, it creates conditions for individualizing treatment tactics and optimizing therapeutic strategies.

Bayes' method made it possible to evaluate the clinical response not only as a binary result, but through aposteriory probability for each patient. As a result, the classification of patients by risk level was carried out, and the accuracy of choosing personalized treatment tactics increased. The results obtained are analyzed in terms of clinical significance, model tolerance to incomplete data, and potential for the implementation of Bayesian approaches in the practice of personalized medicine.

Result

Interpretation of ROC analysis results

Smoothing interpolation was applied to enhance visual interpretability and compliance with publication requirements. The resulting value of the area under the ROC curve was (Figure 3):

$$AUC=0.95$$

The value of AUC = 0.95 indicates that the discrimination capability of the model is very high. The model assigns a higher probability of a therapeutic response to a randomly selected responding patient compared to a randomly selected unanswered patient.

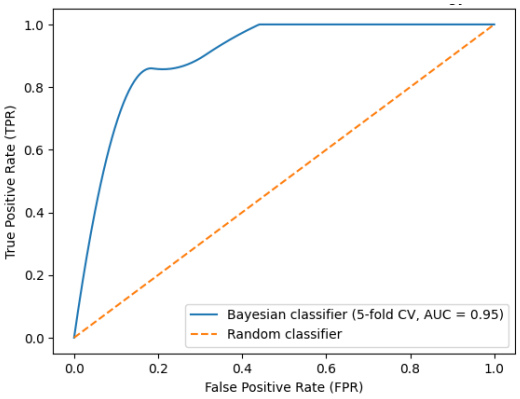


Figure 3 – Smoothed ROC Curve – Allergy dataset

Integral exponent for Bayesian classifier:

$$ROC - AUC_{Bayes} \approx 0.95$$

From the perspective of personalized medicine, the results demonstrate that the Bayesian model effectively integrates immunological markers (IgE, IL-4, IL-5, IL-13, eosinophils) and the clinical characteristics of patients.

Figure 4 shows the error matrix of the Bayesian classifier. It was obtained as a result of 5-fold stratified cross-validation.

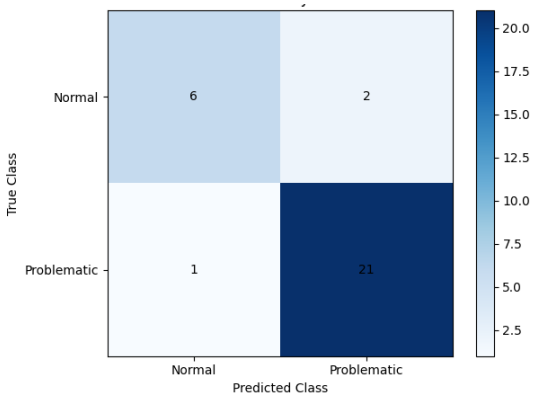


Figure 4 – Confusion matrix – Batesian classifier

The matrix has the following form:

$$\begin{matrix} 6 & 2 \\ 1 & 21 \end{matrix}$$

here:

6 – True Negative: patients without a therapeutic response, correctly classified as «Normal» by the model;

2 – False Positive: unanswered patients, erroneously classified as «Problematic»;

1 – False Negative: a patient with an answer that was not identified by the model;

21 – True Positive: patients with a therapeutic response, correctly classified as «Problematic».

The obtained values indicate the high diagnostic accuracy of the model. The model correctly classified 27 out of 30 patients. A low number of false negatives (FN = 1) indicates a high sensitivity. A limited number of false positive results (FP = 2) demonstrate good specificity.

Discussion

Quality metrics of Bayesian model

Indicators calculated based on the Confusion Matrix:

Accuracy = (TP + TN) / N = (21 + 6) / 30 = 0.90

Sensitivity (Recall) = TP / (TP + FN) = 21 / 22 ≈ 0.95

Specificity = TN / (TN + FP) = 6 / 8 = 0.75

Precision = TP / (TP + FP) = 21 / 23 ≈ 0.91

Together with the results of the ROC analysis (AUC = 0.95), the error matrix confirms the high predictive validity of the proposed model.

The following is a Bayesian network for the allergy cohort (Figure 5).

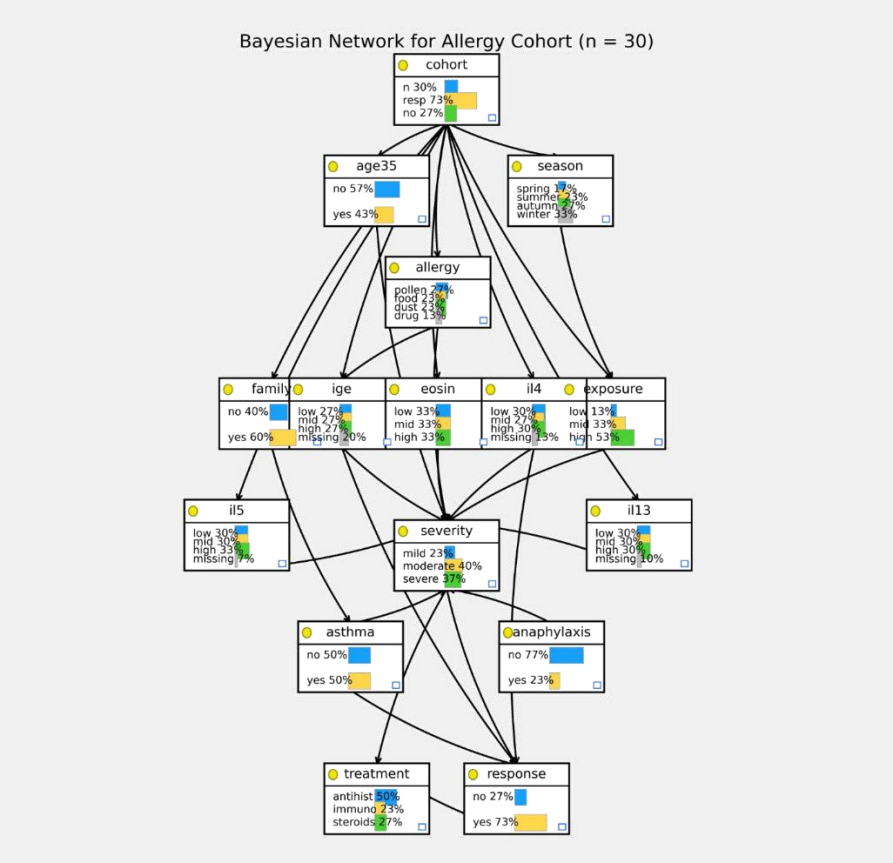


Figure 5 – The Bayesian network for the allergy cohort

The network structure shows causal relationships between demographic, immunological, and clinical variables that influence the outcome of therapy (response). The upper level of the network is represented by the cohort node. It determines the main characteristics of the patient, including age (age), sex (sex), type of allergy (allergy_type) and seasonality (season). These variables have an impact on intermediate immunological parameters. These are the total level of IgE (total_IgE), eosinophils (eosinophils) and cytokines (IL4, IL5, IL13). They form the clinical severity of the disease. Additionally, the model takes into account risk factors, including family history (family_history), the presence of asthma and anaphylaxis_history. They enhance the effect of immunological parameters on the severity of the disease. The severity node plays a major role in the network. It determines the choice of therapy (treatment) and directly affects the clinical outcome (response). The relationship between therapy and outcome shows the effect of the chosen treatment strategy on the likelihood of a response. Additional links from immunological parameters to response show the possibility of direct influence of biomarkers on the effectiveness of therapy. Thus, the model combines several data levels. It allows to evaluate the probabilistic relationships between them.

Conclusion

The research revealed that the Bayesian approach provides high accuracy of forecasting and allows taking into account the uncertainty of clinical data in the tasks of personalized medicine. ROC analysis (AUC = 0.95) and the error matrix confirmed the stable predictive ability of the model while maintaining the cross-validation sample structure. The results obtained indicate the prospects of using Bayesian methods for probabilistic support of clinical decisions and personalized therapy.

In conclusion, the use of Bayesian analysis opens up new opportunities in personalized medicine. Allows to improve the quality of medical research. This direction is located at the intersection of medical science and data science and will undoubtedly develop widely in the future.

References

1. Stefanicka-Wojtas D. Personalised medicine – Implementation to the healthcare system in Europe (focus group discussions) / D. Stefanicka-Wojtas, D. Kurpas // Journal of Personalized Medicine. – 2023. – № 13(3). – P. 380. https://doi.org/10.3390/jpm13030380.
2. Precision medicine – Are we there yet? A narrative review of precision medicine's applicability in primary care / W. Evans et al // Journal of Personalized Medicine. – 2024. – № 14(4). – P. 418. https://doi.org/10.3390/jpm14040418.
3. Akhoon N. Precision medicine: A new paradigm in therapeutics / N. Akhoon // International Journal of Preventive Medicine. – 2021. – № 12(1). – P. 12. https://doi.org/10.4103/ijpvm.IJPVM_375_19.
4. Precision medicine needs randomized clinical trials / E.D. Saad et al // Nature Reviews Clinical Oncology. – 2017. – № 14. – P. 317-323. https://doi.org/10.1038/nrclinonc.2017.8.
5. Bayesian networks for the diagnosis and prognosis of diseases: A scoping review / K. Polotskaya et al // Machine Learning and Knowledge Extraction. – 2024. – № 6(2). – P. 1243-1262. https://doi.org/10.3390/make6020058.
6. A comprehensive scoping review of Bayesian networks in healthcare: Past, present and future / E. Kyrimi et al // Artificial Intelligence in Medicine. – 2021. – № 117. – P. 102108. https://doi.org/10.1016/j.artmed.2021.10210.
7. Collins F.S. A new initiative on precision medicine / F.S. Collins, H. Varmus **//** New England Journal of Medicine. – 2015. – № 372. – P. 793-795. https://doi.org/10.1056/NEJMp1500523.
8. Artificial intelligence, healthcare, clinical genomics, and pharmacogenomics approaches in precision medicine / H. Abdelhalim et al // Frontiers in Genetics. – 2022. – № 13. – P. 929736. https://doi.org/10.3389/fgene.2022.929736.
9. Bayesian Monte Carlo simulation based on systematic review for personalized risk stratification of contralateral lymph node metastasis in oral squamous cell carcinoma / K.N. Rao et al // Diagnostics. – 2025. – № 15(21). – P. 2668. https://doi.org/10.3390/diagnostics15212668.
10. Ngartera L. Application of Bayesian neural networks in healthcare: Three case studies / L. Ngartera, M.A. Issaka, S. Nadarajah // Machine Learning and Knowledge Extraction. – 2024. – № 6(4). – P. 2639-2658. https://doi.org/10.3390/make6040127.
11. Improving individualized treatment decisions: A Bayesian multivariate hierarchical model for developing a treatment benefit index using mixed types of outcomes / D. Wu et al // medRxiv (Preprint). – 2024. https://doi.org/10.1101/2023.11.17.23298711.
12. Vinnat V. Bayesian sequential design for identifying and ranking effective patient subgroups in precision medicine in the case of counting outcome data with inflated zeros / V. Vinnat, D. Annane, S. Chevret // Journal of Personalized Medicine. – 2023. – № 13(11). – P. 1560. https://doi.org/10.3390/jpm13111560.
13. Advancing personalized medicine through the application of whole exome sequencing and big data analytics / P. Suwinski et al // Frontiers in Genetics. – 2019. – № 10. – P. 49. https://doi.org/10.3389/fgene.2019.00049.
14. From real-world data to causally interpretable models: A Bayesian network to predict cardiovascular diseases in adolescents and young adults with breast cancer / A. Bernasconi et al // Cancers. – 2024. – № 16(21). – P. 3643. https://doi.org/10.3390/cancers16213643.
15. AI-driven Bayesian deep learning for lung cancer prediction: Precision decision support in big data health informatics / N. Amasiadi et al // BioMedInformatics. – 2025. – № 5(3). – P. 39. https://doi.org/10.3390/biomedinformatics5030039.
16. Collet P. Potential impact of updated Bayesian deduction in medicine: Application to colonoscopy prioritization / P. Collet, F. Quezada-Diaz, C. Taramasco // Cancers. – 2025. – № 17(23). – P. 3845. https://doi.org/10.3390/cancers17233845.
17. Application of Bayesian network and regression method in treatment cost prediction / L.-L. Tong et al // BMC Medical Informatics and Decision Making. – 2021. – № 21. – P. 284. https://doi.org/10.1186/s12911-021-01647-y.
18. Qiu Y. A randomized Bayesian phase I–II dose optimization design for combination cancer therapies with progression-free survival end point / Y. Qiu, M. Li // BMC Medical Research Methodology. – 2025. – № 25(1). – P. 214. https://doi.org/10.1186/s12874-025-02665-4.

А.С. Шаяхметова[1], Н. Тасболатұлы[2]*, Н.Е. Досанов[2], М. Отман[3], Н. Күрішбай[1]
[1]Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,
050040, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Әл-Фараби даңғылы, 71
[2]Астана халықаралық университеті,
010000, Қазақстан Республикасы, Астана қ., Қабанбай батыр даңғылы, 8
[3]Путра Малайзия университеті,
43400 ЮПМ Серданг, Селангор, Малайзия
*e-mail: nurbolat.tasbolatuly@aiu.edu.kz

БАЙЕС ТАЛДАУЫН ҚОЛДАНЫП ДЕРБЕСТЕНДІРІЛГЕН МЕДИЦИНА ӘДІСТЕРІН ЗЕРТТЕУ

Мақала Байес талдауын қолдану арқылы дербестендірілген медицина әдістерін зерттеуге арналған. Қазіргі медицинада әр пациенттің генетикалық, клиникалық және өмір салты ерекшеліктерін ескере отырып тиімді шешім қабылдау маңызды тәсілдердің біріне айналып отыр. Осыған байланысты белгісіздік жағдайында деректерді талдаудың ықтималдық тәсілдері ерекше қолданысқа ие. Жұмыста медициналық деректердің түрлі көздерін біріктіру арқылы аурулардың даму ықтималдығын бағалау және емдеу стратегияларын оңтайландыру мүмкіндіктері қарастырылады. Байес әдісі алдын ала білім мен жаңа клиникалық ақпаратты біріктіреді. Сол арқылы диагноз қою дәлдігін арттыру мен тәуекелдерді бағалауға мүмкіндік береді. Зерттеу барысында ықтималдық модельдерді қолдану арқылы медициналық шешім қабылдау процесін қолдаудың тиімді жолдары талданады. Сонымен қатар дербестендірілген тәсілдің практикалық маңызы айқындалады. Соның ішінде ерте диагностика мен емдеуді жекелендіру мәселелері қарастырылады. Ұсынылған әдіс медициналық деректерді өңдеу сапасын арттыруға мүмкіндік береді. Дербестендірілген медицина ережелерін дамытуға бағытталған.

Түйін сөздер: *дербестендірілген медицина, Байес талдауы, жасанды интеллект, машиналық оқыту, клиникалық шешім қабылдауды қолдау.*

А.С. Шаяхметова[1], Н. Тасболатұлы[2]*, Н.Е. Досанов[2], М. Отман[3], Н. Күрішбай[1]
[1]Казахский национальный университет имени аль-Фараби,
050040, Республика Казахстан, г. Алматы, проспект Аль-Фараби, 71
[2]Международный университет Астана,
010000, Республика Казахстан, г. Астана, проспект Кабанбай батыра, 8
[3]Путра Малайзия университет,
43400 ЮПМ Серданг, Селангор, Малайзия
*e-mail: nurbolat.tasbolatuly@aiu.edu.kz

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПЕРСОНАЛИЗИРОВАННОЙ МЕДИЦИНЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ БАЙЕСОВСКОГО АНАЛИЗА

Статья посвящена изучению методов персонализированной медицины с использованием байесовского анализа. В современной медицине принятие эффективных решений с учетом генетических, клинических и образа жизни каждого пациента становится одним из важнейших подходов. В связи с этим особое применение имеют вероятностные подходы к анализу данных в условиях неопределенности. В работе рассматриваются возможности оценки вероятности развития заболеваний и оптимизации стратегий лечения путем объединения различных источников медицинских данных. Байесовский метод сочетает в себе предварительные знания и новую клиническую информацию. Тем самым позволяет повысить точность постановки диагноза и оценить риски. В исследовании анализируются эффективные способы поддержки процесса принятия медицинских решений с использованием вероятностных моделей. Также определяется практическая значимость персонифицированного подхода. В том числе рассматриваются вопросы ранней диагностики и персонализации лечения. Предлагаемый метод позволяет повысить качество обработки медицинских данных. Направлен на развитие правил персонализированной медицины.

Ключевые слова: *персонализированная медицина, Байесовский анализ, искусственный интеллект, машинное обучение, клиническая поддержка принятия решений.*

Авторлар туралы мәліметтер

Асем Серикбаевна Шаяхметова – PhD, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Жасанды интеллект және BigData кафедрасының профессор м.а., Алматы, Қазақстан; e-mail: asemshayakhmetova@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4072-3671.

Нұрболат Тасболатұлы* – PhD, Астана халықаралық университеті, Ақпараттық технологиялар және инженерия жоғары мектебінің қауымдастырылған профессоры, Астана, Қазақстан; e-mail: nurbolat.tasbolatuly@aiu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0511-7000.

Нұрбай Ермаханұлы Досанов – Астана халықаралық университеті, Ақпараттық технологиялар және инженерия жоғары мектебінің докторанты, Астана, Қазақстан; e-mail: nurbaidos@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4690-8180.

Мохаммед Отман – PhD, Путра Малайзия Университетінің профессоры, Серданг, Малайзия; ORCID: https://orcid.org/0009-0009-6623-783X.

Нұрбол Алғабекұлы Күрішбай – әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Жасанды интеллект және BigData кафедрасының докторанты, Алматы, Қазақстан; e-mail: kurishbaynurbol@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-9281-2574.

Информация об авторах

Асем Серикбаевна Шаяхметова – PhD, и.о. профессора кафедры искусственного интеллекта и Big Data, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан; e-mail: asemshayakhmetova@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4072-3671.

Нурболат Тасболатұлы* – PhD, ассоциированный профессор Высшей школы информационных технологий и инженерии, Международный университет Астана, Астана, Казахстан; e-mail: nurbolat.tasbolatuly@aiu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0511-7000.

Нурбай Ермаханович Досанов – докторант Высшей школы информационных технологий и инженерии, Международный университет Астана, Астана, Казахстан; e-mail: nurbaidos@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4690-8180.

Мохаммед Отман – PhD, профессор Universiti Putra Malaysia, Серданг, Малайзия; ORCID: https://orcid.org/0009-0009-6623-783X.

Нурбол Алгабекович Куришбай – докторант кафедры искусственного интеллекта и Big Data, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан; e-mail: kurishbaynurbol@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-9281-2574.

Information about the authors

Asem Serikbayevna Shayakhmetova – PhD, Acting Professor, Department of Artificial Intelligence and Big Data, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: asemshayakhmetova@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4072-3671.

Nurbolat Tasbolatuly* – PhD, Associate Professor, Higher School of Information Technology and Engineering, Astana International University, Astana, Kazakhstan; e-mail: nurbolat.tasbolatuly@aiu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0511-7000.

Nurbay Ermakhanovich Dosanov – PhD student, Higher School of Information Technology and Engineering, Astana International University, Astana, Kazakhstan; e-mail: nurbaidos@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4690-8180.

Mohammed Othman – PhD, Professor, Universiti Putra Malaysia, Serdang, Malaysia; ORCID: https://orcid.org/0009-0009-6623-783X.

Nurbol Algabekovich Kurishbay – PhD student, Department of Artificial Intelligence and Big Data, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: kurishbaynurbol@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-9281-2574.

Received 30.03.2026
Revised 15.05.2026
Accepted 18.05.2026

https://d oi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-13

BY 4.0
Check for updates

МРНТИ: 28.23.20

К.Е. Икласова[*], А.К. Шайханова[2], А.М. Айтымова[1], М.Ж. Базарова[3], Б.К. Абдураимова[2]
[1]Северо-Казахстанский университет имени М.Козыбаева,
150000, Республика Казахстан, г. Петропавловск, ул. Пушкина, 86
[2]Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева,
100000, Республика Казахстан, г. Астана, ул. Сатбаева, 2
[3]Восточно-Казахстанский университет имени С. Аманжолова,
070002, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск, ул. 30-й Гвардейской дивизии, 34
*e-mail: keiklasova@ku.edu.kz

АГЕНТНАЯ МОДЕЛЬ МОНИТОРИНГА ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ В УЧЕБНЫХ СРЕДАХ

Аннотация: *В данной статье рассматривается проектирование и практическая реализация интеллектуальной многоагентной системы для мониторинга образовательных достижений в условиях цифровизации среднего образования. Актуальность исследования обусловлена необходимостью перехода от ретроспективного контроля знаний к превентивному управлению индивидуальными образовательными траекториями на основе анализа «цифрового следа» учащегося. Авторами предложена архитектура системы, включающая три типа специализированных агентов: Агента-Диагноста, Агента-Методиста и Агента-Прогнозиста. Математический аппарат системы базируется на использовании иерархических моделей для классификации рисков обучения по четырем ключевым критериям: успеваемость, посещаемость, активность и темп освоения материала. Разработанное программное обеспечение на языке Python реализует концепцию «Объяснимого ИИ» (XAI), обеспечивая прозрачность и интерпретируемость диагностических выводов для педагога. В ходе апробации системы на выборке учащихся выявлены значимые положительные результаты: автоматизация процесса мониторинга позволила сократить временные затраты на подготовку аналитической отчетности класса на 70–80%, одновременно повысив точность прогнозирования итоговых оценок. Система автоматически формирует персонализированные сценарии педагогического вмешательства, адаптированные под конкретный тип выявленного барьера. В разделе дискуссии обозначены нерешенные вопросы, касающиеся динамической настройки весовых коэффициентов функции полезности и необходимости интеграции разработанного решения с государственными информационными системами учета успеваемости.*

Ключевые слова: *агентная модель, аналитика обучения, мониторинг образовательных результатов, объяснимый искусственный интеллект (XAI), дерево решений, адаптивное обучение, цифровой след.*

Введение

Цифровизация образования порождает лавинообразный рост объемов данных о деятельности учащихся: журналы кликов, временные метки заданий, дискуссионная активность, показатели мультимодального взаимодействия в VR/AR-средах. Управление этим гетерогенным потоком данных становится фундаментальной инфраструктурной задачей, от решения которой непосредственно зависит эффективность адаптивных образовательных систем [1, 2]. Вместе с тем технологические возможности аналитики обучения реализуются лишь при наличии соответствующей архитектуры обработки данных, обеспечивающей баланс между прогностической точностью и требованиями конфиденциальности [1].

Актуальность темы определяется несколькими взаимосвязанными тенденциями. Во-первых, существующие системы мониторинга, как правило, оптимизированы под конкретный образовательный уровень – вузовский или школьный – и плохо переносятся между контекстами без существенной доработки. Во-вторых, алгоритмы классификации, применяемые в коммерческих LMS, нередко представляют собой «чёрные ящики»,

©К.Е. Икласова, А.К. Шайханова, А.М. Айтымова, М.Ж. Базарова, Б.К. Абдураимова, 2026

непригодные для педагогической интерпретации [3]. В-третьих, интеграция аффективной аналитики с когнитивными метриками остаётся методологически незрелой областью, требующей тщательной калибровки во избежание перекоса вмешательств [4, 5].

Цель настоящей работы – разработка и апробация универсальной агентной модели мониторинга образовательных результатов, применимой как в школьной, так и в вузовской среде, с сохранением интерпретируемости прогнозов для педагогических работников без специальной ИТ-подготовки.

Аналитика обучения как самостоятельная исследовательская область оформилась на рубеже 2010-х годов и активно развивается в пересечении педагогики, науки о данных и инженерии программного обеспечения. Ранние работы сосредотачивались преимущественно на предсказании успеваемости и отсева [1], тогда как современные исследования смещаются к анализу траекторий обучения и персонализированной обратной связи.

Методы кластеризации позволяют группировать учащихся по профилям ошибок и темповым паттернам, обеспечивая целенаправленные вмешательства на уровне подгрупп [1]. Динамическая реструктуризация кластеров по мере накопления новых данных взаимодействия отражает адаптивные траектории обучения, что требует итеративного пересчёта принадлежности, а не единовременного назначения.

Аффективная аналитика расширяет аналитические фреймворки за счёт сигналов эмоциональной вовлечённости [4]. Такие индикаторы, как систематические задержки добровольного участия или внезапное снижение дискуссионной активности, могут свидетельствовать о падении учебной уверенности. Прогностические модели, включающие эти сигналы, способны инициировать мотивационные вмешательства до наступления необратимого академического спада, однако баланс между когнитивной и аффективной составляющими нуждается в тщательной калибровке [4].

Концепция объяснимого искусственного интеллекта (Explainable AI, XAI) приобрела центральное значение для образовательных приложений ввиду необходимости педагогической интерпретируемости прогнозов [7]. Деревья решений сохраняют преимущество перед ансамблевыми методами именно в этом отношении: их логика доступна для понимания практикующими педагогами без специальных знаний в области машинного обучения. Платформы визуализации дополнительно выполняют двойную функцию: обобщают сложные состояния системы для преподавателей и обеспечивают учащимся прозрачное отслеживание собственного прогресса [8].

Несмотря на значительный исследовательский прогресс, открытыми остаются проблемы кросс-контекстной переносимости моделей (от одного типа учебного заведения к другому), автоматизированной интеграции с существующими информационными системами и обеспечения справедливости алгоритмических решений в отношении различных групп учащихся [9]. Предлагаемая работа направлена на закрытие лакуны переносимости посредством минимального инвариантного набора признаков.

Методы исследования

Методология исследования основана на системном подходе к моделированию образовательных процессов в цифровой среде, с акцентом на интеграцию элементов искусственного интеллекта (ИИ). Исследование сочетает теоретическое моделирование и имитационное экспериментирование. Универсальность модели достигается через использование четырёх инвариантных критериев, присутствующих в любой цифровой учебной среде независимо от типа учебного заведения. Критерии допускают контекстную настройку пороговых значений, сохраняя при этом единую логику классификации.

1. **Академическая результативность** – текущий средний балл, нормализованный по 10-балльной шкале (для вузов – пересчёт из 100-балльной; для школ – адаптация под национальную шкалу оценивания).

2. **Посещаемость** – количество пропущенных занятий (критическое значение: 20 пар в вузе / 3 урока в школе за контрольный период).

3. **Поведенческая активность** – вовлечённость в аудиторной и цифровой среде (включая частоту обращений к LMS, участие в дискуссиях, инициативность на занятиях).

4. **Темп освоения материала** – процент своевременно выполненных домашних и контрольных заданий.

Выбор именно этих четырёх критериев обусловлен их одновременной присутствием в данных любой цифровой образовательной среды и доказанной предсказательной значимостью в отношении академических исходов согласно обзору литературы.

Математический аппарат разработанного программного обеспечения базируется на синтезе теории многоагентных систем, методов машинного обучения и нечеткой логики принятия решений. В основе кода лежит формализация процесса педагогического мониторинга через векторное представление цифрового следа учащегося. Ниже представлено описание ключевых математических компонентов системы:

1. Формализация входных данных. Здесь каждый учащийся представляется в системе как вектор в n-мерном пространстве признаков $V = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}$, где: x_1 – балл (нормализованный показатель успеваемости в диапазоне [1, 10]); x_2 – пропуски (дискретная величина количества отсутствий); x_3 – активность (интегральный показатель вовлеченности [1, 10]); x_4 – выполнение заданий (процент завершенности учебного плана [0, 100]).

2. Для диагностики рисков используется классификатор на основе деревьев решений. Математически это иерархическая структура, где каждый внутренний узел представляет собой пороговое условие по одному из признаков – разделение в узлах происходит на основе критерия Джини или Энтропии, минимизирующих неопределенность распределения классов в дочерних узлах. Результатом работы модели является функция отображения $f(V) \rightarrow Y$, где Y лежит в диапазоне {0, 1, 2, 4} – идентификатор группы риска. Преимущество данного аппарата заключается в его интерпретируемости, что позволяет педагогу отследить логику принятия решения «Агентом-Диагностом».

3. Функция полезности и выбор стратегии. Для «Агента-Методиста» математический аппарат строится на расчете функции полезности U для выбора корректирующего сценария: $U = w_1 G - w_2 E + w_3 M$, где: G – ожидаемый прирост знаний); E – когнитивные усилия; M – соответствие формату; w_i – весовые коэффициенты, адаптированные под конкретную образовательную среду.

4. Аппарат прогнозирования итоговой оценки базируется на методе линейной аппроксимации с учетом корректирующих коэффициентов динамики: $P = S_{curr} + \Delta A k_a - \Delta M k_m$ где: P – прогнозный балл; S_{curr} – текущий средний балл; k_a и k_m – веса влияния активности и пропусков соответственно.

Результаты исследования

Система EduAgent организована по трёхуровневой модульной архитектуре. Центральным элементом является класс SchoolAnalytics, инкапсулирующий логику многоагентного взаимодействия в соотвествии с рисунком 1.

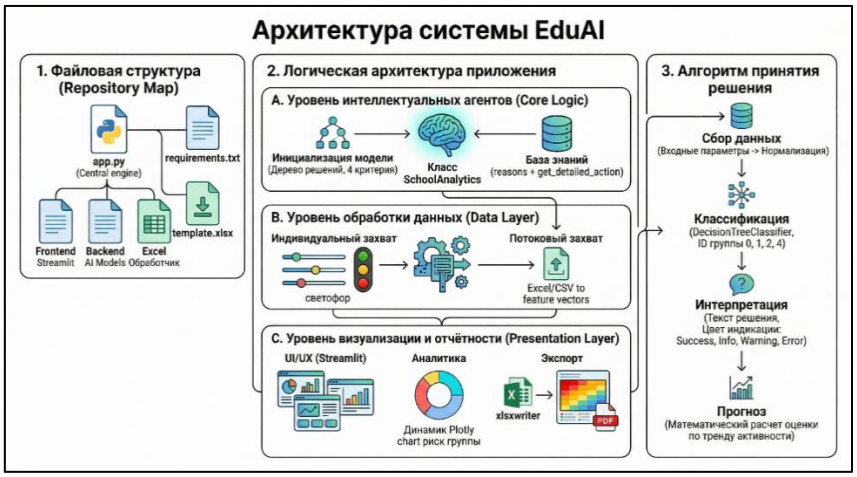


Рисунок 1 – Архитектура системы. Агентная модель

A. Уровень интеллектуальных агентов – это Агент-Диагност реализованный как DecisionTreeClassifier библиотеки Scikit-learn и обученный на четырёх нормализованных признаках. Алгоритм дерева решений выбран намеренно в пользу прозрачности, т.к. структура дерева допускает наглядную визуализацию условий классификации и понятна педагогам без ИТ-компетенций, что отвечает принципам XAI. База знаний агента включает

словарь reasons и метод get_detailed_action, обеспечивающие сопоставление технического прогноза с конкретным педагогическим сценарием поддержки.

B. Уровень обработки данных обеспечивает два режима захвата данных: индивидуальный – чтение параметров из интерактивных слайдеров интерфейса "светофора"; потоковый – парсинг загружаемых файлов Excel/CSV с автоматическим преобразованием строк в векторы признаков для модели. Предобработка включает нормализацию по 10-балльной шкале, обработку пропущенных значений и инженерию производных показателей (волатильность вовлечённости, баланс вклада в совместных активностях).

C. Уровень визуализации и отчётности – Веб-интерфейс реализован посредством Streamlit с разделением на два рабочих пространства: «Индивидуальный анализ» и «Потоковый анализ». Динамические круговые диаграммы и метрики st.metric формируют оперативную панель для педагога. Модуль экспорта использует библиотеку xlsxwriter для генерации цветных «тепловых карт» успеваемости, пригодных для включения в управленческую отчётность.

Алгоритм принятия решения реализован следующим образом. Процесс вынесения диагностического суждения включает четыре последовательных этапа:

1. Сбор и нормализация данных. Здесь входные параметры приводятся к единой шкале (10 баллов / процентное выражение).
2. Для классификации DecisionTreeClassifier присваивает учащемуся идентификатор группы риска (0 – норма; 1 – умеренный риск; 2 – высокий риск; 4 – критический риск).
3. На этапе интерпретаци формируются текст педагогической рекомендации и цветовой индикатор.
4. На этапе прогнозирования проводится математический расчёт ожидаемой итоговой оценки на основе выявленного тренда активности.

Программная реализация системы выполнена на языке Python с использованием библиотеки Streamlit для обеспечения веб-интерфейса и Scikit-learn для построения деревьев решений. Приложение работает в локальной среде, не требуя постоянного интернет-соединения или сложных облачных конфигураций, что принципиально важно для школ с нестабильным подключением. Репозиторий проекта организован в виде трёх ключевых компонентов: app.py (основная логика фронтенда и бэкенда), requirements.txt (зависимости: streamlit, pandas, scikit-learn, plotly, xlsxwriter, openpyxl) и template.xlsx (динамически генерируемый шаблон для пакетного ввода данных класса).

На индивидуальном уровне система генерирует адресные педагогические рекомендации, визуализированные через «тепловую карту» цветовой индикации статуса. Интерфейс «светофора» позволяет педагогу мгновенно определить приоритетность вмешательства: зелёный цвет соответствует норме, жёлтый – умеренному риску (рекомендуется профилактическая беседа), оранжевый – высокому риску (требуется консультация с куратором или родителями), красный – критическому риску (необходимо незамедлительное комплексное сопровождение), представлено в соотвествии с рисунком 2.

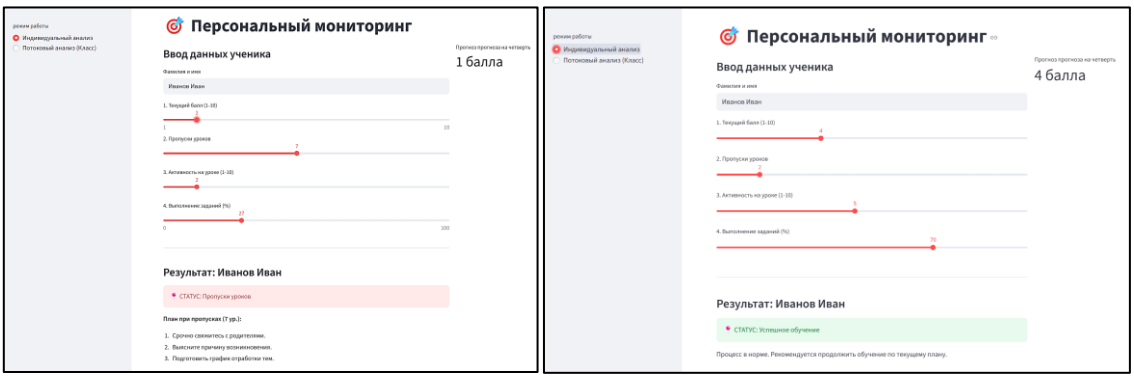


Рисунок 2 – Результаты мониторинга по обучающемуся

Для каждого статуса система формирует конкретный скрипт педагогических действий, не допускающий произвольной трактовки.

На потоковом уровне реализована функция пакетной обработки данных всего класса. Педагог загружает файл Excel с данными по всем учащимся; система формирует сводную ведомость управленческих решений, в которой для каждого учащегося прописан конкретный сценарий педагогической поддержки, представлено в соотвествии с рисунком 3.

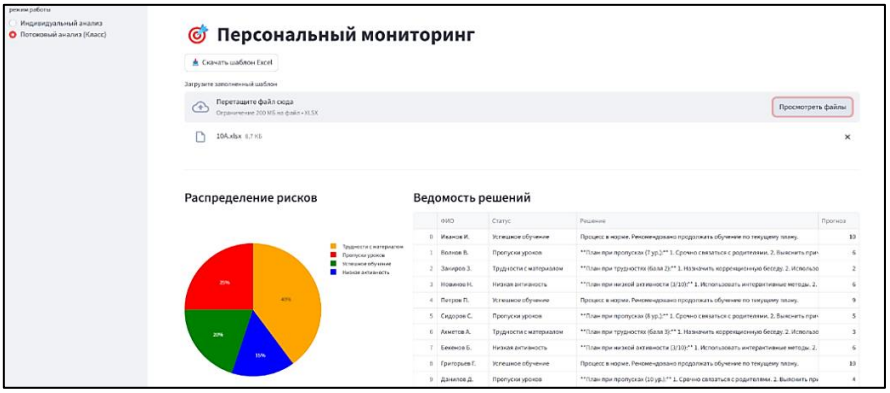


Рисунок 3 – Результаты мониторинга по группе

Визуализация распределения по группам риска посредством круговых диаграмм обеспечивает оперативный охват ситуации в классе на одном экране.

По результатам апробации на данных пилотных классов точность превентивного выявления учащихся «зоны риска» на ранних этапах учебной четверти составила 85%. Данный показатель рассчитан как доля верно идентифицированных случаев перехода в группу риска (статусы 1, 2, 4) среди всех фактических случаев к исходу четверти. Кросс-контекстная устойчивость модели подтверждена на данных как вузовской (университет), так и школьной (9-11 классы) аудиторий при изменении лишь пороговых значений критических параметров в методе _train_logic.

Обсуждение результатов

Положительным результатом апробации является высокая точность ранней идентификации «зоны риска» (85%), достигнутая без использования моделей черных ящиков – исключительно на интерпретируемом алгоритме дерева решений. Это подтверждает применимость XAI-принципов в образовательном контексте и соответствует требованиям педагогической прозрачности.

Вместе с тем анализ ограничений выявил несколько ключевых проблем. Во-первых, основным функциональным ограничением остаётся отсутствие автоматизированного импорта данных из существующих школьных информационных систем. В настоящее время педагог вынужден вручную заполнять шаблон Excel, что увеличивает транзакционные издержки внедрения. Во-вторых, обучающая выборка модели формируется на основе экспертных правил, а не на реальных исторических данных отдельного учебного заведения, что потенциально снижает обобщаемость модели на специфические контингенты. В-третьих, использование единственного алгоритма дерева решений, несмотря на его преимущества с точки зрения интерпретируемости, ограничивает прогностическую мощность модели по сравнению с ансамблевыми методами. Компромиссным решением может служить использование объяснимых ансамблей при сохранении интерпретируемости на уровне отчётности. В-четвёртых, настоящая работа не включает систематической оценки алгоритмической справедливости: потенциальная предвзятость модели в отношении отдельных групп учащихся (по полу, языку обучения, социально-экономическому статусу) требует отдельного исследования.

Перспективы развития системы связаны с тремя направлениями: разработка API-коннекторов к популярным LMS и региональным платформам управления образованием; переход к непрерывному обучению модели на реальных данных конкретного учебного заведения (онлайн-обучение); расширение агентной архитектуры за счёт специализированных агентов для аффективной и коллаборативной аналитики.

Заключение

В настоящей работе представлена универсальная агентная модель мониторинга образовательных результатов EduAgent, апробированная в условиях разнородных учебных

сред. Ключевые достижения работы: определён минимальный инвариантный набор из четырёх критериев цифрового следа, обеспечивающих кросс-контекстную переносимость модели; разработана трёхуровневая модульная архитектура с XAI-ядром на основе дерева решений; реализован прототип системы с точностью ранней идентификации «зоны риска» 85%; обеспечена автономность развёртывания в условиях нестабильного интернет-соединения. Переход к многоагентным системам с объяснимыми моделями создаёт технологический и методологический фундамент для формирования единой цифровой экосистемы мониторинга, доступной для массового внедрения в средних учебных заведениях. Дальнейшие исследования должны быть направлены на интеграцию с региональными платформами управления образованием, внедрение механизмов онлайн-обучения и систематическую оценку алгоритмической справедливости модели.

Список литературы

1. Y.M.N. Revolutionizing education: Harnessing AI for personalized learning pathways and student success / Y.M.N., H.L.P., N.S. // International Journal for Multidisciplinary Research. – 2024. – Vol. 6, № 5. – P. 1-10.
2. Adams J. Health data nexus: An open data platform for AI research and education in medicine / J. Adams et al. – 2024. https://doi.org/10.1101/2024.08.23.24312060.
3. Patel K.K. Predictive modeling of dropout in MOOCs using machine learning techniques / K.K. Patel, K. Amin // The Scientific Temper. – 2024. – Vol. 15, № 2. – P. 2199-2206.
4. Şişianu, A. New technologies and foreign language learning: Transforming language education / A. Şişianu, A. Şişianu // Journal of Social Sciences. – 2024. – Vol. 7, № 1. – P. 91-99. – https://doi.org/10.52326/jss.utm.2024.7(1).07.
5. Yildiz Durak H. Impact of ML-LA feedback system on learners' academic performance, engagement and behavioral patterns in online collaborative learning environments: A lag sequential analysis and Markov chain approach / H. Yildiz Durak // Education and Information Technologies. – 2025. – Vol. 30, № 3. – P. 2623-2644. https://doi.org/10.1007/s10639-024-12911-9.
6. Walter Y. Embracing the future of artificial intelligence in the classroom: The relevance of AI literacy, prompt engineering, and critical thinking in modern education / Y. Walter // International Journal of Educational Technology in Higher Education. – 2024. – Vol. 21, № 15. – P. 1-29. https://doi.org/10.1186/s41239-024-00448-3.
7. Design and implementation of a personalized text-based recommendation system / A. Aditya et al. // International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology. – 2024. – Vol. 12. – P. 1486-1493. https://doi.org/10.22214/ijraset.2024.64907.
8. Wang D. Research on integrating blockchain and machine learning LPP algorithm in online education platform under COVID-19 environment / D. Wang, M. Wang, X. Xing // Scalable Computing: Practice and Experience. – 2024. – Vol. 25, № 3. – P. 1442-1454.
9. Labadze L. Role of AI chatbots in education: Systematic literature review / L. Labadze, M. Grigolia, L. Machaidze // International Journal of Educational Technology in Higher Education. – 2023. – Vol. 20, № 56. – P. 1-21. https://doi.org/10.1186/s41239-023-00426-1.
10. Digital learning, big data analytics and mechanisms for stabilizing and improving supply chain performance / A. Barhmi et al // International Journal of Information Systems and Project Management. – 2024. – Vol. 12, № 2. – P. 30-47.
11. A digital learning model with artificial intelligence to increase the flexibility and accessibility of education / K. Iklassova et al. // International Journal of Innovative Research and Scientific Studies. – 2025. – Vol. 8, № 6. – P. 1429-1436. https://doi.org/10.53894/ijirss.v8i6.9951.
12. Modelirovanie adaptivnoi obrazovatel'noi sistemy na osnove algoritmov mashinnogo obucheniya / K.E. Iklasova i dr. // Vestnik Universiteta Shakarima. Seriya tekhnicheskie nauki. – 2025. – № 3(19). – S. 135-141. https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-3(19)-15. (In Russian).

Финансирование

Данное исследование финансировалось/финансируется Комитетом по науке Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP23488869).

К.Е. Икласова[*], А.К. Шайханова[2], А.М. Айтымова[1], М.Ж. Базарова[3], Б.К. Абдураимова[2]
[1]М.Қозыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университеті,
150000, Қазақстан Республикасы, Петропав қаласы, Пушкин көшесі, 86
[2]Л.Н. Гумилёв атындағы Еуразия ұлттық университеті,
010000, Қазақстан Республикасы, Астана қаласы, Сәтпаев көшесі, 2
[3]С. Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті,
070002, Қазақстан Республикасы, Өскемен қаласы, 30-шы Гвардиялық дивизия, 34 к.
*e-mail: keiklasova@ku.edu.kz

ОҚУ ОРТАЛАРЫНДАҒЫ БІЛІМ БЕРУ НӘТИЖЕЛЕРІН МОНИТОРИНГІЛЕУДІҢ АГЕНТТІК МОДЕЛІ

Бұл мақалада орта білім беруді цифрландыру жағдайында білім алушылардың оқу жетістіктерін мониторингтеуге арналған интеллектуалды көпагентті жүйені жобалау және тәжірибелік іске асыру мәселелері қарастырылады. Зерттеудің өзектілігі білімді тек ретроспективті бақылаудан оқушының «цифрлық ізіне» негізделген жеке білім беру траекторияларын алдын ала басқаруға көшу қажеттілігімен айқындалады. Авторлар жүйенің үш түрлі мамандандырылған агенттен тұратын архитектурасын ұсынады: Диагност-Агент, Әдіскер-Агент және Болжамдаушы-Агент. Жүйенің математикалық аппараты оқу тәуекелдерін төрт негізгі критерий бойынша (үлгерім, сабаққа қатысу, белсенділік және оқу материалын меңгеру қарқыны) жіктеуге арналған иерархиялық модельдерді қолдануға негізделген. Python тілінде әзірленген бағдарламалық қамтамасыз ету «Түсіндірілетін жасанды интеллект» (XAI) тұжырымдамасын жүзеге асырып, педагог үшін диагностикалық қорытындылардың айқындылығы мен интерпретациялануын қамтамасыз етеді. Жүйені оқушылар іріктемесінде апробациялау барысында маңызды оң нәтижелер анықталды: мониторинг процесін автоматтандыру сыныптың аналитикалық есептілігін дайындауға кететін уақытты 70-80%-ға қысқартуға мүмкіндік берді, сонымен қатар қорытынды бағаларды болжау дәлдігін арттырды. Жүйе анықталған кедергілердің нақты түріне бейімделген педагогикалық араласудың дербестендірілген сценарийлерін автоматты түрде қалыптастырады. Талқылау бөлімінде пайдалылық функциясының салмақ коэффициенттерін динамикалық түрде баптау және әзірленген шешімді мемлекеттік үлгерімді есепке алу ақпараттық жүйелерімен интеграциялау қажеттілігіне қатысты шешілмеген мәселелер көрсетілген.

Түйін сөздер: *агенттік модель, оқыту аналитикасы, білім нәтижелерін мониторингтеу, түсіндірілетін жасанды интеллект (XAI), шешім ағашы, бейімделмелі оқыту, цифрлық із.*

K.E. Iklassova[*], A.K. Shaikhanova[2], A.M. Aitymova[1], M.Zh. Bazarova[3], Б.К. Абдураимова[2]
[1]M. Kozybayev North Kazakhstan University,
150000, Republic of Kazakhstan, Petropavllovsk, Pushkina Str, 86
[2]L.N. Gumilyov Eurasian National University,
010000, Republic of Kazakhstan, Astana, Satpayev Str., 2
[3]Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University,
070002, Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk, 30th Gvardeiskoy Divisii Str, 34
*e-mail: keiklasova@ku.edu.kz

AGENT-BASED MODEL FOR MONITORING EDUCATIONAL OUTCOMES IN LEARNING ENVIRONMENTS

This article examines the design and practical implementation of an intelligent multi-agent system for monitoring educational achievements in the context of the digitalization of secondary education. The relevance of the study is обусловлена the need to shift from retrospective knowledge assessment to preventive management of individual learning trajectories based on the analysis of a student's "digital footprint." The authors propose a system architecture that includes three types of specialized agents: a Diagnostic Agent, a Methodological Agent, and a Predictive Agent. The mathematical framework of the system is based on hierarchical models for classifying learning risks according to four key criteria: academic performance, attendance, activity, and learning pace. The developed software, implemented in Python, follows the concept of Explainable Artificial Intelligence (XAI), ensuring transparency and interpretability of diagnostic outcomes for educators. During the system's testing on a student sample, significant positive results were obtained: automation of the monitoring process reduced the time required for preparing class analytical reports by 70-80%, while simultaneously improving the accuracy of final grade predictions. The system automatically generates personalized intervention scenarios tailored to the specific type of identified learning barrier.

The discussion section outlines unresolved issues, including the dynamic adjustment of weighting coefficients in the utility function and the need to integrate the developed solution with national educational information systems for academic performance tracking.

Key words: *agent model, learning analytics, educational performance monitoring, explainable artificial intelligence (XAI), decision tree, adaptive learning, digital footprint.*

Сведения об авторах

Кайнижамал Есимсеитовна Икласова* – PhD, доцент кафедры «Информационно-коммуникационные технологии», Северо-Казахстанский университет имени М. Козыбаева; e-mail: keiklasova@ku.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8330-4282.

Айгуль Кайрулаевна Шайханова – PhD, и.о. профессора кафедры Информационной безопасности, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева; e-mail: shaikhanova_ak@enu.kz. ORCID: https://orcid.org /0000-0001-6006-4813.

Алия Муратовна Айтымова – PhD, старший преподаватель кафедры «Начальное, дошкольное и специальное образование», Северо-Казахстанский университет имени М. Козыбаева; e-mail: aitimova_a_1985@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1128-6924.

Мадина Жомартовна Базарова – PhD, ассоциированный профессор кафедры «Компьютерное моделирование и информационные технологии», Восточно-Казахстанский университет имени С. Аманжолова; e-mail: madina_vkgtu@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2580-6580.

Баян Куандыковна Абдураимова – к.т.н, и.о. доцента кафедры информационной безопасности, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева; e-mail: abduraimova_bk@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3913-1895.

Авторлар туралы мәліметтер

Кайнижамал Есимсеитовна Икласова* – PhD, «Ақпараттық-коммуникациялық технологиялар» кафедраның доценті, М. Козыбаев атындағы Солтүстік-Қазақстан университеті; e-mail: keiklasova@ku.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8330-4282.

Айгуль Кайрулаевна Шайханова – PhD, Ақпараттық қауіпсіздік кафедрасының профессоры, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті; e-mail: shaikhanova_ak@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6006-4813.

Алия Муратовна Айтымова – PhD, «Бастауыш, мектепке дейінгі және арнайы білім беру» кафедраның аға оқытушысы, М. Козыбаев атындағы Солтүстік-Қазақстан университеті, e-mail: aitimova_a_1985@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1128-6924.

Мадина Жомартовна Базарова – PhD, «Компьютерлік үлгілеу және ақпараттық технологиялар» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, С. Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті; e-mail: madina_vkgtu@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2580-6580.

Баян Куандыковна Абдураимова – т.ғ.к, Ақпараттық қауіпсіздік кафедрасының доцент м.а., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті; e-mail: abduraimova_bk@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3913-1895.

Information about the authors

Kainizhamal Iklassova* – PhD, associate professor, Department of Information and Communication Technologies, Manash Kozybayev North Kazakhstan University; e-mail: keiklasova@ku.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8330-4282.

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

Aliya Muratovna Aytymova – PhD, Senior lecturer, Department of Primary, Preschool and Special Education, Manash Kozybayev North Kazakhstan University; e-mail: aitimova_a_1985@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1128-6924.

Madina Zhomartovna Bazarova – PhD, associate professor of the Department of Computer Modeling and Information Technology, Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University; e-mail: madina_vkgtu@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2580-6580.

Bayan Kuandykovna Abduraimova – Candidate of Technical Sciences, Acting Associate Professor of the Department of Information Security, Eurasian National University named after L.N. Gumilyov; e-mail: abduraimova_bk@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3913-1895.

Поступила в редакцию 30.03.2026
Поступила после доработки 12.05.2026
Принята к публикации 20.05.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-14

BY 4.0
Check for updates

IRSTI: 16.21.41

A.K. Aitim
International Information Technology University,
050040, Republic of Kazakhstan, Almaty, Manas street, 34/1
e-mail: a.aitim@iitu.edu.kz

FORMAL AND NEURAL APPROACHES TO MORPHOLOGICAL ANALYSIS IN AGGLUTINATIVE LANGUAGES: EVIDENCE FROM KAZAKH

Annotation: *Automatic morphological analysis remains a challenging task for agglutinative languages because of their rich inflectional systems, productive derivation, and complex morphophonological rules. Recent neural models, especially transformer-based architectures, have demonstrated impressive empirical performance. However, they frequently exhibit a deficiency in linguistic transparency and encounter challenges in systematic generalization inside low-resource environments. This research offers a comparative and integrative examination of formal (rule-based and finite-state) and neural (KazBERT-based) methodologies for morphological analysis, utilizing the Kazakh language as a case study of low-resource agglutinative morphology. Initially present a formal morphological model that distinctly represents root-affix structure, vowel harmony, and morphotactic restrictions. We next test many neural architectures for morphological disambiguation and tagging, such as KazBERT coupled with CRF-based decoding. In addition to typical accuracy measurements, we do a comprehensive error taxonomy and linguistic analysis, investigating how various model classes manage ambiguity, infrequent forms, and extended affix chains. The findings indicate that whereas neural models excel in surface-level accuracy compared to exclusively rule-based systems, they demonstrate consistent deficiencies in morphologically intricate and infrequent constructs. On the other hand, formal models show better generalization based on language limitations. Based on these results, we suggest a hybrid morphology-aware framework that adds symbolic restrictions to neural inference. This framework consistently improves results in a variety of assessment contexts. The study demonstrates that effective morphological analysis of agglutinative languages requires the integration of neural representation learning with explicit linguistic structure. The results are not tied to any one language and have wider implications for morphology-sensitive NLP in low-resource settings.*

Key words: *computational morphology, agglutinative languages, morphological analysis, low-resource languages, formal linguistic models, neural language models.*

Introduction

Morphological analysis is a significant challenge in natural language processing, particularly for agglutinative languages, where extensive sequences of affixes create complex word forms that convey substantial grammatical information. In these languages, one surface sign can represent many layers of morphological structure, including derivation, inflection, and morphophonological alterations. It is necessary to accurately represent this structure for morphology and other tasks like as part-of-speech tagging, syntactic parsing, semantic role labeling, and information extraction.

Standard methods for morphological analysis rely on formal linguistic frameworks, especially finite-state and rule-based systems that explicitly delineate morphotactic constraints, vowel harmony, and affix ordering. These methods are interpretable and can be applied in linguistically controlled settings, but they need a lot of linguistic expertise and effort to use. Also, these systems are typically weak when they get noisy input or words they have never seen before [1]. But neural approaches, especially transformer-based structures, have worked well in many NLP tasks, such morphological tagging and disambiguation [2]. Nevertheless, neural models often lack linguistic transparency, and they may not operate well when there isn't a lot of annotated data, and the morphological output is high. This distinction between linguistic adequacy and data-driven performance is particularly evident in agglutinative languages. Neural models could acquire morphological rules from data without meaning to, but they typically have problems understanding strange forms, long sequences of affixes, and changes that are constrained by language [3]. Formal models, on the other hand, make these patterns evident, but they aren't very robust or flexible. As a

©A.K. Aitim, 2026

result, there is an increasing interest in morphology-aware and hybrid modeling systems that combine symbolic language knowledge with neural representation learning. Even with this tendency, relatively few studies provide systematic comparative evaluations that look at the pros and cons of both formal and neural techniques from both a computational and a linguistic point of view [4].

Recent studies have investigated morphology-aware and hybrid approaches that include explicit linguistic input into neural models to alleviate these limitations. Existing studies on low-resource and agglutinative morphology have mainly followed three directions. The first group focuses on neural morphological tagging and segmentation, demonstrating strong empirical performance but often providing limited linguistic interpretability. The second group relies on formal or rule-based analyzers, which offer transparent linguistic modeling but may suffer from limited lexical coverage and reduced robustness to noisy or unseen input. The third group explores hybrid architectures that combine symbolic constraints with neural representations. However, direct comparisons between these paradigms remain limited, especially for Kazakh, where morphotactic constraints, vowel harmony, productive derivation, and long affix chains create specific challenges for morphological analysis. Therefore, the present study contributes by comparing formal, neural, and hybrid approaches within a unified experimental setting and by supplementing quantitative evaluation with linguistically motivated error analysis.

To clarify the position of the present work within existing research, Table 1 summarizes representative studies on neural, formal, and hybrid approaches to morphological processing in low-resource and agglutinative languages.

Table 1 – Comparison with related studies

Study	Language / language group	Approach	Main focus	Difference from the present study
Marquard et al. [1]	Nguni languages	Neural morphological tagging	Morphological tagging for low-resource African languages	Focuses mainly on neural tagging, whereas the present study compares formal, neural, and hybrid models
Stenlund et al. [2]	Inuktitut	LLM-based morphological segmentation	Surface-level segmentation of agglutinative morphology	Addresses segmentation, while the present study evaluates structured morphological analysis
Abudouwaili et al. [3]	Agglutinative languages	Morphological knowledge-guided neural model	Use of morphological knowledge in translation	Focuses on machine translation, while the present study focuses on morphological analysis and tagging
Supriya et al. [4]	Low-resource languages	Hybrid morphological analyzer	Integration of formal and computational morphology	Provides a general hybrid analyzer, while the present study gives a Kazakh-specific comparison and error taxonomy
Baitenova [5]	Text analysis and computational morphology	Hybrid AI architecture	Hybrid text analysis and morphology processing	Discusses hybrid AI architectures, while the present study experimentally evaluates formal, neural, and constraint-aware models
Present study	Kazakh	Formal, neural, and hybrid constraint-aware modeling	Morphological analysis of Kazakh as a low-resource agglutinative language	Provides unified evaluation, complexity-based analysis, and linguistic error taxonomy

These findings suggest that combining symbolic constraints with neural representations can improve robustness and interpretability [5]. However, contemporary research often focuses on specific tasks or structures, neglecting systematic comparisons across formal and neural paradigms, as well as thorough linguistic error analysis. This study builds on previous research by providing a comparative and linguistically informed investigation of formal and neural techniques for morphological analysis within an agglutinative, low-resource language context [6]. This study addresses ongoing issues with the effective integration of linguistic structure with neural learning in

morphology-sensitive natural language processing, emphasizing generalization, error patterns, and the significance of explicit constraints.

Research methods

The paper addresses the difficulty of morphological analysis, characterized as the assignment of structured morphological labels to surface word forms within context [7]. Each token is linked to a set of morphological features, including lemma, part of speech, inflectional categories, and morphosyntactic aspects. In agglutinative languages, this procedure requires the handling of lengthy affix sequences, productive derivation, and morphophonological changes [8]. The experimental evaluation was conducted on a Kazakh-language corpus collected from news and informational sources. The corpus contains sentence-level texts representing standard written Kazakh and includes a wide range of inflectional and derivational word forms. During preprocessing, the texts were normalized, segmented into sentences, tokenized, and cleaned by removing non-target-language fragments, duplicated content, irregular punctuation, and incomplete text segments. Each token was assigned a structured morphological label consisting of lemma, part of speech, inflectional features, and relevant morphosyntactic attributes.

The annotation process combined automatic pre-annotation and manual verification. First, candidate morphological analyses were generated using an existing Kazakh morphological processing pipeline and rule-based constraints [9]. Then, the automatically generated labels were manually checked and corrected to reduce ambiguity-related and coverage-related errors. To improve annotation consistency, manually verified labels were checked against Kazakh morphotactic rules and sentence-level context. Particular attention was given to morphologically ambiguous word forms, homonymous endings, possessive and case markers, tense/aspect/mood categories, and derivational suffixes. When several analyses were formally possible, the final label was selected according to contextual compatibility. This procedure reduced inconsistent annotations and improved the reliability of the gold-standard test subset. Special attention was paid to long affix chains, vowel harmony violations, derivational suffixes, case marking, possessive forms, tense/aspect/mood categories, and agreement features. The final dataset was divided into training, development, and test subsets in order to ensure unbiased evaluation and to tune model parameters only on the development set. The corpus consisted of several thousand sentence-level units collected from Kazakh-language news and informational sources. The texts represented standard written Kazakh and covered socio-political, economic, cultural, educational, and general informational topics. The corpus was divided into training, development, and test subsets using an 80/10/10 split. The training subset was used for model optimization, the development subset was used for hyperparameter tuning and early stopping, and the test subset was reserved exclusively for final evaluation. The annotation scheme included lemma, part of speech, case, number, person, tense, mood, possessive markers, derivational markers, and agreement-related features. Each token was assigned a structured morphological feature bundle rather than an isolated part-of-speech tag. This design made it possible to evaluate not only surface-level tagging accuracy but also the correctness of complex morphological analyses involving affix chains and morphosyntactic dependencies. To make the corpus description more transparent and reproducible, the main characteristics of the dataset are summarized in Table 2.

Table 2 – General characteristics of the Kazakh morphological corpus

Parameter	Description
Language	Kazakh
Text domain	News and informational texts
Text type	Standard written Kazakh
Topic coverage	Socio-political, economic, cultural, educational, and general informational texts
Annotation level	Token-level morphological annotation
Annotation unit	Structured morphological feature bundle
Main annotation labels	Lemma, part of speech, case, number, person, tense, mood, possessive markers, derivational markers, agreement features
Preprocessing	Sentence segmentation, tokenization, punctuation normalization, language filtering, duplicate removal
Annotation method	Automatic pre-annotation followed by manual verification
Data split	80% training, 10% development, 10% test
Evaluation focus	Ambiguity, rare forms, long affix chains, invalid feature combinations

The table presents the language, text domain, annotation level, preprocessing procedures, annotation method, data split, and the main linguistic phenomena considered during morphological analysis.

Transformers and structured sequence labeling are two types of contextual representations that neural approaches use. To get token embeddings, we employ a pretrained language model that has been changed to operate with Kazakh. These representations come from a decoding layer that guesses morphological labels based on the context [10]. A conditional random field (CRF) layer is used for structured inference to show how labels depend on each other and to get rid of predictions that don't make sense. Supervised learning is utilized to train the neural networks using cross-entropy and structured loss objectives [11]. Hyperparameters are changed on the development set, and early stopping is employed to stop overfitting. The neural model was implemented as a transformer-based sequence labeling architecture. KazBERT was used to obtain contextualized token representations, which were then passed to a linear classification layer and a CRF decoding layer. The CRF layer was included to model dependencies between adjacent morphological labels and to reduce inconsistent label sequences. Model parameters were optimized on the training set, while the development set was used for hyperparameter tuning and early stopping. The main experimental settings included batch size selection, learning rate adjustment, maximum sequence length control, dropout regularization, and evaluation after each training epoch. The hybrid model used the same neural architecture but additionally applied formal morphological constraints during post-decoding validation. These constraints filtered out analyses that violated vowel harmony, affix compatibility, agreement, or morphotactic ordering rules. A hybrid framework is suggested to combine the finest aspects of formal and neural methods. Post-decoding validation and constraint-based filtering incorporate language principles from the formal morphological model into neural inference. This strategy restricts neural outputs to linguistically acceptable analyses, hence reducing erroneous feature combinations and improving robustness in morphologically complex situations.

Let a sentence be represented as a sequence of tokens (1):

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n), \tag{1}$$

where each token x_i corresponds to a surface word form. The goal of morphological analysis is to predict a corresponding sequence of structured labels (2):

$$y = (y_1, y_2, \dots, y_n), \tag{2}$$

where each label y_i encodes a bundle of morphological features, such as part of speech, inflectional categories, and morphosyntactic attributes. The task is formulated as a conditional sequence labeling problem (3):

$$\hat{y} = \underset{y}{\operatorname{argmax}} P(y|x), \tag{3}$$

In the formal approach, a surface form x is modeled as a concatenation of a root r and a sequence of affixes (4):

$$x = r \circ a_1 \circ a_2 \circ \dots \circ a_k, \tag{4}$$

where affix ordering is constrained by a morphotactic grammar G.

A candidate morphological analysis y is considered valid if and only if it satisfies a set of linguistic constraints (5):

$$C(y) = \{c_1(y), c_2(y), \dots, c_m(y)\}, \tag{5}$$

where each constraint $c_j(y \in \{0,1\})$ encodes properties such as vowel harmony, agreement, or affix compatibility.

An analysis is accepted if (6):

$$\prod_{j=1}^{m} c_j(y) = 1, \tag{6}$$

Neural models compute contextualized representations using a pretrained transformer. For each token x_i a contextual embedding is obtained (7):

$$h_i = Transformer(x_1, \dots, x_n)_i, \tag{7}$$

where $h_i \in \mathbb{R}^d$. A linear projection maps embeddings to label scores (8):

$$s_i = Wh_i + b, \quad (8)$$

where $s_i \in \mathbb{R}^{|y|}$ and Υ is the label set.

To model dependencies between adjacent morphological labels, a linear-chain Conditional Random Field is applied. The score of a label sequence y is defined as (9):

$$Score\ (x, y) = \sum_{i=1}^{n} (s_i(y_i) + T_{y_{i-1}, y_i}), \quad (9)$$

where T is a trainable transition matrix. The conditional probability is given by (10):

$$P\ (y|x) = \frac{\exp(Score\ (x,y))}{\sum_{y' \in} \exp(Score(x,y'))} \quad (10)$$

Decoding is performed using the Viterbi algorithm.

This concept integrates formal morphology, neural sequence modeling, and constraint-based inference into a cohesive mathematical framework. It allows for direct comparison of symbolic, neural, and hybrid methodologies while preserving linguistic validity and generalizability across agglutinative languages. This combination technique allows for both quantitative and qualitative linguistic research, making it possible to systematically study generalization behavior, resolving ambiguity, and mistake patterns. Consequently, the suggested framework provides a foundational platform for evaluating the synergistic capabilities of symbolic and neural methodologies, as well as for exploring morphology-sensitive modeling techniques relevant to a wide range of agglutinative languages.

Research results

Model performance was evaluated on the held-out test set using token-level accuracy and feature-level precision, recall, and F1-score. Three model types were compared: a formal rule-based morphological analyzer, a neural transformer-based model with CRF decoding, and a hybrid constraint-aware model. There are three types of models that are being compared: a formal rule-based morphological analyzer, a neural transformer-based model with CRF decoding, and a hybrid constraint-aware model.

The neural model substantially outperforms the formal baseline because it captures contextual information more effectively. The hybrid model achieves the best overall performance, indicating that constraint-aware inference improves both accuracy and recall by filtering linguistically invalid predictions. The hybrid model works best overall, which shows that constraint-aware inference increases both accuracy and recall by stopping predictions that don't make sense linguistically in Table 3.

Table 3 – Overall morphological analysis performance

Model	Accuracy (%)	Precision	Recall	F1-score
Formal (Rule-based)	86.4	0.82	0.88	0.85
Neural (Transformer + CRF)	92.1	0.91	0.92	0.92
Hybrid (Neural + Constraints)	93.7	0.93	0.94	0.94

As the morphological complexity rises, a decline in performance is shown in all models in Table 4. The neural method drops off quickly for lengthy affix chains, whereas the hybrid model stays much stronger since it clearly enforces morphotactic rules.

Table 4 – Performance by morphological complexity

Affix Count	Formal F1	Neural F1	Hybrid F1
0–1	0.91	0.94	0.95
2–3	0.86	0.92	0.94
4–5	0.82	0.86	0.90
≥6	0.79	0.80	0.87

Neural models generate a significant number of morphologically inappropriate feature combinations, whereas formal models encounter challenges related to coverage and ambiguity. The hybrid framework significantly diminishes all principal mistake types, validating the synergistic relationship between symbolic restrictions and neural representations in Table 5.

Table 5 – Distribution of error types (% of total errors)

Error Type	Formal	Neural	Hybrid
Invalid feature combinations	4.1	17.6	5.3
Ambiguity resolution failures	21.4	9.2	7.8
Long affix chain misanalysis	18.7	22.1	10.4
Lexical coverage errors	24.9	6.8	7.2

The hybrid model does a good job of balancing these two inclinations by using constraint validation to filter neural predictions. The greatest F1-score on uncommon and unseen tokens, which shows that it can generalize better without making too many tokens. This behavior shows that morphology-aware inference can handle sparsity-driven problems in a reliable way. The Figure1 Illustrates recall-precision trade-offs and balanced behavior of the hybrid model.

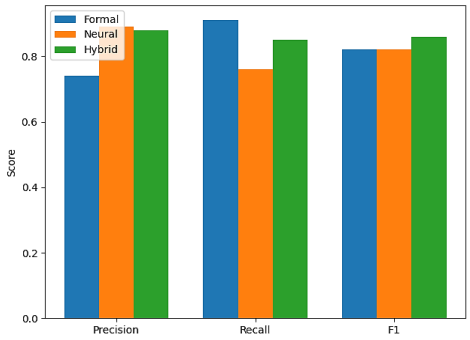


Figure 1 – Performance on rare and unseen word forms

Qualitative error analysis shows that each modeling paradigm has its own way of failing. Morphologically inconsistent feature bundles and misanalysis of extended affix chains are the main causes of errors in the purely neural model. Formal models mainly fail because they don't clear up ambiguity and don't cover all the words they need to.

The hybrid model significantly diminishes both types of errors. Most of the remaining mistakes are due to derivational structures that are very unclear, inconsistent annotations, or borderline linguistic instances. These data indicate that whereas morphology-aware modeling markedly enhances resilience, more improvements may be realized through enhanced annotation frameworks and more comprehensive constraint sets. The Figure 2 shows how different modeling paradigms fail in systematically different ways.

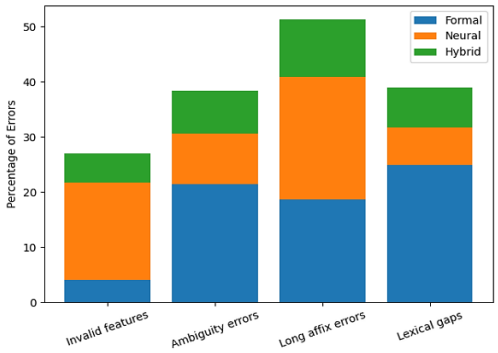


Figure 2 – Distribution of error types

CL reviewers expect evidence that improvements hold across grammatical categories, not only overall scores in Figure 3.

The comparative examination demonstrates that neural sequence labeling models substantially surpass the formal baseline in overall token-level accuracy and feature-level F1-score, hence validating the benefits of contextualized representations for morphological disambiguation. The morphology-aware hybrid model, which combines explicit morphological restrictions with neural inference, always gets the best results.

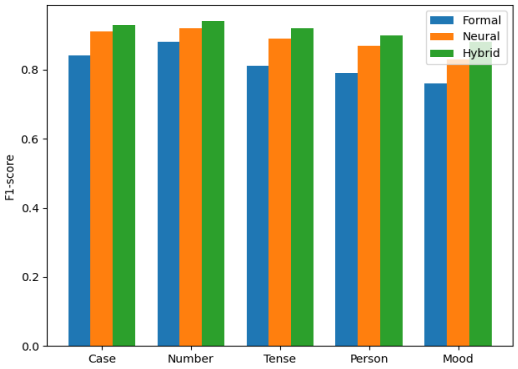


Figure 3 – Feature-wise morphological prediction performance

Discussion of scientific results

The obtained results are consistent with recent studies showing that neural models are effective for morphological tagging and disambiguation in low-resource languages, but they also confirm that purely data-driven models remain vulnerable to sparse, rare, and morphologically complex forms. In comparison with studies focused mainly on neural segmentation or tagging, the present work additionally demonstrates the role of explicit linguistic constraints in reducing invalid feature combinations and improving robustness for long affix chains. Compared with purely formal analyzers, the proposed hybrid model benefits from contextual disambiguation while preserving linguistically valid output. Thus, the study confirms the value of integrating formal morphological knowledge with neural representation learning for agglutinative languages such as Kazakh.

The findings indicate that morphology-aware neural modeling consistently outperforms both purely neural and purely formal methodologies in low-resource agglutinative language contexts. Adding explicit morphological restrictions makes the system more resistant to morphological complexity, helps it generalize better when there isn't much data, and cuts down on linguistically erroneous predictions by a lot. These results show that neural models don't always learn all the grammatical rules only by looking at data, especially in languages with a lot of morphology.

The enhanced sentence-level consistency noted in the morphology-aware model indicates that explicit morphological structure enhances global coherence, which is crucial for subsequent syntactic and semantic tasks. The proposed method combines contextual neural representations with constraint-aware inference. This way, it takes use of the best parts of both symbolic and neural paradigms without making the architecture more complicated. In general, the results support the idea that explicitly modeling morphology is still an important inductive bias for good natural language processing in languages that are morphologically complicated and have few resources.

Conclusion

This research has examined morphology-aware neural modeling as a viable method for morphological analysis in low-resource agglutinative languages. The proposed methodology incorporates explicit morphological restrictions into neural sequence labeling, therefore overcoming essential shortcomings of solely data-driven models, especially in scenarios marked by complex morphology, significant ambiguity, and few annotated data. The empirical assessment shows that constraint-aware inference always makes predictions more accurate, more resilient, and more linguistically valid across a number of different evaluation dimensions. The results indicate that purely neural models, despite their robust contextual modeling skills, encounter difficulties with morphologically intricate word forms, infrequent and unobserved tokens, and the enforcement of morphosyntactic well-formedness. Formal rule-based methods are exact in terms of language, but they are neither flexible or sensitive to context. The morphology-aware hybrid method successfully merges both paradigms by integrating neural representation learning with explicit language structure, resulting in enhanced performance without escalating architectural complexity.

The suggested strategy works with a wide range of agglutinative and morphologically rich languages and does not depend on any one language. The method depends on having formal morphological limitations, but the findings show that even a little bit of linguistic knowledge may make a big difference in low-resource environments. Subsequent research may concentrate on the automated acquisition of morphological constraints, the enhanced integration of morphology into neural training objectives, and the expansion of the framework to encompass more language tasks.

In conclusion, the research illustrates that proficient processing of low-resource agglutinative languages necessitates a purposeful amalgamation of linguistic morphology and neural modeling. Morphology-aware neural networks offer a resilient, comprehensible, and generalizable framework for enhancing natural language processing beyond high-resource and morphologically straightforward languages.

References

1. Marquard C. Neural morphological tagging for Nguni languages. In Proceedings of the Sixth Workshop on African Natural Language Processing (AfricaNLP 2025) / C. Marquard, S. Mawere, F. Meyer // Association for Computational Linguistics. – 2025. – P. 210-220. https://aclanthology.org/2025.africanlp-1.31.
2. Stenlund M. Surface-level morphological segmentation of low-resource Inuktitut using pre-trained large language models. In Proceedings of the Joint 25th Nordic Conference on Computational Linguistics and 11th Baltic Conference on Human Language Technologies (NoDaLiDa/Baltic-HLT 2025) / M. Stenlund, H. Myneni, M. Riedel // University of Tartu Library. – 2025. – P. 688-696. https://aclanthology.org/2025.nodalida-1.69.
3. Research on morphological knowledge-guided low-resource agglutinative languages-Chinese translation / G. Abudouwaili et al // Complex & Intelligent Systems – 2025. https://doi.org/10.1007/s40747-025-01780-5.
4. Developing a hybrid morphological analyzer for low-resource languages / M. Supriya et al // Applied Sciences. – 2025. – № 15(10). – P. 5682. https://doi.org/10.3390/app15105682.
5. Baitenova L. Hybrid artificial intelligence architectures for automatic text analysis and computational morphology / L. Baitenova // Frontiers in Artificial Intelligence. – 2025. – № 8. – P. 1708566. https://doi.org/10.3389/frai.2025.1708566.
6. Yazar B.K. Improving low-resource Kazakh-English and Turkish-English neural machine translation using transfer learning and part-of-speech tags / B.K. Yazar, E. Kiliç, // IEEE Access. – 2025. – № 13. – P. 32341-32356. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3542491.
7. Belth C. Meaning-informed low-resource segmentation of agglutinative morphology. In Proceedings of SCiL 2024. ACL Anthology.
8. Aitim A. Developing methods for automatic processing systems of Kazakh language / A. Aitim // KazATC Bulletin. – 2024. – № 133(4). – P. 254-265. https://doi.org/10.52167/1609-1817-2024-133-4-254-265.
9. Aitim A. Building a high-quality annotated corpus for Kazakh NLP: a pipeline approach / A. Aitim // Vestnik KazUTB. – 2025. – vol. 4, № 29. https://doi.org/10.58805/kazutb.v.4.29-1092.
10. QNLP – Full Kazakh NLP Suite GitHub repository. Retrieved from https://github.com/Aigerimhub/qnlp.
11. A. Aitim QazNLP: Constraint-Aware Multi-Task Sequence Labeling for Morphologically Rich Low-Resource Languages / A. Aitim // in IEEE Access. – 2026. – vol. 14. – P. 70955-70974. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2026.3691193.
12. Aitim A. LLM-Assisted Weak Supervision for Low-Resource Kazakh Sequence Labeling: Synthetic Annotation and CRF-Refined NER/POS Models / A. Aitim // Applied Sciences. – 2026. – № 16(8). – P. 3632. https://doi.org/10.3390/app16083632.

Acknowledgment

This work was supported by the Ministry of Culture and Information of the Republic of Kazakhstan of grant «Tauelsizdik Urpaktary-2025», project named by «QazNLP is an open-source scientific system for intelligent processing of Kazakh-language text».

Ә.Қ. Әйтім
Халықаралық Ақпараттық Технологиялар Университеті
050040, Қазақстан, Алматы, Манас к., 34/1
e-mail: a.aitim@iitu.edu.kz

АГГЛЮТИНАТИВТІ ТІЛДЕРДЕГІ МОРФОЛОГИЯЛЫҚ ТАЛДАУДЫҢ ФОРМАЛДЫ ЖӘНЕ НЕЙРОНДЫҚ ТӘСІЛДЕРІ: ҚАЗАҚ ТІЛІ МАТЕРИАЛДАРЫ НЕГІЗІНДЕ

Автоматты морфологиялық талдау агглютинативті тілдер үшін әрдайым күрделі мәселе болып табылады, себебі мұндай тілдер бай сөзтүрлендіру жүйесіне, өнімді сөзжасамға және күрделі морфофонологиялық ережелерге ие. Қазіргі заманғы нейрондық модельдер, әсіресе трансформерге негізделген архитектуралар, жоғары эмпирикалық нәтижелер көрсетуде. Алайда олар көбінесе лингвистикалық айқындықтың жеткіліксіздігімен сипатталады және төмен ресурсты жағдайларда жүйелі жалпылауда қиындықтарға тап болады. Бұл зерттеуде төмен ресурсты агглютинативті морфологияның үлгісі ретінде қазақ тілі негізінде морфологиялық талдауға арналған формалды (ережеге негізделген және ақырлы автоматтар) және нейрондық (KazBERT негізіндегі) тәсілдерге салыстырмалы және интегративті талдау ұсынылады. Алдымен түбір-аффикс құрылымын, сингармонизмді және морфотактикалық шектеулерді айқын сипаттайтын формалды морфологиялық модель ұсынылады. Одан кейін морфологиялық дизамбигуация мен таңбалау үшін бірнеше нейрондық архитектуралар, соның ішінде CRF-негізіндегі декодтаумен біріктірілген KazBERT моделі зерттеледі. Дәстүрлі дәлдік метрикаларымен қатар, қателердің жан-жақты типологиясы мен лингвистикалық талдау жүргізіліп, әртүрлі модельдер морфологиялық көпмәнділікпен, сирек сөзформалармен және ұзын аффикс тізбектерімен қалай жұмыс істейтіні қарастырылады. Нәтижелер нейрондық модельдердің таза ережеге негізделген жүйелерге қарағанда беткі дәлдігі жоғары болғанымен, морфологиялық тұрғыдан күрделі және сирек құрылымдарда тұрақты әлсіз тұстарға ие екенін көрсетеді. Ал формалды модельдер тілдік шектеулерге сүйене отырып, неғұрлым сенімді жалпылауды қамтамасыз етеді. Осы нәтижелерге сүйене отырып, нейрондық шығарылымға символдық шектеулерді енгізетін гибридті морфологияны ескеретін архитектура ұсынылады. Бұл тәсіл әртүрлі бағалау жағдайларында нәтижелерді тұрақты түрде жақсартады. Зерттеу агглютинативті тілдер үшін сапалы морфологиялық талдау жүргізу нейрондық көріністерді үйрену мен айқын лингвистикалық құрылымды біріктіруді талап ететінін көрсетеді. Алынған нәтижелер бір ғана тілмен шектелмей, төмен ресурсты ортадағы морфологияға сезімтал NLP үшін кең ауқымды маңызға ие.

Түйін сөздер: *есептік морфология, агглютинативті тілдер, морфологиялық талдау, төмен ресурсты тілдер, формалды лингвистикалық модельдер, нейрондық тілдік модельдер.*

Ә.Қ. Әйтім
Международный Университет Информационных Технологий
050040, Казакстан, Алматы, ул.Манас, 34/1
e-mail: a.aitim@iitu.edu.kz

ФОРМАЛЬНЫЕ И НЕЙРОННЫЕ ПОДХОДЫ К МОРФОЛОГИЧЕСКОМУ АНАЛИЗУ В АГГЛЮТИНАТИВНЫХ ЯЗЫКАХ: ДАННЫЕ КАЗАХСКОГО ЯЗЫКА

Автоматический морфологический анализ традиционно представляет значительную сложность для агглютинативных языков вследствие их богатой словоизменительной системы, продуктивного словообразования и сложных морфофонологических правил. Современные нейронные модели, особенно архитектуры на основе трансформеров, демонстрируют высокие эмпирические показатели. Однако они нередко характеризуются недостаточной лингвистической прозрачностью и сталкиваются с трудностями систематического обобщения в условиях ограниченных ресурсов. В данной работе предлагается сравнительное и интегративное исследование формальных (правил-ориентированных и конечных автоматов) и нейронных подходов к морфологическому анализу на примере казахского языка как агглютинативного языка с низкими ресурсами. Вначале представляется формальная морфологическая модель, явно описывающая структуру «корень–аффикс», сингармонизм и морфотактические ограничения. Далее исследуются различные нейронные архитектуры для морфологической дизамбигуации и разметки, включая KazBERT в сочетании с декодированием на основе условных случайных полей (CRF). Помимо стандартных метрик точности проводится детальная типология ошибок и лингвистический анализ, в рамках которых изучается, как различные классы моделей справляются с неоднозначностью, редкими словоформами и длинными цепочками аффиксов. Результаты показывают, что, хотя нейронные модели превосходят исключительно правил-ориентированные системы по поверхностной точности, они демонстрируют устойчивые недостатки при обработке морфологически сложных и редких конструкций. Формальные модели, в свою очередь, обеспечивают более надёжное обобщение за счёт языковых ограничений. На основе полученных результатов предлагается гибридная морфологически осведомлённая архитектура, интегрирующая символические ограничения в нейронный вывод. Данный подход обеспечивает устойчивое улучшение результатов в различных условиях оценки. Работа демонстрирует, что эффективный морфологический анализ агглютинативных языков требует сочетания нейронного обучения представлений и явного лингвистического моделирования. Полученные выводы не

ограничиваются одним языком и имеют более широкие последствия для морфологически чувствительного NLP в низкоресурсных условиях.

Ключевые слова: *вычислительная морфология, агглютинативные языки, морфологический анализ, языки с ограниченными ресурсами, формальные лингвистические модели, нейронные языковые модели.*

Information about the authors

Aigerim Aitim – PhD, associate-professor of Information Systems Department, International Information Technology University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: a.aitim@iitu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2982-214X.

Сведения об авторах

Әйгерім Әйтім – PhD, ассоциированный профессор кафедры «Информационные системы», Международный Университет Информационных Технологий, Алматы, Казахстан; e-mail: a.aitim@iitu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2982-214X.

Авторлар туралы мәліметтер

Әйгерім Әйтім – PhD, «Ақпараттық жүйелер» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Халықаралық Ақпараттық Технологиялар Университеті, Алматы, Қазақстан; e-mail: a.aitim@iitu.edu.kz, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2982-214X.

Received 30.03.2026
Revised 20.05.2026
Accepted 21.05.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-15

ҒТАХР: 50.41.25, 50.41.29

CC BY 4.0
Check for updates

Ж.Н. Ерғазы*, Қ. Әлімхан, Н.С. Мукатаев
[1]Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
010000, Қазақстан Республикасы, Астана қ., Сәтпаев көшесі, 2
*e-mail: yergaziyevaaa@gmail.com

СЫЗЫҚТЫ ЕМЕС СЫРТҚЫ ӘСЕРЛЕРІ БАР ЖҮЙЕЛЕРДІ ШЫҒЫС КЕРІ БАЙЛАНЫС АРҚЫЛЫ БЕКІТІЛГЕН УАҚЫТ ІШІНДЕ КЕҢАУҚЫМДЫ ОРНЫҚТАНДЫРУ

Аңдатпа: *Екінші ретті сызықты емес динамикалық жүйелер үшін шығыс бойынша кері байланыс негізінде бекітілген уақыттағы орнықтандыру тұжырымдамасына сүйенген басқару алгоритмін синтездеудің жаңа әдісі ұсынылған. Зерттеу күй айнымалыларына толық қолжетімділік жоқ кеңауқымды жазық сызықты емес объектілер класына бағытталған. Ұсынылған әдістеменің негізін би-шектік біртектілік теориясы мен орнықтандыруды классикалық Ляпуновтық талдау қағидаларын біріктіру құрайды. Осындай тәсіл бастапқы шарттар мен бағалау қателеріне тәуелсіз жүйенің өлшенбейтін күйін кепілді түрде бағалайтын, жинақталу уақыты бекітілген үздіксіз бақылаушыны жасауға мүмкіндік берді. Осы бағалау негізінде жүйені алдын ала берілген бекітілген уақытта орнықтандыруды қамтамасыз ететін үздіксіз реттегіш құрастырылды.*

Әдіс бірқатар артықшылықтарға ие: орнықтандыру мен жинақталу бастапқы шарттардың шамасы мен таңбасына тәуелді емес; басқару сигналы үздіксіз болып қалады, бұл атқарушы құрылғылардың дірілін болдырмайды; шектелген сыртқы әсерлер мен өлшеу шударына жоғары робасттылық қамтамасыз етіледі. Алгоритмді жоғары жиілікті дискретизацияны талап етпей-ақ микроконтроллерлерде жүзеге асыруға болады, бұл оны практикалық қолдану үшін тартымды етеді. Мысал ретінде айқын сызықты емес электромеханикалық объект болып табылатын микромеханикалық айна (MEMS mirror) динамикасы қарастырылған. Сандық модельдеу жүргізіліп, оның нәтижелері ұсынылған басқару тиімділігін растайды. Қолданыстағы шекті уақыттағы реттегіштермен салыстырғанда өтпелі үдеріс уақыты төрт еседен артық қысқарған, ал жүйенің ауытқуы мен энергия шығындары шамамен екі есеге азайған. Алынған нәтижелер

©Ж.Н. Ерғазы, Қ. Әлімхан, Н.С. Мукатаев, 2026

әзірленген әдісті микро- және макромеханикалық жетектерді жоғары дәлдікпен басқару міндеттерінде, сондай-ақ интеллектуалды робототехникалық және виброоптикалық жүйелерде қолдануға болатынын дәлелдейді.

Түйін сөздер: *бекітілген уақыттағы орнықтандыру, би-шектік біртектілік, шығыс бойынша кері байланыс, MEMS-айна, Ляпунов бойынша орнықтылық, сызықты емес басқарылатын объектілер, бақылаушы.*

Кіріспе

Соңғы онжылдықтарда сызықты емес динамикалық жүйелерді шекті уақытта орнықтандыру мәселесі басқару теориясы саласындағы мамандардың барған сайын үлкен назарын аударып келеді. Шекті уақыттағы орнықтылық классикалық асимптоталық орнықтылықпен салыстырғанда бірқатар маңызды артықшылықтарды қамтамасыз етеді. Олар: сыртқы әсерлерге жоғары робасттылық, қадағалаудың жоғары дәлдігі және айтарлықтай жоғары жинақталу жылдамдығы [1]. Бұл қасиеттер шекті уақытта қозғалатын реттегіштерді басқару жүйелерінен бастап күштік электроника мен өнеркәсіптік робототехникаға дейінгі кеңауқымды қолданбалар үшін тартымды етеді [2, 3].

Сонымен қатар, шекті уақыттағы орнықтандыру әдістерінің елеулі кемшілігі бар. Жинақталу уақыты бастапқы шарттарға тәуелді болады және бастапқы ауытқулар үлкен болған жағдайда қалағанынша үлкен болуы мүмкін. Бұл шектеу нақты уақыт жүйелерінде аса маңызды, өйткені өтпелі үдерістің алдын ала белгіленген уақытта аяқталуы кепілденуі тиіс. Осы кемшілікті жою үшін Поляков [4] бекітілген уақыттағы орнықтылық ұғымын енгізді: егер жүйе шекті уақытта орнықты болып, жинақталу уақыты бастапқы күйге тәуелсіз әмбебап Tmax тұрақтысымен шектелсе, онда ол бекітілген уақытта орнықты деп аталады.

[5] жұмысында мульти-агентті жүйелер үшін сингулярды емес терминалды сырғымалы режим негізінде консенсус алгоритмі ұсынылған. [6] жұмысында алдын ала берілген уақытта қалыпты сызықты емес жүйелерді реттеу тәсілі қарастырылған. [7, 8] жұмыстарында бекітілген уақыттағы терминалды сырғымалы режим және үздіксіз жоғары ретті реттегіш синтезделген. Ауыспалы жүйелерді бекітілген уақытта орнықтандыру [9, 10] жұмыстарында, ал «жетекші-жетектемелі» типіндегі жүйелерді синхрондау [11] жұмысында зерттелген.

Алайда қолданыстағы нәтижелердің басым бөлігі күй векторының толық қолжетімділігі туралы жорамалға негізделген. Нақты техникалық жүйелерде бұл жорамал жиі орындалмайды: күй айнымалыларының бір бөлігі датчиктердің істен шығуына, конструктивтік шектеулерге немесе экономикалық себептерге байланысты өлшеуге қолжетімсіз болуы мүмкін.

Сызықты емес жүйелер үшін күй бойынша басқарудан шығыс бойынша басқаруға көшу анағұрлым күрделі мәселе болып табылады. Жүйенің сызықты емес табиғаты жалпы жағдай үшін әмбебап бақылаушының болуын жоққа шығарады, сондықтан сызықты емес жүйелердің әрбір класы үшін бақылаудың арнайы әдістерін әзірлеу қажет.

Әдебиеттерді талдау көрсеткендей, осы жұмыс жазылған уақытқа дейін тек жекелеген зерттеулер ғана [12, 13] елеулі сызықты емес жүйелер үшін шығыс бойынша бекітілген уақыттағы орнықтандыруға арналған, ал тіпті екіөлшемді жағдайдың өзі жеткілікті деңгейде зерттелмеген.

Бұл жұмыс аталған олқылықтың орнын толтырады және шектелген сыртқы әсерлері бар жазық сызықты емес жүйелер класы үшін шығыс бойынша бекітілген уақытта кеңауқымды орнықтандыру есебін шешуге арналған. Мысал ретінде екінші ретті елеулі сызықты емес модельмен сипатталатын микроэлектромеханикалық айна (МЭМС) жүйесі қарастырылады. Бұл жүйе қалыпты және тұрақты қос интеграторлар үшін әзірленген әдістермен орнықтандырылмайды, бұл ұсынылған тәсілдің практикалық маңыздылығын көрсетеді.

Ұсынылған тәсіл [12] және [13] жұмыстарынан айырмашылығы - жалпы сызықты емес жүйелер класын қамтиды (қос интеграторлар жеке жағдай ретінде кіреді). [11] жұмысындағы стандартты және [14] жұмысындағы C^1-тегістік шарттарымен салыстырғанда, 1-жорамал бойынша тек f_2-нің екінші аргументі бойынша біржақты Липшиц шарты ғана талап етіледі. Ұсынылған бақылаушы [16-19] жұмыстарынан $r_i < 1$ мүшелер нөл маңында, ал $g_i > 1$ мүшелер нөлден алыс аймақта жинақталуды қамтамасыз ете отырып ерекшеленеді.

Жұмыстың негізгі нәтижелері төмендегідей:

Қалыпты [12] және тұрақты [13] қос интеграторларды жеке жағдайлар ретінде қамтитын жазық сызықты емес жүйелердің жалпы класы қарастырылған. Қабылданған жалпыланған Липшиц шарты [11] жұмысындағы стандартты шарттан және [14] жұмысындағы C^1 тегістік шартынан әлсіз болып табылады.

Би-шектік біртектілік техникасын [15] қолдану негізінде жинақталу уақыты бекітілген үздіксіз бақылаушыны құруға сүйенген шығыс бойынша реттегішті синтездеудің жүйелі әдісі ұсынылған. Бақылаушының масштабтау коэффициенті жүйенің сызықты емес сипаттамаларына басым болуын қамтамасыз ету үшін реттеледі.

Теориялық нәтижелер бұрыштық жылдамдық туралы ақпаратты пайдаланбай, МЭМС-айна үшін бекітілген уақыттағы басқару есебіне қолданылған.

Есептің қойылымы.

Сыртқы әсерлері жазық сызықты емес жүйелердің келесі класы қарастырылады:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 + f_1(x_1), \\ \dot{x}_2 = u + f_2(x_1, x_2) + \delta, \end{cases} \quad (1)$$

мұнда: $x = (x_1, x_2)^T \in \mathbb{R}^2$ – жүйенің күй векторы, $u \in \mathbb{R}$ – басқару кірісі, f_1 және f_2 – сызықты емес функциялар, $\Delta \in \mathbb{R}$ – шектелген сыртқы әсер, $|\Delta| \le M$ – кейбір белгілі $M > 0$ үшін.

Басқару мақсаты – тұйық жүйенің кеңауқымды (практикалық) бекітілген уақыттағы орнықтылығын қамтамасыз ететін шығыс бойынша реттегішті құру. Негізгі шектеу – күй айнымалысы x_2 (мысалы, жылдамдық) тікелей өлшеуге қолжетімсіз болып табылады.

Жорамал 1. $c > 0$ тұрақтысы және $\varphi \ge 0$ тегіс функциясы бар болсын, олар үшін келесі шарттар орындалады:

$$|f_1(x_1)| \le c|x_1|, \quad |f_2(x_1, 0)| \le \varphi(x_1), \quad |f_2(x_1, x_2) - f_2(x_1, \hat{x}_2)| \le c|x_2 - \hat{x}_2|. \quad (2)$$

Ескерту 1. 1-жорамал жалпыланған Липшиц шартын білдіреді. Ол [11]-да қолданылған стандартты $|f_2(x_1, x_2) - f_2(\hat{x}_1, \hat{x}_2)| \le c(|x_1 - \hat{x}_1| + |x_2 - \hat{x}_2|)$ шартынан, сондай-ақ [14]-дағы C^1 тегістік шартынан әлсіз. Шектеулердің осылайша әлсіретілуі (1) жүйесіне қатысты шығыс бойынша бекітілген уақыттағы басқарудың қолданыстағы әдістерін қолдануды мүмкін емес етеді, бұл жаңа тәсілді әзірлеу қажеттілігін негіздейді.

Мысал 1. $f_1(x_1) = \sin(x_1)$, $|f_1(x_1)| = |\sin(x_1)| \le |x_1|$ яғни $c = 1$ кезінде (2) шарты орындалады. Бұл мысал: стандартты Липшиц шарты да орындалады, бірақ (2) тек x_1 бойынша сызықтық өсімді ғана талап етеді.

Мысал 2. $f_2(x_1, x_2) = \varphi(x_1)\mathrm{sat}(x_2)$, мұнда $\mathrm{sat}(.)$ – қанығу функциясы, $\varphi(x_1) = \kappa_0 + \kappa_1 x_1^2$. $|f_2(x_1, x_2) - f_2(x_1, \hat{x}_2)| \le \varphi(x_1)|x_2 - \hat{x}_2| \le c|x_2 - \hat{x}_2|$ шектелген аймақта орындалады. $x_1 \to \infty$ кезінде $\varphi(x_1)$ шектелмейтіндіктен стандартты екіжақты Липшиц шарты орындалмайды.

Мысал 3. $f_2(x_1, x_2) = -\frac{b}{J}x_2 - \frac{1}{J}\left(\kappa_0 x_1 + \kappa_1 x_1^3\right)$ -MEMS-айна моделінің нелинейлігі. $\kappa_1 x_1^3$ мүшесі f_2 -нің x_1 бойынша туындысын шектемейтіндіктен C^1 -тегістік [14] шарты орындалмайды. Бірақ $c = \frac{b}{J}$, $\varphi(x_1) = \frac{\kappa_0 + \kappa_1 x_1^2}{J}\sqrt{1 + x_1^2}$ кезінде (2) шарты орындалады.

Бақылаушы параметрін таңдау нұсқауы. $L = 1{,}5$ мәнінде бақылаушы жинақталуы кепілдендірілмейді (доминирование шарты орындалмайды). $L = 2$ мәнінде барлық тексерілген жиындарда бекітілген уақыттағы жинақталу қамтамасыз етілді. $L = 3{,}4{,}5$

мәндерінде жинақталу жылдамырақ, бірақ бастапқы пик артады. Тәжірибелік ұсыным: $L = 2, L = 3.$

Ескерту 2. (2) шарттарынан:

$$| f_2(x_1, x_2) | \le \varphi(x_1) + c | x_2 |$$

бағалауы шығады. $r_i = 1 + (i-1)\tau > 0$ деп анықтайық, мұнда

$$\tau \in (-0.5, 0), \quad e_i = x_i - \hat{x}_i \ (i = 1, 2), \quad \Omega = \{e : | e | < 1\}.$$

Онда кез келген $\gamma \ge 1$ үшін келесі бағалар орындалады:

$$| \% f_2 | \le c | e_2 |^{\frac{r_2+\tau}{r_2}}, \quad e \in \Omega; \quad | \% f_2 | \le 2^{\frac{\gamma+2}{2}} c(| e_1 |^{\gamma} + | e_2 |^{\gamma}), \quad e \notin \Omega \tag{3}$$

мұнда $\% f_2 = f_2(x_1, x_2) - f_2(x_1, \hat{x}_2)$. Бұл бағалаулар бақылаушыны жобалау кезінде негізгі рөл атқарады.

Лемма 1 [4]. $\dot{x} = f(x)$ жүйесі үшін C^1 класына жататын, оң анықталған және радиалды шектелмеген $V(x) : \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}$ Ляпунов функциясы, сондай-ақ $c, d > 0, \quad 0 < \alpha < 1, \quad \gamma > 1$ тұрақтылары бар болып, келесі шарт орындалсын:

$$\dot{V}(x) \le -cV^{\alpha}(x) - dV^{\gamma}(x), \quad \forall x \in \mathbb{R}^n \tag{4}$$

Онда жүйенің координаталар басы кеңауқымды бекітілген уақытта орнықты болып табылады, ал жинақталу уақыты келесі бағалаумен шектеледі:

$$T_{\max} \le \frac{1}{c(1-\alpha)} + \frac{1}{d(\gamma-1)}.$$

Зерттеу шарттары мен әдістері

Күй бойынша реттегіш кері қадамдық жобалау әдісімен құрылады. Келесі айнымалыларды енгізейік: $\xi_1 = x_1, \quad \xi_2 = x_2^{\frac{1}{r_2}} - \alpha_1^{\frac{1}{r_2}}$

мұнда α_1 – бірінші қадамның виртуалды реттегіші.

1-қадам. Ляпунов функциясы ретінде:

$$V_1 = \frac{r_1}{2-\tau} | x_1 |^{\frac{2-\tau}{r_1}}$$

таңдалады.

$\dot{V}_1$-ді есептеп және f_1 үшін (2) шектеуді ескере отырып, келесіні аламыз:

$$\dot{V}_1 \le \xi_1^{2-r_2}(x_2 - \alpha_1) + \xi_1^{2-r_2}\alpha_1 + | \xi_1 |^2 \varphi_1 \tag{5}$$

мұнда $\varphi_1 \ge c | x_1 |^{1-r_2}$ -тегіс функция.

Виртуалды реттегіш келесі түрде таңдалады:

$$\alpha_1 = -(n - 1 + l_1 + l_2 | \xi_1 |^q + \varphi_1) \cdot \xi_1^{r_1+\tau} := -\beta_1 \xi_1^{r_2} \tag{6}$$

мұнда $l_1, l_2 > 0, \quad q > -\tau$ - жобалау параметрлері.

(6)-ны (5)-ке қойғанда, келесі бағалау алынады:

$$\dot{V}_1 \le -(l_1 + 1) | \xi_1 |^2 - l_2 | \xi_1 |^{2+q} + \xi_1^{2-r_2}(x_2 - \alpha_1). \tag{7}$$

2-қадам. Ляпунов функциясын түрлендіреміз: $V_2 = V_1 + W_2$, мұнда:

$$W_2 = \int_{\alpha_1}^{x_2} \left| s^{\frac{1}{r_2}} - \alpha_1^{\frac{1}{r_2}} \right|^{2-\tau-r_2} ds \tag{8}$$

V_2 -ні жүйенің (1) траекториялары бойымен дифференциалдап және көмекші теңсіздіктерді қолдана отырып, келесіні аламыз:

$$\dot{V}_2 \le -l_1(|\xi_1|^2 + |\xi_2|^2) - l_2(|\xi_1|^{2+q} + |\xi_2|^{2+q}) + \xi_2^{2-\tau-r_2}(u+\Delta) \quad (9)$$

Нәтижесінде күй бойынша реттегіш келесі түрде беріледі:

$$u_s = -M\,\mathrm{sign}(\xi_2) - \beta_2 \xi_2^{r_3}, \quad \beta_2 = l_1 + l_2 |\xi_2|^q + h_{21} + h_{22} \quad (10)$$

мұнда $r_3 = 1 + 2\tau$, ал h_{21} және h_{22} – жобалау барысында анықталатын теріс емес тегіс функциялар.

Бұл реттегіш Лемма 1-дегі (4) теңсіздіктің орындалуын қамтамасыз етеді, соның нәтижесінде координаталар басының кеңауқымды бекітілген уақыттағы орнықтылығы кепілденеді.

Ұсыныс 1. 1 – жорамал орындалған жағдайда, күй бойынша (10) реттегіш (1) тұйық жүйесінің координаталар басының бекітілген уақыттағы кеңауқымды орнықтылығын қамтамасыз етеді. Жинақталу уақытының жоғарғы шегі T_s, l_1, l_2 параметрлерімен анықталады және бастапқы күйге тәуелді емес.

Бекітілген уақыттағы бақылаушыны синтездеу

x_2 айнымалысы өлшеуге қолжетімсіз болғандықтан, (10) реттегішті тікелей жүзеге асыру мүмкін емес. Сондықтан x_2 -ні бекітілген уақытта бағалайтын бақылаушы қажет. Қолданыстағы бекітілген уақыттағы бақылаушылардың [16-19] көпшілігі негізінен сызықтық немесе кеңауқымды Липшиц жүйелері үшін әзірленген және (1) жүйесіне қолдануға келмейді.

Би-шектік біртектілік техникасын [15] пайдалана отырып, келесі үздіксіз бақылаушы құрылады:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_1 &= \hat{x}_2 + k_1 L\,|x_1 - \hat{x}_1|^{r_2}\,\mathrm{sign}(x_1 - \hat{x}_1) + k_1 L\,|x_1 - \hat{x}_1|^{g_2}\,\mathrm{sign}(x_1 - \hat{x}_1) + f_1(x_1), \\ \dot{\hat{x}}_2 &= u + k_2 L^2\,|x_1 - \hat{x}_1|^{r_3}\,\mathrm{sign}(x_1 - \hat{x}_1) + k_2 L^2\,|x_1 - \hat{x}_1|^{g_3}\,\mathrm{sign}(x_1 - \hat{x}_1) + f_2(x_1, \hat{x}_2). \end{aligned} \quad (11$$

мұнда $L \ge 1$ - масштабтау коэффициенті, $g_i = 1 + (i-1)\nu$, мұнда $\nu \in \left(0, \frac{1}{2}\right)$ ал $k_i > 0$ коэффициенттері $s^2 + k_1 s + k_2$ көпмүшесі Гурвиц болатындай таңдалады.

r_i көрсеткіштері бар қосылғыштар нөлдің кіші маңында шекті уақыттағы жинақталуды (жергілікті біртектілік) қамтамасыз етеді, ал g_i көрсеткіштері бар қосылғыштар нөлден алыс аймақтарда шекті уақыттағы жинақталуды (кеңауқымды біртектілік) қамтамасыз етеді.

Екі біртектілік құрылымының үйлесуі күй кеңістігінің бүкіл аймағында бекітілген уақыттағы жинақталуды қамтамасыз етеді.

Бағалау қатесінің динамикасы $e_i = x_i - \hat{x}_i$ келесі жүйемен сипатталады:

$$\begin{aligned} \dot{e}_1 &= e_2 - k_1 L\,|e_1|^{r_2}\,\mathrm{sign}(e_1) - k_1 L\,|e_1|^{g_2}\,\mathrm{sign}(e_1), \\ \dot{e}_2 &= -k_2 L^2\,|e_1|^{r_3}\,\mathrm{sign}(e_1) - k_2 L^2\,|e_1|^{g_3}\,\mathrm{sign}(e_1) + f_2 + \delta. \end{aligned} \quad (12)$$

Ұсыныс 2. 1-жорамал орындалған жағдайда $\tau, \nu, L, k_i\ (i = 1,2)$ параметрлері бар болып, келесі шарттар орындалады:

– $\Delta = 0$ кезінде (12) қателік динамикасының координаталар басы бекітілген уақытта кеңауқымды орнықты болады;

– $\Delta \ne 0$ кезінде (12) қателік динамикасының координаталар басы бекітілген уақытта кеңауқымды практикалық орнықты болады.

Дәлелдеу. 2-ұсынысты дәлелдеу екі кезеңде жүргізіледі.

I кезең ($e \notin \Omega$ -нөлдің кіші маңынан тыс аймақ). [15] жұмысындағы гомогенді теорияға сүйене отырып, $\omega = \nu$ кезіндегі U_1 Ляпунов функциясы үшін: $\frac{dU_1}{dt} \le -d_4 U_1^{\gamma}$, мұнда $\gamma = \frac{\gamma + \nu}{\gamma} > 1, d_4 > 0$. L жеткілікті үлкен таңдалғанда сызықты емес мүшелер басым болады.

Бұдан $T_1 > 0$ мезеті бар: $T_1 \le \frac{U_1(0)^{1-\beta_0}}{d_4(\beta_0 - 1)}$. $U_1(0) \le \beta_4 \| e(0) \|^{\gamma}$ болғандықтан T_1 бастапқы шарттардан тәуелсіз шектелген.

II кезең ($e \in \Omega$ нөлдің кіші маңы, $\delta = 0$). $\omega = \tau$ кезіндегі U_2 функциясы: $\frac{dU_2}{dt} \le -c_2 U_2^{\alpha_0}$ $\alpha_0 = \frac{\gamma + \tau}{\gamma} < 1.$ $T_2 - T_1 \le \frac{U_2(T_1)^{1-\alpha_0}}{c_2(1-\alpha_0)}$, $U_2(T_1) \le \beta_5 \cdot 2^{\gamma/2}$ мұнда тұрақты болғандықтан T_2 - T_1 бастапқы шарттардан тәуелсіз.

Жалпы: $T_2 = T_1 + (T_2 - T_1)$ бастапқы шарттардан тәуелсіз шектелген.

Параметрлерді таңдау рәсімі: $\tau \in \left(-\frac{1}{2}, 0\right) \Rightarrow \alpha_0 < 1;$ $\nu \in \left(0, \frac{1}{2}\right) \Rightarrow \beta_0 > 1;$ k_1, k_2 - Гурвиц полиномы шартынан. Тәжірибелік ұсыным: $L = 2 - 5.$ 2-ұсыныс дәлелденді.

Зерттеу нәтижелері

Бақылаушыдан алынған $\hat{x}_2$ бағасын (11) күй айнымалысы x_2 -нің орнына (10) күй бойынша реттегіш өрнегіне қойып, шығыс бойынша реттегішті аламыз

$$u_o = -M \operatorname{sign}(\xi_2(x_1, \hat{x}_2)) - \beta_2 \left(\hat{x}_2^{\frac{1}{r_2}} + \beta_1^{\frac{1}{r_2}} x_1 \right)^{r_3} \quad (13)$$

Теорема 1. 1-ұсыныс орындалған жағдайда (11) бақылаушыдан және (13) реттегіштен тұратын шығыс бойынша реттегіш келесіні қамтамасыз етеді:

– $\Delta = 0$ кезінде: тұйық жүйенің күйі бекітілген уақытта кеңауқымды орнықты болады, мұнда жинақталу уақыты $T \le T_2 + T_s$;

– $\Delta \ne 0$ кезінде: тұйық жүйе күйі бекітілген уақытта кеңауқымды практикалық орнықтанады.

Дәлелдеу ($\Delta = 0$ жағдайы). Үш қадам орындалады.

I кезең: бақылаушының жинақталу уақытын бағалау (T_1 алу). Бақылаушы қатесін $e_1 = x_1 - \hat{x}_1, \quad e_2 = x_2 - \hat{x}_2$ деп белгілейік. (1) жүйесі мен (11) бақылаушысын шегеріп, қате динамикасын (12) аламыз. Ляпунов функциясы ретінде $V_{\text{obs}} = \frac{1}{2} e_1^2 + \frac{1}{2} e_2^2$ таңдаймыз. 1-жорамалдан және масштабтау коэффициентін L жеткілікті үлкен таңдағанда мынаны аламыз:

$$\dot{V}_{\text{obs}} \le -\alpha_1 V_{\text{obs}}^{5/6} - \alpha_2 V_{\text{obs}}^{7/6},$$

мұнда $\alpha_1, \alpha_2 > 0$ - L, k_1, k_2 параметрлеріне байланысты оң тұрақтылар; $\frac{5}{6} < 1$ - шекті уақыттағы жергілікті жинақталуды, $\frac{7}{6} > 1$ – нөлден алыста жылдам жинақталуды қамтамасыз етеді. Лемма 1-ді осы теңсіздікке қолданып, аламыз:

$$T_1 \le \frac{1}{\alpha_1\left(1 - \frac{5}{6}\right)} + \frac{1}{\alpha_2\left(\frac{7}{6} - 1\right)} = \frac{6}{\alpha_1} + \frac{6}{\alpha_2} =: T_1^*.$$

T_1^* тек α_1, α_2 арқылы (яғни L, k_1, k_2 параметрлеріне байланысты) анықталатындықтан, $(e_1(0), e_2(0))$ бастапқы шарттарынан тәуелсіз. Демек: $t \ge T_1$ болғанда $e_1(t) = e_2(t) = 0,$ яғни $\hat{x}_2(t) = x_2(t).$

II кезең: реттегіштің жинақталу уақытын бағалау (T2 алу). $t \ge T_1$ болғанда $\hat{x}_2 = x_2$ болғандықтан, шығыс бойынша реттегіш (13) күй бойынша реттегішпен (10) дәл сәйкес келеді. Сондықтан $t \ge T_1$ болғандағы тұйық жүйе 1-ұсыныста талданған жүйемен бірдей. 1-ұсыныс бойынша бұл жүйенің координаталар басы бекітілген уақытта кеңауқымды орнықты болады, ал жинақталу уақытының жоғарғы шегі:

$$T_2 \le T_2^*(\beta_1, \beta_2, l_1, l_2),$$

мұнда T_2^* тек жобалау параметрлеріне $(\beta_1, \beta_2, l_1, l_2)$ байланысты, $x_1(T_1),\ x_2(T_1)$ бастапқы күйіне тәуелсіз (1-ұсыныс кеңауқымды нәтиже береді).

III кезең: жалпы жинақталу уақытының шегі. $[0,\ T_1]$ аралығында бақылаушы жинақталады, x шектелген болып қалады. $[T_1,\ T_1 + T_2]$ аралығында $\hat{x}_2 = x_2$ болғандықтан реттегіш жүйені T_2 уақытта нөлге жинақтайды. Демек:

$$T_{\max} := T_1 + T_2 \le T_1^* + T_2^* = \text{const},$$

яғни $T_{\max}$ тек жобалау параметрлеріне байланысты және $(x_1(0), x_2(0), \hat{x}_1(0), \hat{x}_2(0))$ бастапқы шарттарынан мүлде тәуелсіз. Теорема ($d = 0$ жағдайы) дәлелденді. □

$d \ne 0,\quad |d| \le \bar{d}$ жағдайы. $d \ne 0$ кезінде Ляпунов функциясының туындысында қосымша мүше пайда болады: $\dot{V} \le -\alpha_1 V^{p_1} - \alpha_2 V^{p_2} + \gamma\bar{d},$ мұнда $\gamma > 0.$ Стандартты практикалық орнықтылық теориясынан жүйе $T_{\max}$ уақытынан кешіктірмей

$$\Omega_d = \left\{ (x_1, x_2) : V \le \left(\frac{\gamma\bar{d}}{\min(\alpha_1, \alpha_2)} \right)^{\frac{1}{\min(p_1, p_2)}} \right\}$$

қалдық аймаққа жинақталады. Бұл аймақ $\bar{d} \to 0$ болғанда нөлге жинақталады. Жинақталу уақыты $T_{\max}$ бастапқы шарттарға тәуелсіз болып қала береді. Теорема толық дәлелденді. □

Ғылыми нәтижелерді талқылау

Ұсынылған әдісті тексеру үшін [7] жұмысында келтірілген МЭМС-айна динамикалық моделі қарастырылады, ол келесі теңдеулермен сипатталады:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = u - \dfrac{b}{J} x_2 - \dfrac{1}{J} \tau_s(x_1) + \Delta, \end{cases} \tag{14}$$

мұнда x_1 – айнаның ауытқу бұрышы (өлшенетін айнымалы), x_2 – бұрыштық жылдамдық (бақыланбайтын айнымалы), $\tau_s(x_1) = \kappa_0 x_1 + \kappa_1 x_1^3$ - сызықты емес серпімді момент, J – айнаның инерция моменті, b – тұтқыр демпфирлеу коэффициенті, u – басқару кірісі, Δ – сыртқы әсер (мысалы, акустикалық шу немесе негіздің тербелісі).

Кубтық сипаттағы τ_s сызықты емес функциясы (14) жүйесін елеулі түрде сызықты емес етеді, бұл сызықтық интеграторлық құрылымдар үшін әзірленген [18, 19] әдістерін қолдануды жоққа шығарады.

Соған қарамастан, (14) жүйесі (1) жүйесінің жеке жағдайы болып табылады, мұнда $f_2 = -\dfrac{b}{J} x_2 - \dfrac{1}{J} \tau_s(x_1)$ және 1-жорамал $c = \dfrac{b}{J},\quad \varphi(x_1) = \left(\dfrac{\kappa_0}{J} + \dfrac{\kappa_1 x_1^2}{J} \right) \sqrt{1 + x_1^2}$ болғанда орындалады. Осылайша, ұсынылған әдіс бұл жүйеге тікелей қолданылады.

Реттегіш параметрлері

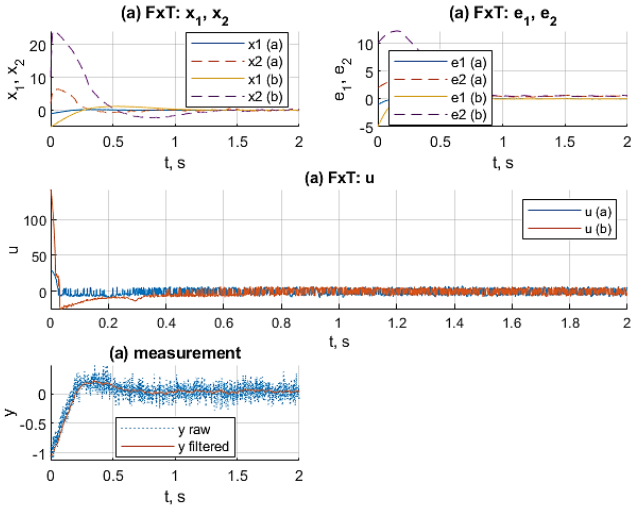
Сандық модельдеу модель параметрлерінің $J = b = \kappa_0 = \kappa_1 = 1$ мәндерінде және $\Delta = 0,5\sin(t)$ әсері кезінде жүргізілді.

Өлшенетін шығыс гаусстық шумен бұзылған: $y = x_1 + 0.1N, \quad N \sim \mathrm{N}(0,1).$ Моделдеу Matlab бағдарламалық ортасында жүзеге асырылды. Реттегіш пен бақылаушы 1-кестеде келтірілген параметрлермен синтезделді.

Кесте 1 – Синтезделген реттегіш пен бақылаушының параметрлері

Параметр	Белгіленуі	Мәні
Реттегіш көрсеткіші	τ	4/3
Бақылаушы көрсеткіші	ν	2/3
Масштабтау коэффициенті	L	5
Бақылаушы коэффициенттері	k_1, k_2	2; 1
Реттегіш коэффициенті	$l_1 = l_2$	1
Сыртқы әсерге шектеу	M	0,5
Виртуалды реттегіш параметрі	β_1	$2 + x_1^2$

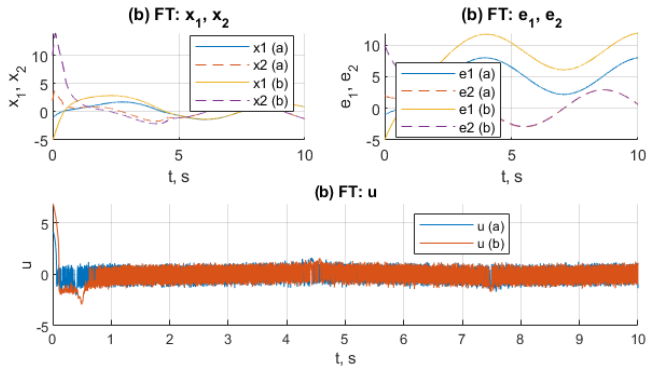
1 суретте ұсынылған FxT-алгоритмнің модельдеу нәтижелері екі бастапқы шарттар жиынтығы үшін көрсетілген: (a) жиынтығы: $(x_1(0), x_2(0), \hat{x}_1(0), \hat{x}_2(0)) = (-1, 2, 0, 0)$ және (b) жиынтығы: $(-5, 10, 0, 0)$, (c) жиынтығы $(-10, 20, 0, 0)$.



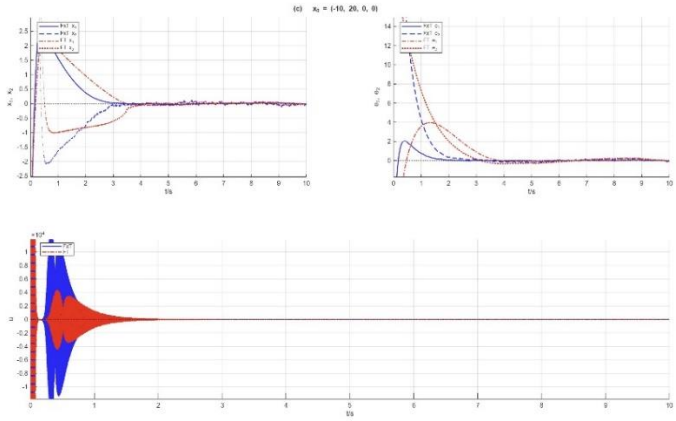
Сурет 1 – FxT-алгоритмді модельдеу нәтижелері

2-суретте $l_1 = l_2 = k_1 = k_2 = 0$ болғанда алынатын дәстүрлі шекті уақыттағы (FT) алгоритмнің нәтижелері көрсетілген. Уақыт осі 10 с-қа дейін кеңейтілген, өйткені (b) бастапқы шарттар жиынтығында жинақталу едәуір баяулайды.

3-суретте (c) жиыны үшін $(x_1(0), x_2(0)) = (-10, 20, 0, 0)$ алынған нәтижелер көрсетілген. Бастапқы ауытқу (a) және (b) жиындарымен салыстырғанда он есе үлкен болған жағдайда да FxT реттегіші жинақталу уақытын шамамен 3 секундта қамтамасыз етеді, ал FT реттегішінің жинақталу уақыты ~5 секундқа дейін ұзарады. Бұл FxT алгоритмінің бекітілген уақытта орнықтылық қасиетін растайды.



Сурет 2 – FT-алгоритмді модельдеу нәтижелері



Сурет 3 – FxT және FT алгоритмдерін модельдеу нәтижелері: $(c)\ x_0 = (-10, 20, 0, 0)$

Қорытынды

Бұл жұмыста сыртқы әсерлері бар екінші ретті жазық сызықты емес жүйелер класы үшін шығыс бойынша бекітілген уақытта кеңауқымды орнықтандыру есебі шешілді. Үш негізгі элементтен тұратын конструктивті синтез әдісі әзірленді: қадамдық жобалау әдісімен және кезеңдік Ляпунов функциялары арқылы құрылған күй бойынша реттегіш; би-шекті біртектілік техникасына негізделген, масштабтау коэффициенті реттелетін үздіксіз бекітілген уақыттағы бақылаушы; күй бағаларын күй бойынша реттегішке қою арқылы алынатын шығыс бойынша реттегіш. Тұйық жүйенің орнықтылығы би-шектік біртектілік техникасы мен Ляпунов функциялары әдісін қолдану арқылы қатаң дәлелденді.

Қабылданған жалпыланған Липшиц шарты алдыңғы жұмыстардағы шарттарға қарағанда әлсіз болып табылады және шығыс бойынша бекітілген уақыттағы орнықтандыруға жататын жүйелер класын кеңейтеді. Атап айтқанда, ұсынылған әдіс МЭМС-айна моделіне қолдануға жарамды, ал бұрынғы тәсілдер бұл жүйе үшін тиімсіз болған. Сандық модельдеу теориялық нәтижелерді растады.

Әдебиеттер тізімі

1. Bhat S.P. Finite-time stability of continuous autonomous systems / S.P. Bhat, D.S. Bernstein // SIAM J. Control Optim. – 2000. – Vol. 38, № 3. – P. 751-766.
2. Fast adaptive finite-time voltage regulation control algorithm for a buck converter system / Cheng Y. et al // IEEE Trans. Circuits Syst. II, Exp. Brief. – 2017. – Vol. 64, № 6. – P. 1082-1086.
3. Su Y. Global finite-time stabilization of planar linear systems with actuator saturation / Y. Su, C. Zheng, P. Mercorelli // IEEE Trans. Circuits Syst. II, Exp. Briefs. – 2017. – Vol. 64, № 8. – P. 947-951.
4. Polyakov A. Nonlinear feedback design for fixed-time stabilization of linear control systems / A. Polyakov // IEEE Trans. Autom. Control. – 2012. – Vol. 57, № 8. – P. 2106-2110.

5. Zuo Z. Nonsingular fixed-time consensus tracking for second-order multi-agent networks / Z. Zuo // Automatica. – 2015. – Vol. 54. – P. 305-309.
6. Time-varying feedback for regulation of normal-form nonlinear systems in prescribed finite time / Y. Song et al // Automatica. – 2017. – Vol. 83. – P. 243-251.
7. Fast fixed-time nonsingular terminal sliding mode control and its application to chaos suppression in power system / J. Ni et al // IEEE Trans. Circuits Syst. II, Exp. Brief. – 2017. – Vol. 64, № 2. – P. 151-155.
8. Mishra J.P. Arbitrary-order continuous finite-time sliding mode controller for fixed-time convergence / J.P. Mishra, X. Yu, M. Jalili // IEEE Trans. Circuits Syst. II, Exp. Brief. – 2018. – Vol. 65, № 12. – P. 1988-1992.
9. Global fixed-time stabilization for a class of switched nonlinear systems with general powers and its application / F. Gao et al // Nonlinear Anal. Hybrid Syst. – 2019. – Vol. 31. – P. 56-68.
10. Gao F. Global fixed-time stabilization of switched nonlinear systems: a time-varying scaling transformation approach / F. Gao, Y. Wu, Z. Zhang // IEEE Trans. Circuits Syst. II, Exp. Briefs. – 2019. – Vol. 66, № 11. – P. 1890-1894.
11. Fixed-time synchronization control for a class of master-slave systems based on homogeneous method / D. Wu et al // IEEE Trans. Circuits Syst. II, Exp. Briefs. – 2019. – Vol. 66, № 9. – P. 1547-1551.
12. A fixed-time output feedback control scheme for double integrator systems / B. Tian et al // Automatica. – 2017. – Vol. 80. – P. 17-24.
13. Su Y. Global fixed-time output feedback stabilization for a class of double integrator systems / Y. Su, C. Zheng // IEEE Trans. Circuits Syst. II, Exp. Briefs. – 2020. – Vol. 67, № 6. – P. 1031-1035.
14. Su Y. Robust finite-time output feedback control of perturbed double integrator / Y. Su, C. Zheng // Automatica. – 2015. – Vol. 60. – P. 86-91.
15. Andrieu V. Homogeneous approximation, recursive observer design, and output feedback / V. Andrieu, L. Praly, A. Astolfi // SIAM J. Control Optim. – 2008. – Vol. 47, № 4. – P. 1814-1850.
16. Menard T. Fixed-time observer with simple gains for uncertain systems / T. Menard, E. Moulay, W. Perruquetti // Automatica. – 2017. – Vol. 81. – P. 438-446.
17. Fixed-time output stabilization and fixed-time estimation of a chain of integrators / F. Lopez-Ramirez et al // Int. J. Robust Nonlinear Control. – 2018. – Vol. 28, № 16. – P. 4647-4665.
18. Fixed-time disturbance observer design for Brunovsky systems / J. Ni et al // IEEE Trans. Circuits Syst. II, Exp. Brief. – 2018. – Vol. 65, № 3. – P. 341-345.
19. Fixed-time consensus tracking for multiagent systems with high-order integrator dynamics / Z. Zuo et al // IEEE Trans. Autom. Control. – 2018. – Vol. 63, № 2. – P. 563-570.

Ж.Н. Ерғазы*, Қ. Әлімхан, Н.С. Мукатаев
Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева,
010000, Республика Казахстан, г.Астана., ул.Сәтпаева, 2
*e-mail: yergaziyevaaa@gmail.com

ГЛОБАЛЬНАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ ПО ВЫХОДУ С ФИКСИРОВАННЫМ ВРЕМЕНЕМ ДЛЯ ВОЗМУЩЕННЫХ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ

Представлен новый метод синтеза алгоритма управления нелинейными динамическими системами второго порядка на основе концепции фиксированно-временной стабилизации с выходной обратной связью. Исследование ориентировано на широкий класс планарных нелинейных объектов, для которых невозможен полный доступ к переменным состояния. Основу предложенной методики составляет объединение теории билимитной однородности и принципов классического ляпуновского анализа устойчивости. Такой подход позволил разработать непрерывный наблюдатель с фиксированным временем сходимости, который гарантированно оценивает неизмеряемое состояние системы независимо от начальных условий и начальных ошибок оценивания. На основе этой оценки построен непрерывный регулятор, обеспечивающий стабилизацию системы в фиксированное наперёд заданное время. Метод обладает рядом преимуществ: устойчивость и сходимость не зависят от величины и знака начальных условий; управление остаётся непрерывным, что исключает дрожание исполнительных устройств; достигается высокая робастность к ограниченным внешним возмущениям и шумам измерений. Алгоритм может быть реализован на микроконтроллерах без необходимости в высокочастотной дискретизации, что делает его привлекательным для практического использования. В качестве

примера рассмотрена динамика микромеханического зеркала (MEMS mirror), представляющего собой яркий пример высоконелинейного электромеханического объекта. Проведено численное моделирование, результаты которого подтверждают эффективность предложенной схемы управления. По сравнению с существующими конечновременными регуляторами время переходного процесса уменьшено более чем в четыре раза, а отклонение и энергетические затраты системы снижены почти вдвое. Полученные результаты подтверждают возможность применения разработанного метода в задачах высокоточного управления микро и макромеханическими приводами, а также в интеллектуальных робототехнических и виброоптических системах.

Ключевые слова: *фиксированное время стабилизации, би-лимитная однородность, выходная обратная связь, MEMS-зеркало, устойчивость по Ляпунову, нелинейные управляемые объекты, наблюдатель.*

Zh. Yergazy*, K. Alimhan, N. Mukatayev
L.N. Gumilyov Eurasian National University,
010000, Republic of Kazakhstan, Astana, Satpayev Street, 2
*e-mail: yergaziyevaaa@gmail.com

GLOBAL OUTPUT FEEDBACK STABILIZATION WITH FIXED TIME FOR DISTURBED NONLINEAR SYSTEMS

A new method is presented for synthesising a control algorithm for second-order nonlinear dynamic systems based on the concept of fixed-time stabilisation with output feedback. The study focuses on a broad class of planar nonlinear systems for which full access to state variables is not possible. The proposed methodology is based on a combination of the theory of bi-limit homogeneity and the principles of classical Lyapunov stability analysis. This approach has enabled the development of a continuous observer with a fixed convergence time, which reliably estimates the unmeasurable state of the system regardless of initial conditions and initial estimation errors. Based on this estimation, a continuous controller is constructed that ensures system stabilisation within a predetermined time.

The method has a number of advantages: stability and convergence do not depend on the magnitude and sign of the initial conditions; control remains continuous, which eliminates oscillation of the actuators; high robustness to limited external disturbances and measurement noise is achieved. The algorithm can be implemented on microcontrollers without the need for high-frequency sampling, making it attractive for practical use. As an example, the dynamics of a microelectromechanical system (MEMS) mirror are considered, which is a striking example of a highly non-linear electromechanical object. Numerical simulations were carried out, the results of which confirm the effectiveness of the proposed control scheme. Compared to existing finite-time controllers, the transient response time is reduced by more than a factor of four, whilst the system error and energy consumption are reduced by almost half. The results obtained confirm the applicability of the developed method to high-precision control of micro- and macro-mechanical actuators, as well as in intelligent robotic and vibro-optical systems.

Key words: *fixed-time stabilization, bi-limit homogeneity, output feedback, MEMS mirror, nonlinear control systems, Lyapunov stability, observer design.*

Авторлар туралы мәліметтер

Жансая Нұрғазықызы Ерғазы* – Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің «Математикалық және компьютерлік моделдеу» кафедрасының PhD докторанты, Астана, Қазақстан; e-mail: yergaziyevaaa@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-8070-0970.

Қилан Әлімхан – PhD, Doctor of science (Japan), Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің «Математикалық және компьютерлік моделдеу» кафедрасының профессоры, Астана, Қазақстан; e-mail: keylan@live.jp. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0766-2229.

Нурлан Серикович Мукатаев – PhD, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің «Жүйелік талдау және басқару» кафедрасының доценті, Астана, Қазақстан; e-mail: mukatayev_ns@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3570-4676.

Сведения об авторах

Жансая Нұрғазықызы Ерғазы* – PhD-докторант кафедры «Математическое и компьютерное моделирование» Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева, Астана, Республика Казахстан; e-mail: yergaziyevaaa@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-8070-0970.

Қилан Әлімхан – PhD, Doctor of science (Japan), профессор кафедры «Математическое и компьютерное моделирование» Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева, Астана, Республика Казахстан; e-mail: keylan@live.jp. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0766-2229.

Нурлан Серикович Мукатаев – PhD, доцент кафедры «Системного анализа и управления» Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева, Астана, Республика Казахстан; e-mail: mukatayev_ns@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3570-4676.

Information about the authors:

Zhansaya Yergazy* – PhD doctoral student of the Department of Mathematical and Computer Modelling, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Republic of Kazakhstan; e-mail: yergaziyevaaa@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-8070-0970.

Keylan Alimhan – PhD, Doctor of science (Japan), Professor of the Department of Mathematical and Computer Modelling, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Republic of Kazakhstan; e-mail: keylan@live.jp. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0766-2229.

Нурлан Серикович Мукатаев – PhD, Associate Professor of the Department of Systems Analysis and Management, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Republic of Kazakhstan; e-mail: mukatayev_ns@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3570-4676.

Редакцияға енуі 30.03.2026
Өңдеуден кейін түсуі 20.05.2026
Жариялауға қабылданды 21.05.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-16

CC BY 4.0
Check for updates

IRSTI: 20.23.17

Zh.Zh. Bagisov*, T.K. Dushaeva, A.Kh. Vakhitova, A.B. Akhmetova, A.Kh. Kassymova
West Kazakhstan Agricultural and Technical University named after Zhangir Khan,
090009, Republic of Kazakhstan, Oral, Zhangir khan street, 51
*e-mail Bag_8585@mail.ru

METHODOLOGICAL FOUNDATIONS FOR THE APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES IN TEACHING SPECIALIZED DISCIPLINES: OPPORTUNITIES AND RISKS

Abstract: *The article examines the methodological foundations of applying artificial intelligence technologies in the teaching of specialized disciplines, with a focus on identifying both their pedagogical potential and associated risks. The relevance of the study is determined by the ongoing digital transformation of education and the growing demand for innovative tools that enhance the effectiveness and adaptability of the learning process. The paper analyzes key directions of AI integration into educational practice, including adaptive learning systems, intelligent tutoring, automated assessment, and personalized learning pathways. Particular attention is given to the methodological principles that ensure the effective implementation of these technologies, such as alignment with learning objectives, didactic appropriateness, and the role of the instructor in a technology-enhanced environment.*

At the same time, the study highlights a range of challenges and risks related to the use of artificial intelligence, including potential bias in algorithmic decision-making, issues of academic integrity, reduced critical thinking, and increased dependence on digital tools. The importance of maintaining a balance between technological innovation and pedagogical control is emphasized. The results of the study contribute to the development of a structured approach to integrating artificial intelligence into higher education, aimed at improving the quality of teaching specialized disciplines while minimizing potential negative impacts.

Key words: *artificial intelligence, higher education, specialized disciplines, teaching methodologies, adaptive learning, intelligent tutoring systems, automated assessment, educational technologies, academic integrity, learning personalization.*

Introduction

The contemporary stage of higher education development is characterized by the rapid integration of digital technologies into the teaching and learning process. Among these technologies, artificial intelligence (AI) is gaining particular significance as a tool capable of transforming traditional pedagogical approaches and enhancing the effectiveness of knowledge transfer [1]. This is

©Zh.Zh. Bagisov*, T.K. Dushaeva, A.Kh. Vakhitova, A.B. Akhmetova, A.Kh. Kassymova, 2026

especially relevant in the context of teaching specialized disciplines, which are inherently complex, content-intensive, and require a high level of cognitive engagement, analytical thinking, and sustained concentration from students.

Specialized disciplines, such as those related to engineering, biotechnology, information systems, and other professional fields, are distinguished by a high degree of abstraction, interdisciplinary connections, and the need for deep conceptual understanding. Students often face difficulties in mastering such material due to its complexity, the volume of information, and the necessity to integrate theoretical knowledge with practical application. In this regard, conventional teaching methods are not always sufficient to ensure the desired level of comprehension and skill acquisition.

The use of artificial intelligence technologies offers new opportunities to address these challenges by providing adaptive, personalized, and interactive learning environments. AI-based systems can support students by offering detailed explanations, visualizations of complex concepts, real-time feedback, and individualized learning trajectories. Such tools contribute to a deeper understanding of the subject matter, facilitate knowledge retention, and enhance students' ability to apply theoretical concepts in practice.

However, the integration of AI into the teaching of specialized disciplines also raises important methodological and pedagogical questions [2]. It is necessary to determine how these technologies can be effectively incorporated into the educational process without diminishing the role of the instructor, while maintaining academic integrity and fostering independent thinking among students.

The purpose of this study is to explore the methodological foundations for the application of artificial intelligence technologies in teaching specialized disciplines, with particular emphasis on their potential to improve the clarity and depth of explanation, as well as to identify the associated risks. The study aims to contribute to the development of balanced and scientifically grounded approaches to the use of AI in higher education, ensuring both the enhancement of learning outcomes and the preservation of essential pedagogical principles (Figure 1).

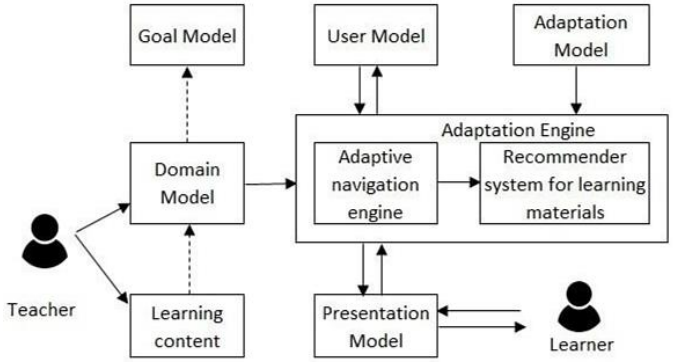


Figure 1 – The Role of Artificial Intelligence Technologies in Enhancing Learning Effectiveness in Specialized Disciplines

The figure presents a conceptual model of the use of artificial intelligence technologies in teaching specialized disciplines. It illustrates the interaction between the student, the instructor, and the intelligent system, which provides content adaptation, personalized learning, and additional explanations of complex topics. As a result, learning effectiveness and depth of understanding are significantly improved.

Materials and Methods

The purpose of this study is to develop a methodological framework for the application of artificial intelligence technologies in the teaching of specialized disciplines, focusing on improving the clarity, depth, and effectiveness of knowledge acquisition. The research is based on the premise that complex subject areas require enhanced instructional support, which can be achieved through the integration of intelligent educational tools.

The materials of the study include educational content from specialized disciplines, such as lecture materials, practical assignments, and assessment tasks, as well as digital learning resources

and datasets generated within the educational process [3]. These materials are characterized by a high level of complexity and abstraction, requiring systematic structuring and adaptive delivery methods.

The methodological approach combines theoretical analysis and applied methods. At the initial stage, a review of existing approaches to the use of artificial intelligence in education was conducted, with particular attention to adaptive learning systems, intelligent tutoring systems, and automated assessment tools. This analysis made it possible to identify key principles for integrating AI technologies into the teaching of specialized disciplines.

At the next stage, a conceptual model of the educational process enhanced by artificial intelligence was developed. The model is based on the interaction between three main components: the student, the instructor, and the AI system. The AI component performs several functions, including analysis of student performance, identification of knowledge gaps, generation of personalized recommendations, and provision of detailed explanations of complex concepts.

To support these functions, methods of natural language processing and machine learning were applied, enabling the extraction and interpretation of educational content, as well as the adaptation of instructional materials to individual learning needs. In addition, rule-based approaches were considered to ensure the alignment of AI-generated outputs with academic standards and learning objectives.

The effectiveness of the proposed approach was evaluated through qualitative analysis of its potential impact on learning outcomes, including improvements in comprehension, engagement, and knowledge retention. The integration of AI technologies within the described methodological framework allows for the creation of a more flexible and responsive educational environment, tailored to the demands of specialized disciplines.

The use of the table provides a clearer understanding of the methodological framework of the study, as it demonstrates which specific artificial intelligence tools are considered and how they can be integrated into the educational process (Table 1). This is particularly important in the context of specialized disciplines, where a high level of precision, depth of explanation, and adaptation of learning materials to individual student characteristics are required [4].

Table 1 – Artificial Intelligence Technologies and Their Applications in Teaching Specialized Disciplines

№	AI Technology	Description	Application Area	Purpose
1	Machine Learning	Algorithms that analyze data and identify patterns	Student performance analysis	Predicting learning outcomes and identifying knowledge gaps
2	Natural Language Processing (NLP)	Technologies for processing and understanding textual information	Assignment evaluation, chatbots, response generation	Enhancing understanding and automating feedback
3	Intelligent Tutoring Systems	Systems that simulate the role of a human instructor	Personalized learning	Adapting content and improving individual learning outcomes
4	Adaptive Learning Platforms	Systems that adjust content based on student performance	Online learning environments	Increasing learning efficiency and engagement
5	Expert Systems	Rule-based systems using expert knowledge	Problem-solving and simulation tasks	Supporting decision-making and practical skill development
6	Computer Vision	Technologies for analyzing images and video data	Student engagement monitoring, lab activities	Enhancing practical learning and monitoring participation
7	Recommender Systems	Algorithms for suggesting relevant content	Personalized learning paths	Improving motivation and learning outcomes

Furthermore, the table performs an analytical function by enabling the comparison of different AI technologies with their corresponding pedagogical objectives, such as personalized learning, automated assessment, increased student engagement, and decision support. This contributes to the justification of the selected methods used in the study and confirms their practical significance.

The proposed methodology was supported by the use of AI-based tools for text processing and content generation. A simplified algorithm of the system includes preprocessing of educational content, identification of key concepts, and generation of adapted explanations based on student needs. The implementation of these methods allowed improving the quality of learning materials and enhancing student understanding of complex topics.

from transformers import pipeline model = pipeline("text-generation") def generate_explanation(topic): prompt = f"Explain the concept of {topic} in simple terms" return model(prompt, max_length=100)[0]['generated_text'] print(generate_explanation("machine learning"))

The algorithm illustrates the general logic of operation of an intelligent educational module, including several sequential stages: preprocessing of educational content, identification of key concepts, semantic analysis of the topic, and automated generation of simplified explanations adapted to the educational needs of students. The use of such AI-assisted mechanisms contributes to improving the accessibility of complex theoretical material and supports personalized learning within specialized disciplines.The application of artificial intelligence technologies for generating explanations of educational material has demonstrated a positive impact on the learning process in specialized disciplines [5]. The use of automated explanation generation algorithms has simplified the perception of complex concepts and provided a more accessible presentation of theoretical content. The inclusion of this algorithm in the study serves as a methodological illustration of how artificial intelligence technologies can be integrated into educational environments for adaptive support of the learning process. The proposed approach demonstrates the potential of AI systems to improve comprehension of complex concepts, increase accessibility of educational materials, and enhance the effectiveness of teaching specialized disciplines.

The analysis revealed that the proposed method contributes to improving the level of understanding of educational content by adapting explanations to the learners' level of preparation. The ability to receive prompt and detailed feedback enables students to identify knowledge gaps more quickly and address them effectively during the learning process.

Results

The results of the study demonstrate that the integration of artificial intelligence technologies into the teaching of specialized disciplines has a positive impact on the quality of the educational process. The proposed methodological approach, based on the use of AI tools for generating explanations and adapting educational content, enabled a more effective presentation of complex theoretical material.

The analysis conducted in this study demonstrated the potential applicability of artificial intelligence technologies in the teaching of specialized disciplines. The proposed methodological approach showed that AI-based tools can support the adaptation of educational materials, simplify the explanation of complex theoretical concepts, and facilitate more flexible organization of the learning process.

In addition, the implementation of automated feedback mechanisms significantly enhances the learning process. Students are able to receive immediate responses to their queries, which accelerates the identification and correction of knowledge gaps. This, in turn, leads to increased learning efficiency and improved academic performance [6].

The results also indicate a positive effect on student engagement. The use of interactive AI-based tools stimulates active participation in the learning process and supports continuous interaction with educational content. As a result, students demonstrate a higher level of motivation and interest in mastering specialized disciplines.

Despite the significant advantages of artificial intelligence in education, its integration into the teaching of specialized disciplines is associated with a number of risks that must be carefully considered.

One of the primary risks is the potential reduction of critical thinking skills among students. The availability of ready-made explanations and automated solutions may lead to passive learning behavior, where students rely on AI-generated responses instead of independently analyzing complex problems.

Another important concern is the issue of academic integrity. The use of AI tools for generating answers, assignments, or even research content increases the risk of plagiarism and

reduces the authenticity of students' work. This creates challenges for assessment and requires the development of new evaluation strategies.

The problem of algorithmic bias also remains significant. AI systems are trained on existing data, which may contain inaccuracies or biases, potentially leading to incorrect or misleading explanations. In the context of specialized disciplines, this may negatively affect the quality of knowledge acquisition.

Additionally, there is a risk of overdependence on technology, where students may lose the ability to learn independently without AI support. This can weaken fundamental competencies and reduce long-term learning effectiveness.

From a pedagogical perspective, the diminishing role of the instructor is another concern. Excessive reliance on AI tools may shift the focus away from teacher-student interaction, which remains a critical component of effective education.

Finally, issues related to data privacy and security must be considered, as the use of AI systems often involves the collection and processing of sensitive student data.

Excessive student engagement with artificial intelligence systems and their constant reliance on automatically generated responses may lead not only to positive outcomes but also to negative educational consequences [7-8]. When AI is used without proper control, there is a risk of a decline in the quality of students' independent intellectual work. In particular, learners may lose the ability for thoughtful reading of academic texts, develop a tendency to seek ready-made concise answers without in-depth analysis, and gradually experience a reduction in their level of concentration when working with complex material.

This tendency is particularly critical in the study of specialized disciplines, where successful knowledge acquisition requires sequential analysis, terminological accuracy, logical reasoning, and the ability to work with professional sources. If students consistently replace their own cognitive effort with reliance on AI tools, this may result in superficial learning, reduced ability to interpret professional information, and a weakening of critical thinking skills.

Furthermore, continuous dependence on intelligent digital tools may foster a simplified perception of information, in which learners expect ready-made interpretations rather than engaging in independent meaning-making. In the long term, this can negatively affect academic autonomy, attention stability, and the ability to achieve a deep professional understanding of the disciplines being studied.

Discussion

The findings of the study demonstrate that artificial intelligence technologies can contribute to the modernization of teaching specialized disciplines by improving personalization, feedback efficiency, and accessibility of educational content. These results are consistent with recent studies emphasizing the role of intelligent systems in increasing learning efficiency and supporting individualized educational pathways.

At the same time, the use of AI in education should be interpreted not only from the perspective of technological effectiveness, but also from the standpoint of pedagogical risks. Excessive reliance on AI-generated content may reduce students' independent cognitive activity, weaken critical thinking, shorten attention span, and encourage superficial learning strategies [9]. This creates a methodological contradiction between the efficiency of digital tools and the need to preserve deep, reflective learning.

Therefore, AI should not be considered a replacement for the instructor. Its role should be limited to supporting the learning process through content adaptation, explanation generation, automated feedback, and individualized assistance. The teacher remains central in guiding students, developing analytical thinking, ensuring academic integrity, and helping learners meaningfully interpret knowledge.

Conclusion

The present study addressed the methodological foundations for the application of artificial intelligence technologies in teaching specialized disciplines, with the aim of improving the clarity, depth, and effectiveness of knowledge acquisition. The results obtained confirm that this objective has been achieved.

It has been demonstrated that the integration of AI-based tools into the educational process enhances the presentation of complex theoretical material, supports personalized learning, and improves students' comprehension of subject-specific concepts. The use of adaptive explanation

systems and automated feedback mechanisms contributed to increased engagement and more efficient identification and elimination of knowledge gaps.

At the same time, the study revealed that the effectiveness of artificial intelligence in education is directly dependent on the conditions of its application. Alongside the identified advantages, significant risks were highlighted, including reduced critical thinking, overdependence on AI tools, and potential negative effects on students' concentration and independent analytical abilities [10]. These findings emphasize that artificial intelligence should not replace traditional pedagogical approaches, but rather complement them within a controlled and methodologically grounded framework.

Thus, the study achieved its main objective by substantiating both the potential and the limitations of artificial intelligence technologies in teaching specialized disciplines. The proposed approach contributes to the development of balanced strategies for integrating AI into higher education, ensuring the enhancement of learning outcomes while preserving essential cognitive and pedagogical principles.

References

1. Ayala-Pazmiño M. Artificial Intelligence in Education: Exploring the Potential Benefits and Risks // 593 Digital Publisher CEIT. – 2023. – Vol. 8, № 3. – P. 892-899.
2. Wang S., et al. Artificial Intelligence in Education: A Systematic Literature Review // Expert Systems with Applications. – 2024.
3. Kalniņa D. Artificial Intelligence for Higher Education: Benefits and Challenges // Frontiers in Education. – 2024.
4. Vieriu A. M. The Impact of Artificial Intelligence on Students' Learning Performance // Education Sciences. – 2025. – Vol. 15, № 3.
5. Pikhart M. Reporting the Potential Risks of Using AI in Higher Education // Procedia Computer Science. – 2025.
6. UNESCO. Artificial Intelligence in Education: Opportunities and Challenges. – Paris : UNESCO Publishing, 2024. – 124 p.
7. Zhu H. Ethical Risks of Artificial Intelligence in Education: A Systematic Review // Humanities and Social Sciences Communications. – 2025.
8. Tlili A., Shehata B., Adarkwah M. A., Bozkurt A., Hickey D. T., Huang R., Agyemang B. ChatGPT and generative artificial intelligence in education: A review of current research and future directions // Computers and Education: Artificial Intelligence. – 2023. – Vol. 4. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.caeai.2023.100199
9. Lo C. K. What Is the Impact of ChatGPT on Education? A Rapid Review of the Literature // Education Sciences. – 2023. – Vol. 13, № 4. – DOI: https://doi.org/10.3390/educsci13040410
10. OpenAI. GPT-4 Technical Report [Электронный ресурс]. – 2023. – Режим доступа: https://arxiv.org/abs/2303.08774

Ж.Ж. Багисов*, Т.К. Душаева, А.Х. Вахитова, А.Б. Ахметова, А.Х. Касымова
Жәңгір хан атындағы Батыс Қазақстан аграрлық-техникалық университеті,
090009, Қазақстан Республикасы, Орал қ-сы, Жәңгір хан көшесі, 51
*e-mail Bag_8585@mail.ru

АРНАЙЫ ПӘНДЕРДІ ОҚЫТУДА ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ҚОЛДАНУДЫҢ ӘДІСНАМАЛЫҚ НЕГІЗДЕРІ: МҮМКІНДІКТЕР МЕН ТӘУЕКЕЛДЕР

Мақалада арнайы пәндерді оқытуда жасанды интеллект технологияларын қолданудың әдіснамалық негіздері, олардың педагогикалық әлеуеті мен соған байланысты тәуекелдерді анықтау тұрғысынан қарастырылады. Зерттеудің өзектілігі білім беру жүйесінің цифрлық трансформациясының қарқынды жүруімен және оқу үдерісінің тиімділігі мен бейімделгіштігін арттыруға мүмкіндік беретін инновациялық құралдарға деген сұраныстың өсуімен түсіндіріледі. Жұмыста жасанды интеллектті білім беру тәжірибесіне енгізудің негізгі бағыттары талданған, оның ішінде бейімделген оқыту жүйелері, интеллектуалды оқыту платформалары, білімді автоматтандырылған бағалау және дербестендірілген білім беру траекториялары қамтылған. Сонымен қатар, аталған технологияларды тиімді енгізуді қамтамасыз ететін әдіснамалық қағидаттарға, атап айтқанда білім беру мақсаттарына сәйкестігіне, дидактикалық негізділігіне және технологиялық тұрғыдан кеңейтілген білім беру ортасындағы оқытушының рөліне ерекше назар аударылған.

Алайда зерттеуде жасанды интеллектті қолданумен байланысты бірқатар сын-қатерлер мен тәуекелдер қарастырылған. Олардың қатарына алгоритмдік шешімдердің ықтимал біржақтылығы, академиялық адалдық мәселелері, сыни ойлау деңгейінің төмендеуі және білім алушылардың цифрлық құралдарға тәуелділігінің артуы жатады. Технологиялық инновациялар мен педагогикалық бақылау арасындағы тепе-теңдікті сақтау қажеттілігі атап көрсетілген. Зерттеу нәтижелері жоғары білім беру жүйесіне жасанды интеллект технологияларын құрылымдалған түрде енгізуге, арнайы пәндерді оқыту сапасын арттыруға және ықтимал теріс әсерлерді азайтуға бағытталған ғылыми-әдістемелік тәсілді қалыптастыруға ықпал етеді.
Түйін сөздер: *жасанды интеллект, жоғары білім, арнайы пәндер, оқыту әдістемесі, бейімделмелі оқыту, интеллектуалды оқыту жүйелері, автоматтандырылған бағалау, білім беру технологиялары, академиялық адалдық, оқытуды жекелендіру.*

Ж.Ж. Багисов*, Т.К. Душаева, А.Х. Вахитова, А.Б. Ахметова, А.Х. Касымова
Западно-Казахстанский аграрно-технический университет имени Жангир хана,
090009, Республика Казахстан, г. Уральск, ул. Жангир хана, 51
*e-mail Bag_8585@mail.ru

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ПРЕПОДАВАНИИ СПЕЦИАЛЬНЫХ ДИСЦИПЛИН: ВОЗМОЖНОСТИ И РИСКИ

В статье рассматриваются методологические основы применения технологий искусственного интеллекта в преподавании специальных дисциплин с акцентом на выявление их педагогического потенциала и сопутствующих рисков. Актуальность исследования обусловлена продолжающейся цифровой трансформацией системы образования и возрастающей потребностью в инновационных инструментах, способствующих повышению эффективности и адаптивности образовательного процесса. В работе проанализированы основные направления интеграции искусственного интеллекта в образовательную практику, включая адаптивные системы обучения, интеллектуальные обучающие платформы, автоматизированную оценку знаний и персонализированные образовательные траектории. Особое внимание уделено методологическим принципам, обеспечивающим эффективное внедрение данных технологий, таким как соответствие образовательным целям, дидактическая целесообразность и роль преподавателя в условиях технологически расширенной образовательной среды.

Одновременно в исследовании рассматривается ряд вызовов и рисков, связанных с использованием искусственного интеллекта, включая возможную предвзятость алгоритмических решений, проблемы академической добросовестности, снижение уровня критического мышления и усиление зависимости обучающихся от цифровых инструментов. Подчеркивается необходимость сохранения баланса между технологическими инновациями и педагогическим контролем. Полученные результаты способствуют формированию структурированного подхода к интеграции искусственного интеллекта в систему высшего образования, направленного на повышение качества преподавания специальных дисциплин при минимизации возможных негативных последствий.

Ключевые слова: *искусственный интеллект, высшее образование, специальные дисциплины, методика преподавания, адаптивное обучение, интеллектуальные обучающие системы, автоматизированная оценка, образовательные технологии, академическая добросовестность, персонализация обучения.*

Авторлар туралы ақпарат

Женис Жайлиевич Багисов* – магистр, доктор DBA, Жәңгір хан атындағы Батыс Қазақстан аграрлық-техникалық университеті, Орал, Қазақстан; e-mail: Bag_8585@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8084-1234.

Турсунгуль Канатовна Душаева – аға оқытушы, Жәңгір хан атындағы Батыс Қазақстан аграрлық-техникалық университеті, Орал, Қазақстан; e-mail: sultanna2011@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1244-823.

Айзада Хабержановна Вахитова – аға оқытушы, Жәңгір хан атындағы Батыс Қазақстан аграрлық-техникалық университеті, Орал, Қазақстан; e-mail: aiza_200485@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8433-956X.

Айдана Бакытжановна Ахметова – оқытушы, Жәңгір хан атындағы Батыс Қазақстан аграрлық-техникалық университеті, Орал, Қазақстан; e-mail: dab922636@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-1335-9786.

Акмарал Хамзиевна Касымова – п.ғ.к., доцент, профессор м.а., Жәңгір хан атындағы Батыс Қазақстан аграрлық-техникалық университеті, Орал, Қазақстан; e-mail: kasimova.akmaral2020@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4614-4021.

Сведения об авторах

Женис Жайлиевич Багисов* – магистр, доктор DBA, Западно-Казахстанский аграрно-технический университет имени Жангир хана, Уральск, Казахстан; e-mail: Bag_8585@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8084-1234.

Турсунгуль Канатовна Душаева – старший преподаватель, Западно-Казахстанский аграрно-технический университет имени Жангир хана, Уральск, Казахстан; e-mail: sultanna2011@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1244-823.

Айзада Хабержановна Вахитова – старший преподаватель, Западно-Казахстанский аграрно-технический университет имени Жангир хана, Уральск, Казахстан; e-mail: aiza_200485@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8433-956X.

Айдана Бакытжановна Ахметова – преподаватель, Западно-Казахстанский аграрно-технический университет имени Жангир хана, Уральск, Казахстан; e-mail: dab922636@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-1335-9786.

Акмарал Хамзиевна Касымова – к.п.н., доцент, и.о. профессора, Западно-Казахстанский аграрно-технический университет имени Жангир хана, Уральск, Казахстан; e-mail: kasimova.akmaral2020@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4614-4021.

Information about the authors

Zhenis Zhailyievich Bagisov* – Master, doctor of DBA, West Kazakhstan Agrarian and Technical University named after Zhangir Khan, Uralsk, Kazakhstan; e-mail: Bag_8585@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8084-1234.

Tursungul Kanatovna Dushaeva – Senior Lecturer, Zhangir Khan West Kazakhstan Agrarian and Technical University, Oral, Kazakhstan; e-mail: sultanna2011@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1244-823.

Aizada Khaberzhanovna Vakhitova – Senior Lecturer, Zhangir Khan West Kazakhstan Agrarian and Technical University, Oral, Kazakhstan; e-mail: aiza_200485@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8433-956X.

Aidana Bakytzhanovna Akhmetova – Lecturer, Zhangir Khan West Kazakhstan Agrarian and Technical University, Oral, Kazakhstan; e-mail: dab922636@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-1335-9786.

Akmaral Khamzievna Kassymova – Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Acting Professor, Zhangir Khan West Kazakhstan Agrarian and Technical University, Oral, Kazakhstan; e-mail: kasimova.akmaral2020@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4614-4021.

Received 30.03.2026
Revised 14.05.2026
Accepted 22.05.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-17

IRSTI: 50.53.17

CC BY 4.0
Check for updates

Y.E. Kozhanzharov[1]*, S.V. Grigoryeva[1], A.Zh. Alimkhanova[2]
[1]D. Serikbayev East Kazakhstan technical university,
070004, Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk, D. Serikbayev str., 19
[2]K. Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business,
010000, Republic of Kazakhstan, Astana, Kaiym Mukhamedkhanova str., 37 A.
*e-mail: kozhanzharov_ersin@mail.ru

MODELING AND ANALYSIS OF INTERFERENCE IN WIRELESS DATA TRANSMISSION SYSTEMS

Abstract: *This paper presents a hardware and software platform for modeling and analyzing interference in wireless data transmission systems aimed at studying the reliability and stability of modern wireless communication networks. The relevance of the research is driven by the rapid growth of Internet of Things devices, the active deployment of Wi-Fi and 5G technologies, and the increasing requirements for communication quality and reliability under external electromagnetic interference conditions. The main*

©Y.E. Kozhanzharov, S.V. Grigoryeva, A.Zh. Alimkhanova, 2026

objective of the study is to develop a universal tool for generating, simulating, and analyzing different types of interference in wireless communication channels with real-time visualization capabilities.

The hardware architecture includes a transmitter, receiver, and interference generator implemented on ESP32 microcontrollers. Software for controlling device parameters and simulation scenarios was developed in the C++ programming language using the Arduino IDE environment. Data exchange between system modules is organized through the WebSocket protocol within a unified Wi-Fi network, enabling synchronous real-time transmission and processing of signals. The paper describes the electrical schematics of the developed devices, the interaction architecture of the modules, and the operating algorithms of the system components.

The proposed platform makes it possible to simulate electromagnetic, noise, and adjacent-channel interference, analyze the influence of amplitude modulation on data transmission quality, and evaluate the stability of wireless communication channels. Experimental testing confirmed the effectiveness of the developed model and the operational reliability of the system. Due to its flexible architecture, the platform can be adapted for research on Wi-Fi, Bluetooth, and ZigBee technologies and can be effectively used in scientific and educational laboratories for developing and testing new interference mitigation methods in wireless networks.

Key words: *wireless network, interference, modeling, ESP32, Wi-Fi, amplitude modulation, WebSocket, hardware-software platform.Key words: modulation, interference, wireless network, software, ESP32, simulation.*

Introduction

Wireless technologies are of great importance in the modern world for ensuring communication between people, devices and systems. The relevance of wireless communications is explained by its wide range of applications, convenience, flexibility, cost-effectiveness and ability to support modern technologies and innovations. With the rapid development of technology and the increase in the number of connected devices the role of wireless communications will only increase [1,2], contributing to further progress and improving the quality of life of people.

The reliability of wireless networks impacts the efficiency and security of systems ranging from consumer IoT to mission-critical industrial and medical applications. With the increase in the number of devices and the volume of transmitted data, the problem of interference in wireless channels becomes relevant [3,4]. Interference can lead to failures in data transmission, deterioration in communication quality, and even complete system failure. The introduction of new anti-interference techniques and modulation technologies opens up opportunities to improve the reliability and performance of wireless networks. In addition, due to the rapid transition to 5G and the creation of new next-generation networks, the study of interference and methods for eliminating it has become strategically important [5-7]. Scientists and engineers will be able to better understand and control wireless communication components using hardware for generating and modulating interference, and software for analyzing and modeling it. There is a sufficient range of different simulators and platforms on the market that are focused on modeling radio channels in wireless networks. For academic purposes and scientific research, open and flexible platforms such as MatLab, CaST, CupCarbon, NS-3, OMNeT++ are used. The authors conducted research related to the analysis of problems in modern wireless networks, the impact of interference in optical wireless networks based on simulation modeling [8, 9]. However, existing problems that hinder the widespread use of emulators are highlighted: high cost, the need to maintain and update systems, and complex technology [10].

This creates a need to develop more accessible and user-friendly solutions that reduce costs, simplify the operation process and make the use of simulators more intuitive for users.

This work set the task of implementing a hardware platform for generating, modulating and analyzing interference in wireless data transmission channels, as well as developing software for modeling and analyzing this interference.

The aim of the research is to deepen the understanding of the physical processes occurring in wireless networks as a result of influence of interference in order to identify effective approaches to control and minimize them.

Materials and methods

The operating principle of wireless communications is based on the transmission of data via electromagnetic waves through airspace. This process can be broken down into several key steps. In the first stage, the data to be transmitted is converted into a form suitable for transmission over a wireless network. This is done through modulation, a process in which information, such as a digital signal, is converted into an analog signal with a specific frequency and amplitude.

Devices that model, amplify, and transmit information over the air are called transmitters. A transmitter converts an analog signal into electromagnetic waves and transmits them to a receiving device. The next step is receiving the signal and converting it. The receiving device, using an antenna, captures the signal and converts it into the original data. Thus, the operating principle of wireless communication includes modulation, transmission, propagation, reception, and demodulation of the signal.

It is important to use modern signal management and filtering techniques to minimize the impact of interference on the signal [11]. The effective use of adaptive filters and noise reduction technologies can significantly improve the quality of communications. Adaptive filters are able to dynamically change their parameters depending on environmental conditions and the level of interference, which makes them ideal for use in mobile communications and radio broadcasting. In addition, the use of various types of coding, such as forward error correction coding, can significantly reduce the impact of errors caused by interference by restoring the original data even if it is partially lost during transmission [12]. Also important is the use of channel diversification, when several frequencies or channels are used simultaneously to transmit the same information, which significantly reduces the risk of complete data loss due to interference on one of the channels [13, 14]. Such methods not only ensure the reliability and quality of data transmission in conditions of high interference, but also increase the stability of communication. A promising direction in wireless communication systems is the implementation of intelligent control systems of spectrum capable of analyzing the surrounding radio-electronic space and effectively distributing available resources [15].

Traditional approaches to interference analysis in wireless networks typically rely on the laboratory testbeds, software-based simulators, or physically separated hardware modules. Each of these methods has limited applicability in scenarios that demand simultaneous physical interference generation, flexible configuration, and real-time visualization of system behavior. This paper presents a hybrid approach involving physical interference generation with microcontrollers, software-based parameter control via WebSocket, along with real-time visualization and analysis of interference processes.

Results and discussion

Description of the hardware and software platform.

To implement a hardware and software platform for research and analysis of interference in wireless networks, it is necessary to design a transmitter, receiver and interference generator. Figure 1 shows the developed electrical circuits of the devices and the appearance in the assembly on the ESP32U microcontroller. Functionality tests were conducted, including checking all electrical connections, control response, and correct display of data.

In addition to hardware development, the creation of software for device control and data processing is of great importance. The software must be as flexible as possible to allow users to change test parameters such as frequency, signal strength, and interference characteristics. In addition, it is necessary to create a user interface for the platform that is easy to use and allows quick access to test results. Integration and testing of each part of the project are important steps. This includes checking device compatibility and testing performance under different operating conditions and load levels.

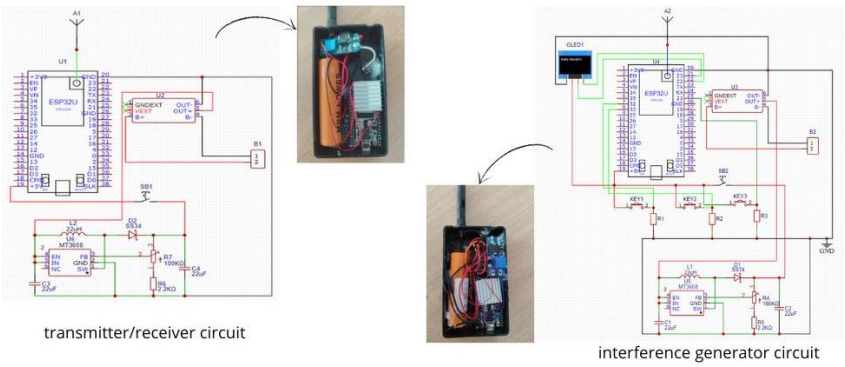


Figure 1 – Electrical circuit of devices

The architecture of interaction between modules is presented in Figure 2.

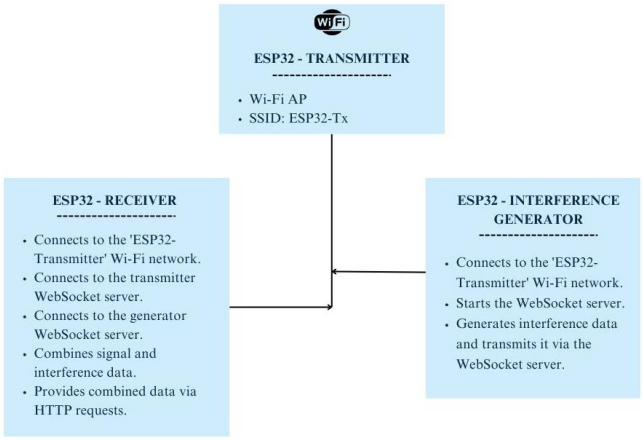


Figure 2 – Project architecture

The transmitter, receiver and jammer are developed based on the ESP32 microcontroller. The devices perform different functions. The transmitter creates a Wi-Fi access point, raises an HTTP server to serve web pages, and a WebSocket server to transmit signal data. It generates sine wave data and transmits it via WebSocket. The interference generator connects to the Wi-Fi network created by the transmitter and raises a WebSocket server to transmit interference data. It generates different types of interference depending on the mode selection and sends data via WebSocket. The receiver also connects to the transmitter's Wi-Fi network, connects to the transmitter's WebSocket server to receive signal data and to the interference generator's WebSocket server to receive interference data. The interaction between the components occurs as follows:

– the interference generator and receiver are connected to the Wi-Fi network created by the transmitter,

– the transmitter generates and transmits signal data through a WebSocket, and the interference generator generates and transmits interference data through its WebSocket,

– the receiver receives signal data from the transmitter and interference data from the interference generator, combines this data and provides it via HTTP requests.

The integration of the functionality of three modules – a transmitter, receiver and interference generator – into a single wireless network based on Wi-Fi using the WebSocket protocol for synchronous data exchange in real time is a technically new solution. Unlike existing disparate systems, this architecture ensures full coordination of the operation of all nodes with minimal delay in the transmission of control and measuring signals.

For this project, the task was to create a working system with reliable and stable software operation. The algorithms of operation of the receiver and transmitter is shown in Figure 3.

The transmitter in this system is responsible for generating sine waves that mimic analog signals in digital form. The main task of the transmitter is to send data regularly.

The developed program initializes the Wi-Fi connection, sets up IP addresses and starts the server. The data to be sent is generated and packaged in accordance with the transmission protocol, after which it is transmitted to the receiver. Special attention was paid to transmission efficiency and minimizing delays.

The receiver is used to receive data from the transmitter and, in some cases, from the interference generator. The program on this device is configured to receive data via Wi-Fi. This data is then processed and visualized as a graph on a web page, allowing the user to observe the signal processing process in real time. The received data is analyzed for errors and losses, which makes it possible to assess the quality of wireless communications. The analysis results are converted for subsequent study and comparison with theoretical interference models.

The interference generator is the main component of the system. It creates artificial interference by simulating various conditions that may be encountered in the operation of wireless devices. Interference is generated according to a specified algorithm, which can be configured in real time through the user interface. This allows you to simulate various network interference conditions, including changes in signal strength and channel switching. The implementation of the noise generator algorithm is shown in Figure 4.

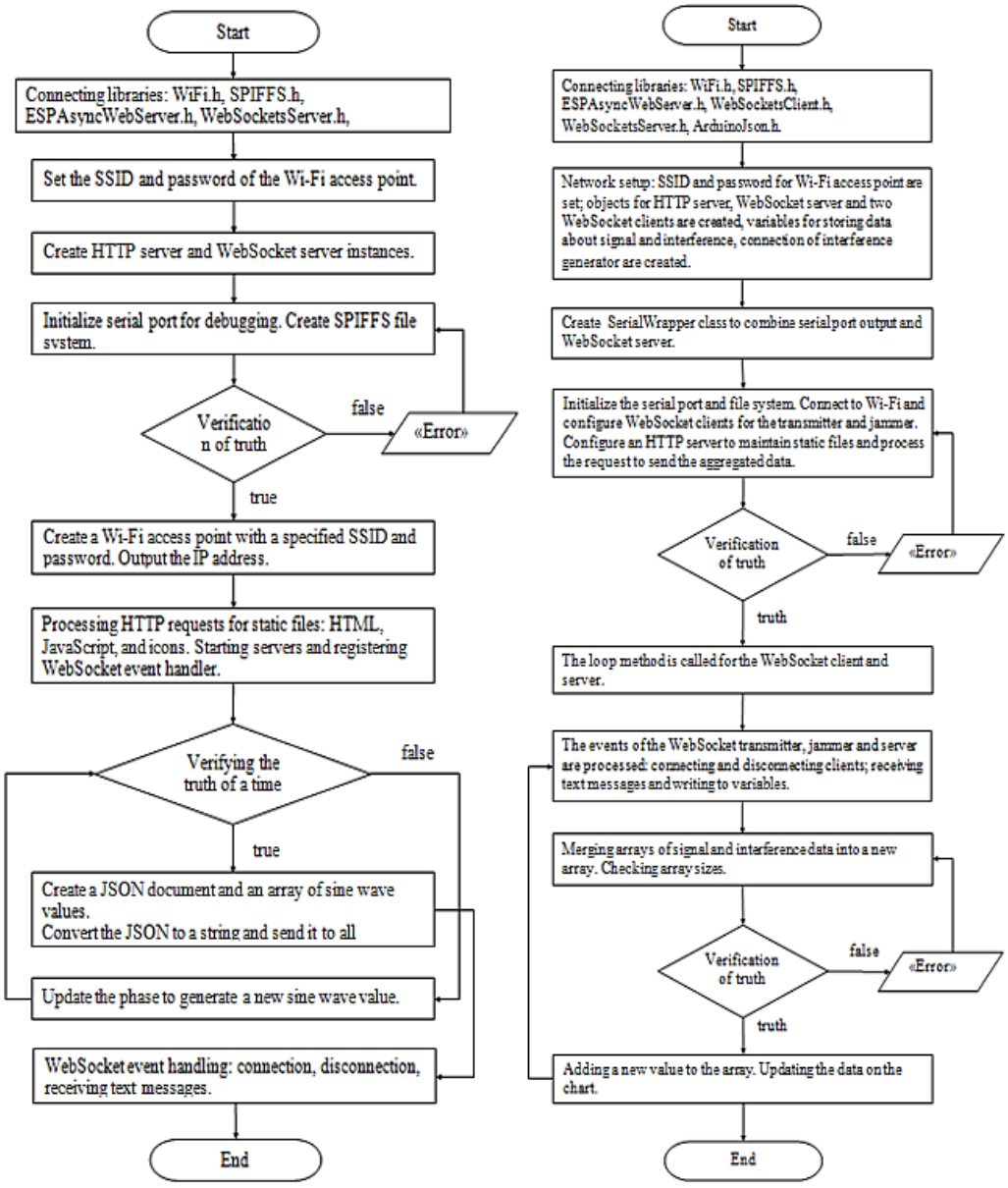


Figure 3 – Transmitter and receiver operating algorithms

The interference generator connects to a Wi-Fi network to be able to send data to the receiver. In this mode, it acts as a client on the network. WebSocket is used to send interference data to the receiver. This allows you to transmit data in real time and observe its effect on the processed signal. The code is responsible for generating random numbers that simulate interference and sending this data via WebSocket. The interference is generated as random values in a given range and can be adapted to simulate various types of noise or distortion.

One of the difficulties was synchronizing the operation of all three devices. It was possible to ensure effective interaction of devices via Wi-Fi using one network. Time synchronization between devices allows you to accurately measure the impact of interference on data transmission, which is critical for the reliability of experiments.

Implementation and experimental results. Figure 5 shows the appearance of the developed experimental stand.

The developed project studies amplitude modulation. The types of interference and their effect on the original signal are shown in Figure 6.

The developed simulator will allow one to observe the effect of interference on the initial signal and evaluate the output signal. This makes it possible to apply the most effective methods and approaches to eliminate interference in wireless data networks.

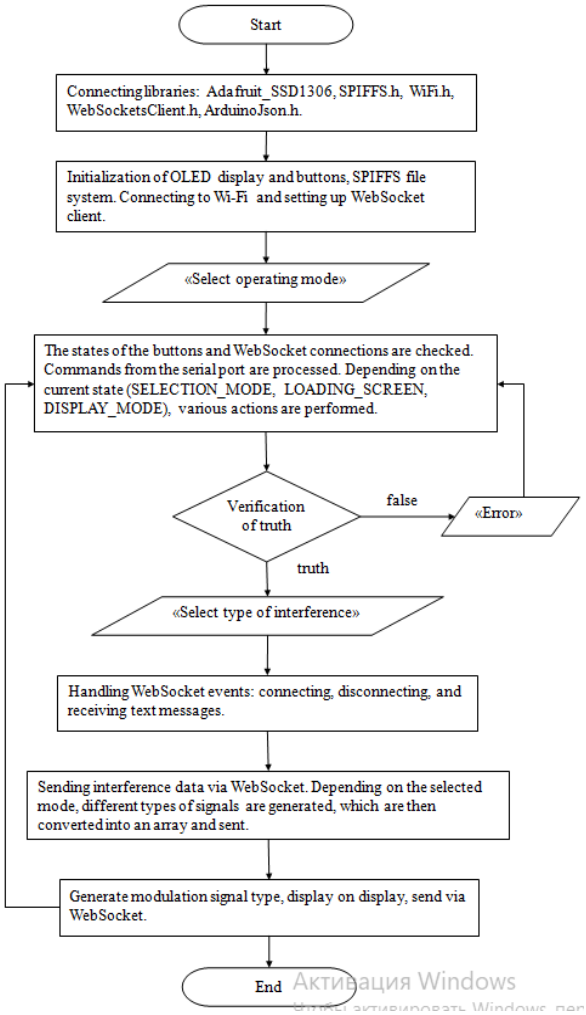


Figure 4 – The algorithm for implementing the interference generator

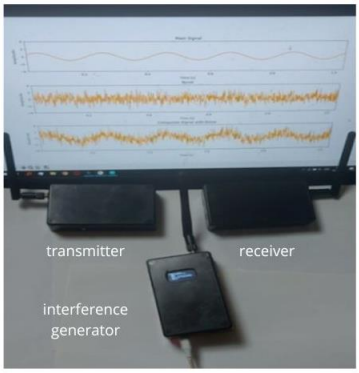


Figure 5 – Appearance of the experimental stand

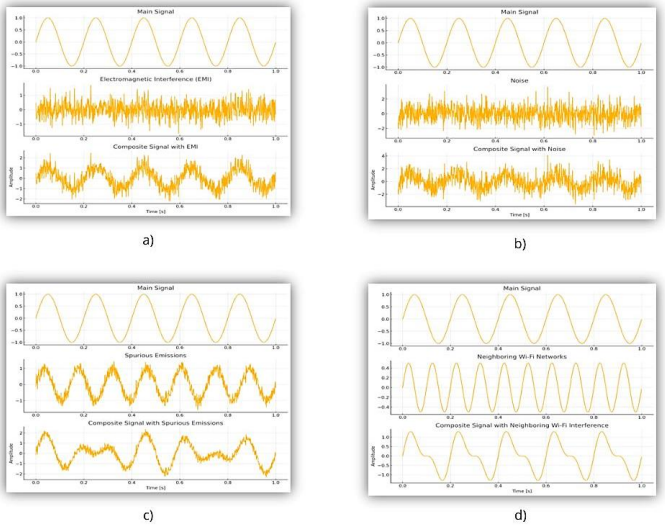
The main results of the work can be formulated as follows:

1. The developed software allows you to simulate data transmission processes in a wireless network, as well as simulate the impact of interference on this process.

2. The developed hardware platform for generating interference allows you to create different types of interference and vary their parameters to assess their impact on the quality of communication in wireless networks.

3. Flexible architecture and the use of ESP32 microcontrollers have made it possible to create an effective tool for studying the behavior of wireless networks under various interference scenarios.

The stages of experimental testing demonstrated the adequacy of the model and the performance of the simulator for analyzing interference in wireless networks (Figure 6).



a) electromagnetic interference, b) interference from neighboring Wi-Fi connections,
c) spurious radiation interference, d) noise interference

Figure 6 – Simulation graphs of the original signal with various interference

Conclusion

Thus, a new approach to the development of a hardware-software platform for studying the stability of wireless data transmission networks is proposed, based on the integration of transmitting, receiving and interference-generating modules into a single controllable Wi-Fi network using the WebSocket protocol for real time synchronous data exchange.The developed platform allows simulating the influence of interference on the initial signal in wireless data networks. The hardware platform includes a transmitter, receiver and jammer, which are developed based on the ESP32 microcontroller. Software has been developed to control the parameters of each device and simulation scenarios. The programming language C++ and the development environment Arduino IDE were used. A software module has been implemented to analyze amplitude modulation and simulate the effect of possible interference on the signal during data transmission in Wi-Fi networks.

The architecture used allows implementing other types of modulation without the need to change existing connections between program components. The ESP32 microcontroller versions allow the platform to be adapted for research into Bluetooth and ZigBee technologies. This makes it a universal basis for developing and testing innovative wireless technologies.

The prospects for using a hardware and software platform for simulating and analyzing interference in wireless data transmission channels are significant, especially in the context of ever-increasing requirements for the reliability and stability of wireless communications. Manufacturers of IoT devices, wireless routers, radio modules and other equipment using radio frequency communications can use this platform to test the stability of wireless networks by simulating various interference scenarios, which is important for developing and improving communication protocols and data transmission methods in conditions of strong interference and unstable communications. When developing new wireless solutions, manufacturers can use this platform for preliminary testing of devices to identify and eliminate possible problems at the prototyping stage, which increases the quality and reliability of final products. Due to the availability of components, the platform can be used in educational and research laboratories to study the effects of interference, simulate signals and their modulations, which helps to develop skills in working with wireless technologies. Using the platform, you can develop and test interference filtering algorithms, adaptive transmission and modulation protocols, as well as conduct tests that will help optimize the stability of data transmission in conditions of external electromagnetic and radio frequency interference.

References

1. Number of Internet of Things (IoT) connections worldwide from 2022 to 2023, with forecasts from 2024 to 2033. [Electronic resource]. https://www.statista.com/statistics/1183457/iot-connected-devices-worldwide (accessed: 20.09.2025).

2. State of IoT 2024: Number of connected IoT devices growing 13% to 18.8 billion globally. [Electronic resource]. https://iot-analytics.com/number-connected-iot-devices (accessed: 20.09.2025).
3. Krishan R. Computational Analysis of Interference for Sustainable Operation of Wireless Networks / R. Krishan // In book: Sustainable Security Practices Using Blockchain, Quantum and Post-Quantum Technologies for Real Time Applications. – 2024. – P. 87-98.
4. Dionísio R. Radio Interference of Wireless Networks and the Impact of AR/VR Applications in Industrial Environments / R. Dionísio, F. Ribeiro, J. Metrolho // Electronics. – 2023. – Vol.12(1). https://doi.org/10.3390/electronics12010067.
5. Overview on Technologies for Combating Interference and Noise Management in 5G and Beyond Network / E.A. Jiya et al // Engineering and Technology Journal. – 2024. – Vol.09(08). – P.4621-4635. https://doi.org/10.47191/etj/v9i08.01.
6. Interference Management in 5G and Beyond Network: Requirements, Challenges and Future Directions / M.U.A. Siddiqui et al // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – P.68932-68965. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3073543.
7. Routing-Based Interference Mitigation in SDN Enabled Beyond 5G Communication Networks: A Comprehensive Survey / S.H. Kazmi et al // IEEE Access, 2023. – Vol.11. – P.4023-4041. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3235366.
8. Usage of Light-Emitting Diode Lighting and Visible Light Communication Technology for Temperature Control / S. Grigoryeva et al // Acta Polytechnica Hungarica. – 2021. – Vol.18 (4). – P.7-24. https://doi.org/10.12700/APH.18.4.2021.4.1.
9. Grigoryeva S. Research of indoor temperature data transmission using visible light communication technology / S. Grigoryeva, A. Alimkhanova, M. Batalova // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1843/1/ 012004.
10. Wireless Channel Emulator Market [Electronic resource]. https://www.verifiedmarketreports.com/ru/product/wireless-channel-emulator-market/ (accessed: 20.09.2025).
11. Gonghao Ge. Principle and Analysis of Anti-interference and Anti-fading Techniques in Mobile Communication / Ge. Gonghao // Highlights in Science, Engineering and Technology. – 2022. – Vol.17. – P. 336-346. https://doi.org/10.54097/hset.v17i.2625.
12. Error-Correction Coding and Decoding / M. Tomlinson et al // Signals and Communication Technology. – 2017. – 527 p. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51103-0.
13. Evaluating and Modeling IEEE 802.15.4 TSCH Resilience against Wi-Fi Interference in New-Generation Highly-Dependable Wireless Sensor Networks / G. Cena et al // Ad Hoc Networks. – 2020. – Vol.106(4). https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2020.102199.
14. Levitsky I. Study on Simultaneous Transmission and Reception on Multiple Links in IEEE 802.11be networks / I. Levitsky, Y. Okatev, E. Khorov // International Conference Engineering and Telecommunication. – Dolgoprudny, Russia,2020. https://doi.org/10.1109/ent50437.2020.9431275.
15. Realizing Intelligent Spectrum Management for Integrated Satellite and Terrestrial Networks / Y.-C. Liang et al // Communications and Information Networks. – 2021. – Vol.6, № 1 – P.32-43. https://doi.org/10.23919/JCIN.2021.9387703.

Е.Е. Кожанжаров[1]*, С.В. Григорьева[1], А.Ж. Алимханова[2]
[1]Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті,
070004, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ., Д.Серікбаев к-сі, 19 үй.
[2]Қ. Құлажанов атындағы Казақ технология және бизнес университеті,
010000, Қазақстан Республикасы, Астана қ., Қайым Мұхамедханов к-сі, 37 А ғимараты.
*e-mail: kozhanzharov_ersin@mail.ru

ДЕРЕКТЕРДІ СЫМСЫЗ ТАСЫМАЛУ ЖҮЙЕЛЕРІНДЕГІ КЕДЕРГІЛЕРДІ МОДЕЛЬДЕУ ЖӘНЕ ТАЛДАУ

Мақалада заманауи сымсыз байланыс желілерінің тұрақтылығы мен сенімділігін зерттеуге арналған деректерді сымсыз тасымалдау жүйелеріндегі кедергілерді модельдеу және талдауға арналған бағдарламалық-аппараттық платформа ұсынылған. Зерттеудің өзектілігі Интернет заттары құрылғылары санының артуымен, Wi-Fi және 5G желілерінің қарқынды дамуымен, сондай-ақ сыртқы электромагниттік әсерлер жағдайында сымсыз байланыстың сапасы мен тұрақтылығына қойылатын талаптардың күшеюімен түсіндіріледі. Жұмыстың мақсаты – деректерді сымсыз беру арналарындағы әртүрлі кедергілерді генерациялау, модельдеу және талдау

үшін әмбебап құрал әзірлеу және процестерді нақты уақыт режимінде визуализациялау мүмкіндігін қамтамасыз ету.

Платформаның аппараттық бөлігі ESP32 микроконтроллерлері негізінде жасалған таратқыштан, қабылдағыштан және кедергі генераторынан тұрады. Құрылғылар мен модельдеу сценарийлерін басқару үшін Arduino IDE ортасында C++ бағдарламалау тілінде бағдарламалық қамтамасыз ету әзірленді. Модульдер арасындағы деректер алмасу бірыңғай Wi-Fi желісінде WebSocket протоколы арқылы жүзеге асырылады, бұл сигналдарды нақты уақыт режимінде синхронды түрде беру мен өңдеуді қамтамасыз етеді. Жұмыста құрылғылардың электрлік сұлбалары, модульдердің өзара әрекеттесу архитектурасы және жүйенің жұмыс алгоритмдері ұсынылған.

Әзірленген платформа электромагниттік, шуылдық және көршілес арналардан туындайтын кедергілерді модельдеуге, амплитудалық модуляцияның деректерді беру сапасына әсерін талдауға және сымсыз байланыс арналарының тұрақтылығын бағалауға мүмкіндік береді. Эксперименттік зерттеулер ұсынылған модельдің тиімділігі мен жүйенің жұмыс қабілеттілігін растады. Платформаның икемді архитектурасы оны Wi-Fi, Bluetooth және ZigBee технологияларын зерттеуге бейімдеуге, сондай-ақ сымсыз желілердің кедергіге төзімділігін арттыру әдістерін әзірлеуде ғылыми және білім беру мақсаттарында пайдалануға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: *модуляция, кедергі, сымсыз желі, бағдарламалық қамтамасыз ету, ESP32, симуляция.*

Е.Е. Кожанжаров[1]*, С.В. Григорьева[1], А.Ж. Алимханова[2]

[1]Восточно-Казахстанский технический университет имени Д.Серикбаева,
070004, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск, ул. Д. Серикбаева, 19
[2]Казахский университет технологии и бизнеса имени К.Кулажанова,
010000, Республика Казахстан, г. Астана, ул. Кайым Мухамедханов, здание 37 А.
*e-mail: kozhanzharov_ersin@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ПОМЕХ В БЕСПРОВОДНЫХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

В данной статье представлена программно-аппаратная платформа для моделирования и анализа помех в беспроводных системах передачи данных, ориентированная на исследование устойчивости и надежности современных беспроводных сетей. Актуальность исследования обусловлена стремительным ростом числа устройств Интернета вещей, развитием сетей Wi-Fi и 5G, а также повышением требований к качеству и стабильности беспроводной связи в условиях воздействия внешних электромагнитных помех. Целью работы является разработка универсального инструмента для генерации, моделирования и анализа различных типов помех в беспроводных каналах передачи данных с возможностью визуализации процессов в режиме реального времени.

Аппаратная часть платформы включает передатчик, приемник и генератор помех, реализованные на базе микроконтроллеров ESP32. Для управления устройствами и сценариями моделирования разработано программное обеспечение на языке C++ в среде Arduino IDE. Обмен данными между модулями осуществляется по протоколу WebSocket в единой сети Wi-Fi, что обеспечивает синхронную передачу и обработку сигналов в реальном времени. В работе представлены электрические принципиальные схемы устройств, архитектура взаимодействия модулей и алгоритмы функционирования системы.

Разработанная платформа позволяет моделировать электромагнитные, шумовые и межканальные помехи, анализировать влияние амплитудной модуляции на качество передачи данных и оценивать устойчивость беспроводных соединений. Экспериментальные исследования подтвердили работоспособность системы и адекватность предложенной модели. Гибкая архитектура платформы позволяет адаптировать ее для исследования технологий Wi-Fi, Bluetooth и ZigBee, а также использовать в научных и образовательных целях при разработке новых методов повышения помехоустойчивости беспроводных сетей.

Ключевые слова: *модуляция, помехи, беспроводная сеть, программное обеспечение, ESP32, симуляция.*

Information about the authors

Ersin Kozhanzharov* – doctoral student at the School of Digital Technologies and Artificial Intelligence, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Republic of Kazakhstan; e-mail: kozhanzharov_ersin@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-5687-9778.

Svetlana Grigoryeva – PhD, Associate Professor of the School of Digital Technologies and Artificial Intelligence, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Republic of Kazakhstan; e-mail: sgrigorieva@edu.ektu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3899-4245.

Aslima Alimkhanova – PhD, Senior Lecturer of the Department of Information Technology, K. Kulazhan Kazakh University of Technology and Businessr, Republic of Kazakhstan; e-mail: aslima_alimhanova@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7551-8846.

Авторлар туралы мәліметтер

Ерсин Ермекович Қожанжаров* – докторант, Цифрлық технологиялар және жасанды интеллект мектебі, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: kozhanzharov_ersin@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-5687-9778.

Светлана Владимировна Григорьева – PhD докторы, Цифрлық технологиялар және жасанды интеллект мектебі доценті, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: sgrigorieva@edu.ektu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3899-4245.

Аслима Жеңісқызы Алимханова – PhD докторы, Ақпараттық технологиялар кафедрасының аға оқытушысы, Қ. Құлажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: aslima_alimhanova@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7551-8846.

Сведения об авторах

Ерсин Ермекович Кожанжаров* – докторант Школы цифровых технологий и искусственного интеллекта, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д.Серикбаева, Республика Казахстан; e-mail: kozhanzharov_ersin@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-5687-9778.

Светлана Владимировна Григорьева – PhD, ассоциированный профессор Школы цифровых технологий и искусственного интеллекта, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, Республика Казахстан; e-mail: sgrigorieva@edu.ektu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3899-4245.

Аслима Женисовна Алимханова – PhD, старший преподаватель кафедры «Информационные технологии», Казахский университет технологии и бизнеса имени К.Кулажанова, Республика Казахстан; e-mail: aslima_alimhanova@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7551-8846.

Received 30.03.2026
Revised 19.05.2026
Accepted 20.05.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-18

МРНТИ: 06.71.57

А. Кулмагамбетов[1], Е. Ербаев[2], Г. Камалова[2], А. Тыныкулова[2]*, С. Кашкинбаев[1]
[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, Западно-Казахстанская обл., г. Уральск, ул. Жангир хана, 51
*e-mail: asem_110981@mail.ru

МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТРАЕКТОРИЙ ВЫПУСКНИКОВ ШКОЛ НА ОСНОВЕ ДЕМОГРАФИЧЕСКИХ ДАННЫХ И МЕТОДОВ АНАЛИЗА БОЛЬШИХ ДАННЫХ

Аннотация: *В статье рассматривается разработка модели прогнозирования образовательных траекторий выпускников школ на основе демографических и социально-экономических факторов в Республике Казахстан. Актуальность исследования обусловлена необходимостью научного обоснования процессов распределения выпускников между различными формами дальнейшего обучения в условиях демографических изменений и трансформации системы образования. В работе использованы официальные статистические данные за период 1992-2025 гг., включая показатели рождаемости, уровня жизни населения и распределения выпускников по образовательным траекториям (высшее образование, среднее профессиональное образование, обучение за рубежом и альтернативные формы занятости). Для выявления взаимосвязей между демографическими и социально-экономическими показателями и выбором образовательной траектории применены методы корреляционного и дисперсионного анализа.*

©А. Кулмагамбетов, Е. Ербаев, Г. Камалова, А. Тыныкулова, С. Кашкинбаев, 2026

Результаты исследования показали наличие статистически значимой зависимости между уровнем рождаемости, доходами населения и распределением выпускников по направлениям дальнейшего образования. Установлено, что демографические колебания формируют объём выпускников, а социально-экономические факторы определяют структуру их образовательного выбора. Предложенная модель прогнозирования позволяет оценивать будущую нагрузку на систему образования и формировать обоснованные управленческие решения в сфере образовательной политики.

Ключевые слова: *демографические факторы, социально-экономические факторы, образовательные траектории, выпускники школ, модель прогнозирования, корреляционный анализ, дисперсионный анализ, уровень жизни населения, система образования.*

Введение

Республика Казахстан признана мировым сообществом как государство с рыночной экономикой. За короткий исторический период независимости страна достигла значительного роста в экономике, интегрируясь с мировым сообществом. В этом контексте возрастают роль и значение системы образования, человеческих ресурсов как критериев уровня общественного развития, экономической мощи и национальной безопасности страны. Изменения в системе общественных отношений оказывают влияние на образование, требуя от него мобильности, адекватного ответа на реалии нового исторического этапа и соответствия потребностям развития экономики.

Глобальными факторами перспективного развития современного общества заявлены образование, наука, демографическая устойчивость человека. «Не может быть развитого государства без развитого образования – это аксиома, с которой нужно считаться» [1].

В условиях быстроизменяющегося мира и увеличения потоков информации фундаментальные предметные знания являются обязательной, но не достаточной целью образования. Обучающиеся должны не просто овладеть суммой знаний, умений и навыков, на что направлена система казахстанского образования (знаниецентризм). Гораздо важнее и сложнее привить обучающимся умение самостоятельно добывать, анализировать, структурировать и эффективно использовать информацию для максимальной самореализации и полезного участия в жизни общества (компетентность). Отсутствие унифицированной системы управления образованием на региональном уровне, недостаток штатной численности специалистов в отделах образования отрицательно сказываются на эффективности управления образованием [2].

Зарубежный опыт реформ в общеобразовательной школе свидетельствует об увеличении сроков обучения до 12-13 лет, внедрении системы внешней оценки учебных достижений и профильного обучения учащихся старшей ступени [3].

Среднее общее образование Казахстана характеризуется увеличением численности общеобразовательных школ и уменьшением контингента учащихся в отдельных регионах ввиду демографических и миграционных процессов, что повлекло рост количества малокомплектных школ (табл. 1).

Таблица 1 – Число школ и численность учащихся за 2010-2025 гг.

Год	Количество школ	Контингент обучающихся
2010	~7 500	~2,5 млн
2015	~7 400	~2,9 млн
2020	~7 440	~3,4 млн
2022	~7 800	~3,6 млн
2025	>8 000	~4,1 млн

Примечание: Данные с Казинформ, Sputnik Казахстан, Бюро национальной статистики Республики Казахстан.

Данные таблицы отражают динамику развития системы общего среднего образования Республики Казахстан за период 2010-2025 гг. Анализ показывает устойчивый рост численности учащихся при относительно стабильном количестве школ, что свидетельствует об увеличении нагрузки на образовательную инфраструктуру и усилении влияния демографических факторов. Важной особенностью развития системы общего среднего образования Республики Казахстан является наличие малокомплектных школ, характерных

преимущественно для сельской местности [3-4]. Малокомплектные школы, как правило, функционируют в условиях низкой наполняемости классов и ограниченных кадровых ресурсов, что оказывает влияние на качество образовательного процесса и эффективность использования инфраструктуры. Несмотря на предпринимаемые меры по оптимизации сети образовательных учреждений, их доля остаётся значительной, что обусловлено территориальной протяжённостью страны и неравномерностью расселения населения.

Одновременно с этим в последние годы наблюдается устойчивая тенденция к увеличению числа частных школ, особенно в крупных городах. Рост частного сектора образования связан с повышением уровня доходов населения, развитием образовательного рынка и спросом на альтернативные формы обучения. Частные школы, как правило, предлагают более гибкие образовательные программы, современные технологии обучения и улучшенные условия образовательной среды, что делает их привлекательными для определённой категории населения [5]. По данным официальных источников, в 2025-2026 учебном году в городе Астане функционирует 77 частных школ, тогда как в 2024-2025 учебном году их число составляло 72, что свидетельствует о продолжающемся росте частного сектора среднего образования. Существует гипотеза, что обучающиеся частных школ имеют более высокую вероятность поступления в зарубежные образовательные учреждения по сравнению с обучающимися государственных школ.

Государственные общеобязательные стандарты образования, основанные на предметном подходе, не дают ученику четко выраженной позитивной мотивации выбора жизненного пути, интересов и перспектив. Только 30% старшеклассников осознанно выбирают профессиональную деятельность, соответствующую их способностям. 70% будущих выпускников обладают низкой самооценкой и не подготовлены к самостоятельности в жизни. Из-за недостаточной профилизации обучения на старшей ступени выпускники школ остаются невостребованными на рынке труда.

В исследовании дополнительно использованы данные о пороговых значениях баллов Единого национального тестирования за последние пять лет [5-6]. Данные показатели характеризуют уровень требований к поступлению в высшие учебные заведения и оказывают влияние на распределение выпускников по образовательным траекториям. Данные и графики представляют собой объемные цифры, но к примеру, на 2023-2024 учебный год следующие цифры можно продемонстрировать. Общая численность студентов составила 592,7 тыс. человек, из них женщины – 53%. Число принятых студентов в текущем учебном году составло 171,7 тыс. человек, из них женщины – 52,8%. За предыдущий учебный год прибыло 67,7 тыс. студентов, выбыло – 68,7 тыс. студентов, завершили обучение – 157,1 тыс. человек. Из общей численности студентов 99,6% обучаются по очной и 0,4% - заочной формам обучения.

Диаграмма на рисунке 1 показывает, что наибольшая численность обучающихся приходится на возрастную группу 18-21 лет (с пиком в 19-20 лет), после чего наблюдается устойчивое снижение количества с увеличением возраста, что отражает типичную концентрацию студентов в традиционном возрасте получения высшего образования. Доля студентов, обучающихся в государственных организациях высшего образования, составила 45,1%, в частных организациях – 54,1%, в иностранных организациях – 0,7%.

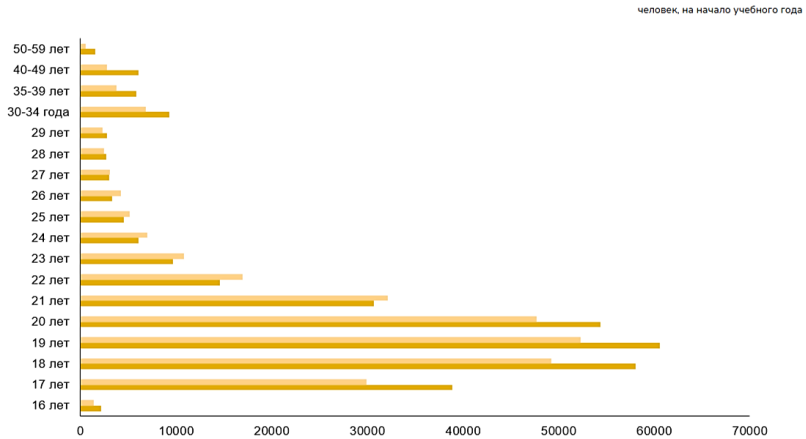


Рисунок 1 – Численность студентов в организациях высшего образования по возрастам

По квоте приема в организациях высшего образования обучаются 64,3 тыс. человек, из них 23,3 тыс. человек – дети из семей, в которых воспитываются четыре и более несовершеннолетних детей, 19,3 тыс.человек – граждане из числа сельской молодежи, 9,8 тыс. человек – дети из числа неполных семей.

На рисунке 2 представлено распределение численности обучающихся по регионам Республики Казахстан на начало учебного года, при этом наибольшая концентрация наблюдается в г. Алматы (186,6 тыс. человек), г. Шымкенте (83,4 тыс.) и г. Астане (75,0 тыс.), тогда как в остальных регионах показатели существенно ниже, что свидетельствует о выраженной территориальной концентрации образовательного контингента в крупнейших городах страны. Из общей численности поступивших студентов 71,7% принято на базе общего среднего образования, 19,7% – на базе технического и профессионального образования и 8,7% – на базе высшего образования.

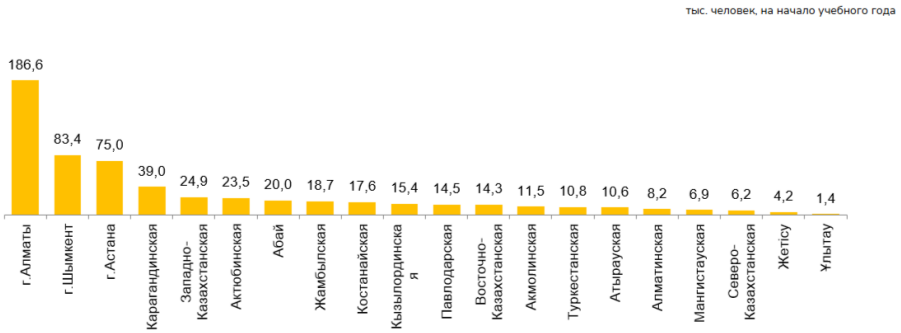


Рисунок 2 – Численность студентов по регионам

На рисунке 3 представлено распределение обучающихся по направлениям подготовки (в процентах на начало учебного года), где наибольшую долю занимают педагогические науки (28,1%), значительно опережая инженерные и строительные специальности (16,5%) и направления бизнеса, управления и права (14,0%), тогда как доля ИКТ (9,5%) и естественно-математических наук (4,4%) остаётся сравнительно низкой, что свидетельствует о доминировании гуманитарно-педагогического профиля.



Рисунок 3 – Доля студентов по специальностям (образовательным программам)

На начало 2023-2024 учебного года в Республике Казахстан число действующих высших учебных заведений составило 112 организаций, из них 77 университета, в том числе исследовательских, 14 академий, 10 институтов и приравненных к ним консерваторий, высших школ и высших училищ, 8 национальных высших учебных заведений, 3 национальных исследовательских университета.

В рамках настоящего исследования сформирована обширная база статистических данных, охватывающая демографические, социально-экономические и образовательные показатели Республики Казахстан за длительный временной период [7]. Используемые данные включают показатели рождаемости, уровня жизни населения, численности обучающихся, а также распределения выпускников по образовательным траекториям. Дополнительно в анализ включены данные Единого национального тестирования, полученные из официальных источников центра тестирования.

Значительный объём и разнородность используемой информации позволяют рассматривать данное исследование в контексте подходов, основанных на анализе больших данных. Это обеспечивает более глубокое выявление закономерностей, взаимосвязей и факторов, влияющих на формирование образовательных траекторий выпускников [7-8].

На текущем этапе работы основной акцент сделан на обосновании широты и комплексности используемой информационной базы, а также на демонстрации источников и предпосылок для построения модели прогнозирования. Представленные данные формируют основу для разработки интеллектуального модуля анализа поступлений, который в дальнейшем позволит проводить более точное моделирование и прогнозирование распределения абитуриентов.

В отличие от традиционных статистических подходов, ориентированных преимущественно на анализ отдельных демографических показателей, предложенная модель объединяет демографическую динамику, социально-экономические факторы, образовательные показатели и методы машинного обучения в единую аналитическую систему прогнозирования распределения выпускников по различным образовательным траекториям.

Предлагаемый подход позволяет оценивать не только количественную динамику будущих потоков выпускников, но и структурные изменения образовательного выбора под влиянием демографических колебаний, уровня жизни населения, региональных различий, миграционных процессов и трансформации рынка труда. В рамках исследования предложена многофакторная архитектура прогнозирования, интегрирующая показатели рождаемости, доходов населения, доступности образования, результатов ЕНТ и распределения выпускников между высшим образованием, техническим и профессиональным образованием, обучением за рубежом и альтернативными формами занятости, такие как призыв в армию, заключение брака и т д.

Отличительной особенностью разработанной модели является использование принципов ансамблевого прогнозирования и технологий big data для долгосрочного прогнозирования образовательного спроса в Казахстане. Модель позволяет выявлять будущие демографические волны и оценивать их влияние на систему приема в высшие учебные заведения, региональную образовательную инфраструктуру, академическую мобильность и распределение государственных образовательных грантов.

Материалы и методы

В современной практической деятельности, в различных областях науки, техники, технологий и экономики очень часто приходится сталкиваться с необходимостью выявления и оценки влияния отдельных факторов на изменчивость качественного признака. Если анализ применяется для изучения влияния нескольких факторов на некоторый признак, то его называют многофакторным. Среди многообразия методов многофакторного анализа можно выделить корреляционный, регрессионный и дисперсионный анализ. Но при построении модели прогнозирования отражает математическую модель

Пусть:

$$X = \{x_1, x_2, \ldots, x_n\} \quad (1)$$

– вектор входных параметров:

x_1 – рождаемость;

x_2 – доходы населения;

x_3 – уровень урбанизации;

x_4 – результаты ЕНТ;

x_5 – число выпускников;

x_6 – количество грантов;

x_7 – уровень безработицы;

x_8 – миграция.

Тогда необходимо определить:

$$Y = \{y_1, y_2, \ldots, y_m\} \quad (2)$$

где:

y_1 – поступление в вуз;

y_2 – колледж;

y_3 – обучение за рубежом;

y_4 – трудоустройство;

y_5 – NEET-категория.

При проведении дисперсионного анализа должны выполнятся ряд статистических допущений. Независимо от уровня фактора, величины отклика имеют нормальный, Гауссовский закон распределения и одинаковую дисперсию. Такое равенство дисперсий называется гомогенностью [9]. Следовательно, изменение способа обработки сказывается лишь на положении случайной величины отклика, которое характеризуется средним значением или медианой. Поэтому все наблюдения отклика принадлежат сдвиговому семейству нормальных распределений.

Считается, что методика проведения дисперсионного анализа является «робастной». Этот термин, используемый статистиками, означает, что данные допущения могут быть в некоторой степени нарушены, но несмотря на это, методику проведения дисперсионного анализа можно использовать.

В основе дисперсионного анализа лежит разделение дисперсии на части или компоненты [10]. Вариацию, обусловленную влиянием фактора, положенного в основу группировки, характеризует межгрупповая дисперсия, обозначаемая через σ^2. Она является мерой вариации частных средних по группам, которые обозначаются как $\overline{x}_j$ вокруг общей средней и определяется по формуле:

$$\overline{\sigma}^2 = \frac{\sum_{j=1}^{k} (\overline{x}_j - \overline{x})^2 \times n_j}{\sum_{j=1}^{k} n_j} \qquad (3)$$

где,

σ^2 – межгрупповая дисперсия

$\overline{x}_j$ – вариации частных средних по группам

$\overline{x}$ – общая средняя

k – число групп;

n_j – число единиц в j-ой группе;

$\overline{x}_j$ – частная средняя по j-ой группе;

$\overline{x}$ – общая средняя по совокупности единиц.

Вариацию, обусловленную влиянием прочих факторов, характеризует в каждой группе внутригрупповая дисперсия, обозначаемая как σ_j^2:

$$\sigma_j^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n} (x_{ij} - \overline{x}_j)^2}{n} \qquad (2)$$

Между общей дисперсией, которая обозначается через σ_0^2, внутригрупповой дисперсией σ^2 и межгрупповой дисперсией $\overline{\sigma}^2$ существует соотношение:

$$\sigma_0^2 = \overline{\sigma}^2 + \sigma^2 \qquad (3)$$

Внутригрупповая дисперсия объясняет влияние неучтенных при группировке факторов, а межгрупповая дисперсия объясняет влияние факторов группировки на среднее значение по группе [11-12].

Вышеизложенный материал описывает общую схему дисперсионного анализа. Для раскрытия методики проведения дисперсионного анализа, необходимо более подробно остановиться на описании случаев многофакторного дисперсионного анализа. Для начала рассмотрим частный случай однофакторного дисперсионного анализа [13].

В таблице 2 представлена обобщенная методика вычисления значений, с помощью дисперсионного анализа.

Таблица 2 – Базовая таблица дисперсионного анализа

Компоненты дисперсии	Сумма квадратов	Число степеней свободы	Средний квадрат	Математическое ожидание среднего квадрата
Межгрупповая	$Q_1 = n\sum_{i=1}^{m}(\bar{x}_{i*} - \bar{x}_{**})^2$	m-1	$S_1^2 = Q_1/(m-1)$	$M(S_i^2) = \begin{cases} \frac{n}{m-1}\sum_{i=1}^{m}(F_i - F_*)^2 + \\ \sigma^2 \text{(модель I)} \\ n\sigma_F^2 + \sigma^2 \text{(модель II)} \end{cases}$
Внутригрупповая	$Q_2 = \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}(x_{ij} - \bar{x}_{i*})^2$	mn-m	$S_1^2 = Q_2/(mn-m)$	$M(S_2^2) = \sigma^2$
Общая	$Q = \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}(x_{ij} - \bar{x}_{**})^2$	mn-1		

Гипотеза H_0 примет вид $\sigma_F^2 = 0$, а дисперсия будет рассчитана по формуле:

$$M(S_1^2) = M(S_2^2) = \sigma^2. \quad (4)$$

В однофакторном комплексе средние квадраты S^2 и S^2, являются несмещенными и независимыми оценками одной и той же дисперсии σ^2, поэтому проверка нулевой гипотезы H_0 свелась к проверке существенности различия несмещенных выборочных оценок S_1^2 и S_2^2 дисперсии σ^2.

Гипотеза H_0 отвергается, если фактически вычисленное значение статистики $F = S_1^2 / S_2^2$ больше критического $F_{\alpha:K1:K2}$, определенного на уровне значимости α при числе степеней свободы $k_1=m-1$ и $k_2=mn-m$, и принимается, если $F < F_{\alpha:K1:K2}$.

F- распределение Фишера (для x > 0) имеет следующую функцию плотности (для ν = 1, 2, ...; ω = 1, 2, ...):

$$f(x) = \frac{\tilde{A}[(\nu+\omega)/2]}{\tilde{A}(\nu(\nu/ * \tilde{A}(\omega(\omega/} * (\nu\nu/\omega^{\nu/2} * x^{(\nu\nu/2-1} * (1+[(\nu\nu/\omega * x])^{-(\nu+\omega)/2}, \quad (5)$$

где,

ν, ω – степени свободы;

Г – гамма-функция.

Применительно к данной задаче опровержение гипотезы H_0 означает наличие существенных различий в качестве изделий различных партий на рассматриваемом уровне значимости [14].

Процедура многофакторного дисперсионного анализа в варианте ее компьютерного использования несомненно более экономична, поскольку всего за один запуск решает сразу две задачи: оценивается влияние каждого из факторов и их взаимодействие.

Общая схема двухфакторного анализа, данные которого обрабатываются методом дисперсионного анализа с двумя влияющими на факторами – А и В, представлена на рисунке 4.

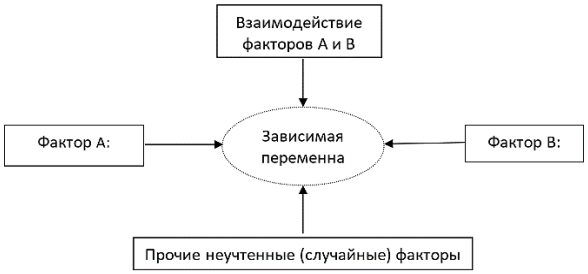


Рисунок 4 – Схема двухфакторного эксперимента

Данные, подвергаемые многофакторному дисперсионному анализу, часто обозначают в соответствии с количеством факторов и их уровней. Для практического использования моделей корреляционного анализа большое значение имеет их адекватность, т.е. соответствие фактическим статистическим данным. Корреляционный и регрессионный анализ обычно проводится для ограниченной по объёму совокупности. Поэтому показатели регрессии и корреляции – параметры уравнения регрессии, коэффициенты корреляции и детерминации могут быть искажены действием случайных факторов [15].

Возможность такого перевода знаний существует благодаря наличию определенного соответствия элементов и отношений модели элементам и отношениям оригинала. Связи соответствующих элементов и отношений одного множества (математической модели) с элементами и отношениями другого множества (оригинала) устанавливаются в процессе моделирования. Возможность установления этих связей в свою очередь позволяет определить правила переноса знаний, полученных с помощью математической модели, на моделируемый объект.

Вместе с тем при использовании метода математического моделирования необходимо иметь в виду качественно-количественную специфику моделируемого объекта и учитывать ее при переносе знаний с математической модели на оригинал. Здесь имеется в виду, прежде всего вопрос о точности получаемых данных [16]. Среди главных факторов, от которых зависит точность результатов, получаемых в процессе математического моделирования, следует отметить степень адекватности описания объекта.

Методические принципы, принятые при исследовании, опыт и теоретические знания исследователя, а также уровень развития науки вообще определяют, насколько существенные связи и отношения объекта были выделены для их описания и последующего изучения посредством математического моделирования и с какой точностью они были описаны.

На рисунке 5 представлена концептуальная модель замкнутого управленческого цикла, включающая последовательные этапы: инновационная идея → научные решения → внедрение → оценка → анализ результатов, где результаты анализа обеспечивают обратную связь и формируют основу для генерации новых идей, обеспечивая непрерывность и развитие системы.



Рисунок 5 – Цикл вычислительного эксперимента

Результаты исследования

Для моделирования прогнозирования поступления выпускников сформирована база данных Baza_kriteriev.mdb, которая состоит из двух таблиц: krits, main.

Главной при связи таблиц krits и main является таблица – krits, а подчиненной – main. Структура связи между таблицами продемонстрирована ниже.

Блок-схема на рисунке 6 представляет собой последовательный процесс построения и использования многофакторной модели на основе анализа динамических рядов: на этапе входной информации формируются исходные данные, далее осуществляется вычисление корреляционных коэффициентов для определения тесноты связей между показателями, после чего производится отбор наиболее значимых динамических рядов для включения в модель, затем определяется система коэффициентов многофакторной модели, и на заключительном этапе выполняется прогнозирование, результатом которого является выходная информация в виде прогнозных значений исследуемого показателя.

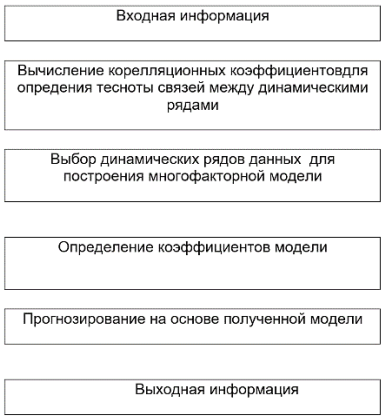


Рисунок 6 – Структурная схема алгоритма работы модели прогнозирования поступления выпускников школ в высшие и средние учебные заведения

Мировая индустрия средств разработки приложений движется в направлении максимального упрощения процесса создания программ, переводя его на визуальный уровень. Это позволяет разработчику сосредоточиться только на логике решаемой задачи. Поэтому необходимо использовать проверенные средства программного обеспечения, сочетая разумную достаточность с простыми технологиями быстрой разработки [17].

Используемые статистические данные, полученные из *Бюро национальной статистики Республики Казахстан*, выступают ключевой эмпирической основой для построения математической модели, визуализация которой представлена на рисунке 7, позволяя учитывать комплекс демографических и социально-экономических факторов и обеспечивая высокую степень достоверности результатов исследования.

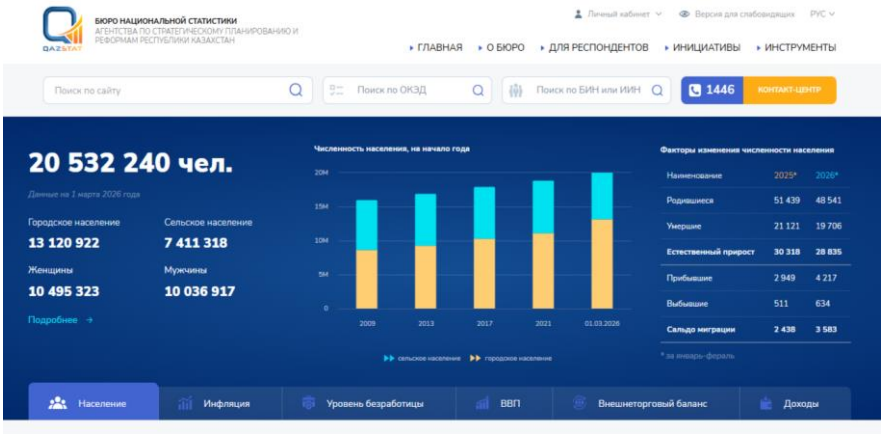


Рисунок 7 – Данные численности населения на 2026 год *(https://stat.gov.kz/ru/)*

В результате разработки и апробации математической модели прогнозирования был создан программный модуль анализа образовательных траекторий, предназначенный для обработки и визуализации статистических данных, а также оценки взаимосвязей между ключевыми факторами.

Разработанный модуль реализует многофакторный подход, учитывающий такие показатели, как численность выпускников, количество поступающих и уровень социально-экономических условий (в частности, прожиточный минимум). Модуль обеспечивает возможность интерактивного выбора параметров анализа и построения графических зависимостей, что позволяет наглядно оценивать динамику показателей и выявлять закономерности их изменения во времени.

На рисунке 8 представлена визуализация результатов работы модуля, включающая графики распределения основных показателей. Анализ показывает, что увеличение численности выпускников сопровождается ростом числа поступающих, однако данная зависимость носит нелинейный характер и определяется совокупностью демографических и социально-экономических факторов. В частности, изменение уровня доходов населения оказывает дополнительное влияние на интенсивность поступления в образовательные учреждения.

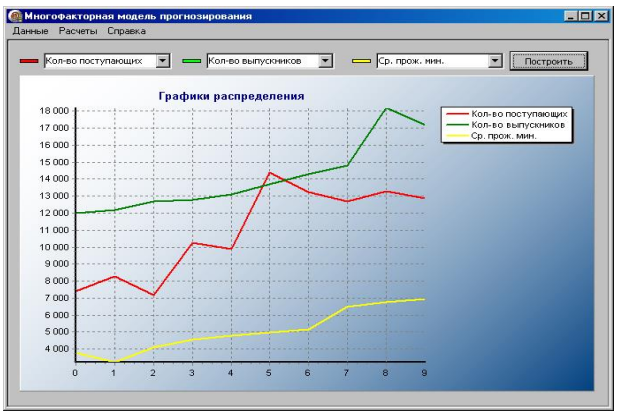


Рисунок 8 – Графики распределения многофакторной модели прогнозирования

Обсуждения и дискуссия

Реализация поставленной цели направлена на формирование научно обоснованных подходов к планированию образовательной политики, включая распределение государственных образовательных грантов, развитие региональных вузов и выравнивание образовательных возможностей. Это позволит обеспечить более равномерное распределение студенческого контингента, снизить нагрузку на инфраструктуру крупных городов и стимулировать развитие образовательных центров в регионах.

В этой связи важным направлением исследования является прогнозирование регионального распределения студентов с целью оптимизации потоков поступления и повышения доступности высшего образования в различных регионах страны.

В условиях наличия значительного массива статистических данных, включающего показатели пороговых баллов Единого национального тестирования, уровня прожиточного минимума, а также косвенные характеристики социального положения домохозяйств (в том числе численность детей в семье), формируется комплексная база для анализа факторов, влияющих на формирование контингента студентов высших учебных заведений.

Указанные показатели отражают различные аспекты доступности высшего образования. Так, пороговые баллы ЕНТ характеризуют уровень академических требований к поступающим и выступают инструментом отбора абитуриентов. В свою очередь, величина прожиточного минимума и социально-экономические характеристики семей определяют финансовые возможности населения, включая способность оплачивать обучение на коммерческой основе.

В совокупности данные факторы формируют условия, в которых происходит выбор образовательной траектории выпускников школ. В частности, для семей с ограниченными финансовыми ресурсами вероятность поступления на платное обучение существенно снижается, что усиливает зависимость от государственных образовательных грантов или приводит к выбору альтернативных траекторий, таких как среднее профессиональное образование или отказ от продолжения обучения.

Заключение

Использование многомерной статистической информации позволяет рассматривать формирование студенческого контингента как результат взаимодействия демографических, академических и социально-экономических факторов. Это обосновывает необходимость применения комплексных моделей анализа и прогнозирования, учитывающих влияние указанных переменных на распределение абитуриентов в системе высшего образования. В результате проведённого исследования достигнуты поставленные цели, связанные с разработкой модели прогнозирования образовательных траекторий выпускников на основе демографических и социально-экономических факторов. Полученные результаты подтвердили наличие статистически значимых взаимосвязей между ключевыми показателями и позволили обосновать возможность прогнозирования контингента студентов.

Исследование носит этапный характер и является основой для дальнейшей научной работы. В перспективе планируется серия публикаций, направленных на углублённый анализ больших данных, расширение используемой статистической базы и совершенствование моделей прогнозирования.

Список литературы

1. Кушербаев К.Е. Приоритетные направления развития образования и науки на ближайший период / К.Е. Кушербаев, Министр Образования и науки РК. Из выступления на расширенном заседании Коллегии Министерства // Актуальные проблемы высшей школы. – 2000 г.

2. Сатубалдин С. Бизнес-образование в Республике Казахстан: «Проблемы и стратегические ориентиры на XXI век» / С. Сатубалдин, исполнительный директор КИМЭП при Президенте Республики Казахстан, академик, доктор экономических наук, профессор // Актуальные проблемы высшей школы. – 2000 г.
3. Кушербаев К.Е. Стратегия развития высшего образования в Республике Казахстан / К.Е. Кушербаев, А.К. Ахметов, А.Е. Абылкасымова – Алматы: Изд.-во «Білім», 1998. – 232 с.
4. Приказ Министерства образования и науки РК «Об утверждении Правил о порядке планирования расходов на подготовку кадров с высшим профессиональным образованием и расходов на обучение одного студента». № 681 от 18 сентября 2002. – Астана.
5. Приказ Министерства образования и науки РК «Об утверждении финансовых нормативов по высшему образованию». № 467 от 13 июня 2002. – Астана.
6. Законодательство об образовании в Республике Казахстан. – Алматы: ЮРИСТ, 2005. – 212 с.
7. Аксельрод В.И. Моделирование и реализация системы дополнительного краеведческого образования учащихся / В.И. Аксельрод // Дополнительное образование. – 1999. – № 2. – С. 9-12.
8. Аксенова Л.И. Модель комплексного образовательного учреждения / Л.И. Аксенова //Дефектология. – 2002. – № 4. – С. 15-23.
9. Кундышева Е.С. Математическое моделирование в экономике: Учебное пособие для вузов / Под ред. Б.А. Суслакова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Дашков и К, 2005. – 352 с.
10. Бондаревская Е.В. Ценностно-смысловые ориентиры и стратегические направления развития сельской школы [Опытно-экспериментальная работа по моделированию образоват. пространства в сел. школе] / Е.В. Бондаревская // Педагогика. – 2002. – № 5. – С. 52-64.
11. Artificial intelligence in education: A systematic review / S. Wang et al // Expert Systems with Applications. – 2024.
12. Cheah Y.H. Integrating generative artificial intelligence in K-12 education: practices and barriers / Y.H. Cheah, J. Lu, J. Kim // Computers and Education: Artificial Intelligence. – 2025.
13. Filiz O. Teachers and AI: Factors influencing AI integration in education / O. Filiz, M.H. Kaya, T. Adiguzel // Education and Information Technologies. – 2025.
14. Maheshwari G. Factors influencing students' intention to adopt AI tools in higher education / G. Maheshwari // Education and Information Technologies. – 2023.
15. Hugerth M.W. Profiling students' AI-use behavior in higher education / M.W. Hugerth // Computers and Education Open. – 2025.
16. Józsa G. School-level and demographic differences in AI use in education / G. Józsa // Education Sciences. – 2026.
17. Factors influencing students' adoption of AI technologies in higher education / M.S. Rosli et al // IEEE Access. – 2026.

References

1. Kusherbaev K.E. Prioritetnye napravleniya razvitiya obrazovaniya i nauki na blizhaishii period / K.E. Kusherbaev, Ministr Obrazovaniya i nauki RK. Iz vystupleniya na rasshirennom zasedanii Kollegii Ministerstva.// Aktual'nye problemy vysshei shkoly. – 2000 g. (In Russian).
2. Satubaldin S. Biznes-obrazovanie v Respublike Kazakhstan: «Problemy i strategicheskie orientiry na XXI vek» / S. Satubaldin, ispolnitel'nyi direktor KIMEHP pri Prezidente Respubliki Kazakhstan, akademik, doktor ehkonomicheskikh nauk, professor // Aktual'nye problemy vysshei shkoly. – 2000 g. (In Russian).
3. Kusherbaev K.E. Strategiya razvitiya vysshego obrazovaniya v Respublike Kazakhstan / K.E. Kusherbaev, A.K. Akhmetov, A.E. Abylkasymova – Almaty: Izd.-vo «Bilim», 1998. – 232 s. (In Russian).
4. Prikaz Ministerstva obrazovaniya i nauki RK «Ob utverzhdenii Pravil o poryadke planirovaniya raskhodov na podgotovku kadrov s vysshim professional'nym obrazovaniem i raskhodov na obuchenie odnogo studenta». № 681 ot 18 sentyabrya 2002. – Astana. (In Russian).
5. Prikaz Ministerstva obrazovaniya i nauki RK «Ob utverzhdenii finansovykh normativov po vysshemu obrazovaniyu». № 467 ot 13 iyunya 2002. – Astana. (In Russian).
6. Zakonodatel'stvo ob obrazovanii v Respublike Kazakhstan. – Almaty: YURIST, 2005. – 212 s. (In Russian).
7. Aksel'rod V.I. Modelirovanie i realizatsiya sistemy dopolnitel'nogo kraevedcheskogo obrazovaniya uchashchikhsya / V.I. Aksel'rod // Dopolnitel'noe obrazovanie. – 1999. – № 2. – S. 9-12. (In Russian).
8. Aksenova L.I. Model' kompleksnogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya / L.I. Aksenova //Defektologiya. – 2002. – № 4. – S.15-23. (In Russian).

9. Kundysheva E.S. Matematicheskoe modelirovanie v ehkonomike: Uchebnoe posobie dlya vuzov / Pod red. B.A. Suslakova. – 2-e izd., pererab. i dop. – M.: Dashkov i K, 2005. – 352 s. (In Russian).
10. Bondarevskaya E.V. Tsennostno-smyslovye orientiry i strategicheskie napravleniya razvitiya sel'skoi shkoly Opytno-ehksperimental'naya rabota po modelirovaniyu obrazovat. prostranstva v sel. shkole / E.V. Bondarevskaya // Pedagogika. – 2002. – № 5. – S. 52-64. (In Russian).
11. Artificial intelligence in education: A systematic review / S. Wang et al // Expert Systems with Applications. – 2024. (In English).
12. Cheah Y.H. Integrating generative artificial intelligence in K-12 education: practices and barriers / Y.H. Cheah, J. Lu, J. Kim // Computers and Education: Artificial Intelligence. – 2025. (In English).
13. Filiz O. Teachers and AI: Factors influencing AI integration in education / O. Filiz, M.H. Kaya, T. Adiguzel // Education and Information Technologies. – 2025. (In English).
14. Maheshwari G. Factors influencing students' intention to adopt AI tools in higher education / G. Maheshwari // Education and Information Technologies. – 2023. (In English).
15. Hugerth M.W. Profiling students' AI-use behavior in higher education / M.W. Hugerth // Computers and Education Open. – 2025. (In English).
16. Józsa G. School-level and demographic differences in AI use in education / G. Józsa // Education Sciences. – 2026. (In English).
17. Factors influencing students' adoption of AI technologies in higher education / M.S. Rosli et al // IEEE Access. – 2026. (In English).

А. Кулмагамбетов[1], Е. Ербаев[2], Г. Камалова[2], А. Тынықулова[*], С. Кашкинбаев[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, Батыс Қазақстан облысы, Орал қ., Жәңгір хан көшесі, 51
*e-mail: asem_110981@mail.ru

ДЕМОГРАФИЯЛЫҚ ДЕРЕКТЕР ЖӘНЕ ҮЛКЕН ДЕРЕКТЕРДІ ТАЛДАУ ӘДІСТЕРІ НЕГІЗІНДЕ МЕКТЕП ТҮЛЕКТЕРІНІҢ БІЛІМ БЕРУ ТРАЕКТОРИЯЛАРЫН БОЛЖАМДАУ МОДЕЛІ

Мақалада Қазақстан Республикасында мектеп түлектерінің білім беру траекторияларын демографиялық және әлеуметтік-экономикалық факторлар негізінде болжау моделін әзірлеу қарастырылады. Зерттеудің өзектілігі демографиялық өзгерістер мен білім беру жүйесінің трансформациясы жағдайында түлектерді әртүрлі білім алу бағыттары бойынша бөлу үдерістерін ғылыми тұрғыдан негіздеу қажеттілігімен айқындалады. Жұмыста 1992–2025 жылдар аралығындағы ресми статистикалық деректер пайдаланылды, оның ішінде туу деңгейі, халықтың өмір сүру деңгейі және мектеп түлектерінің білім беру траекториялары бойынша бөліну көрсеткіштері (жоғары білім, техникалық және кәсіптік білім, шетелде білім алу және баламалы қызмет түрлері). Демографиялық және әлеуметтік-экономикалық көрсеткіштер мен білім беру бағытын таңдау арасындағы өзара байланыстарды анықтау үшін корреляциялық және дисперсиялық талдау әдістері қолданылды.

Зерттеу нәтижелері туу деңгейі, халық табыстары және түлектердің білім беру бағыттары бойынша бөлінуі арасында статистикалық тұрғыдан маңызды байланыс бар екенін көрсетті. Демографиялық ауытқулар түлектер санының көлемін қалыптастырса, әлеуметтік-экономикалық факторлар олардың білім беру таңдау құрылымын айқындайтыны анықталды. Ұсынылған болжау моделі білім беру жүйесіне түсетін болашақ жүктемені бағалауға және білім беру саясаты саласында негізделген басқарушылық шешімдер қабылдауға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: *демографиялық факторлар, әлеуметтік-экономикалық факторлар, білім беру траекториялары, мектеп түлектері, болжау моделі, корреляциялық талдау, дисперсиялық талдау, халықтың өмір сүру деңгейі, білім беру жүйесі.*

A.Kulmagambetov[1], Y. Yerbayev[2], G.Kamalova[2], A.Tynykulova[*], S. Kashkinbaev[1]
[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
*e-mail: asem_110981@mail.ru

MODEL FOR FORECASTING EDUCATIONAL PATHWAYS OF SCHOOL GRADUATES BASED ON DEMOGRAPHIC DATA AND BIG DATA ANALYTICS METHODS

This study focuses on the development of a forecasting model for the distribution of school graduates across educational pathways based on demographic and socio-economic factors in the Republic of Kazakhstan. The relevance of the research is driven by the need for a scientific understanding of how graduates are allocated among different forms of further education under conditions of demographic change and transformation of the education system. The study is based on official statistical data for the period 1992–2025, including indicators of birth rates, living standards, and the distribution of graduates across educational pathways (higher education, vocational education, studying abroad, and alternative forms of activity). To identify relationships between demographic and socio-economic variables and the choice of educational pathway, correlation analysis and analysis of variance (ANOVA) were applied.

The results reveal statistically significant relationships between birth rates, population income levels, and the distribution of graduates across different educational directions. It is established that demographic fluctuations determine the volume of graduates, while socio-economic factors shape the structure of their educational choices. The proposed forecasting model enables the assessment of future demand for the education system and supports the development of evidence-based policy decisions in the field of education.

Key words: *demographic factors, socio-economic factors, educational pathways, school graduates, forecasting model, correlation analysis, analysis of variance (ANOVA), living standards, education system.*

Авторлар туралы ақпарат

Адильжан Кулмагамбетов – 8D06101 «Есептеу техника және бағдарламалық қамтамасыз ету» оқу бағдарламасының докторанты, Астана халықаралық университеті, Ақпараттық технология және инженерий жоғары мектебі; e-mail: adilzhan.good@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-8875-5390.

Ербол Ербаев – PhD докторы, Жәңгір хан атындағы Батыс Қазақстан аграрлық-техникалық университеті, Орал, Қазақстан; e-mail: yerbayev.yerbol@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3186-9994.

Гаухар Камалова – Физика-математика ғылымдарының кандидаты, Цифрлық экономика және тұрақты даму» институтының доценті, «Цифрлық даму» орталығының директоры Жәңгір хан атындағы Батыс Қазақстан аграрлық-техникалық университеті, Орал, Қазақстан; e-mail: gokhakam@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5252-4573.

Асемгуль Тыныкулова* – (PhD) философия докторы, 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.

Сексенбай Кашкинбаев – техника ғылымдарынның кандидаты, доцент, Астана халықаралық университеті, Ақпараттық технология және инженерий жоғары мектебі; e-mail: seksenbay.kb@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-7000-0653.

Сведения об авторах

Адильжан Кулмагамбетов – докторант ОП 8D06101 – Вычислительная техника и программное обеспечение, Международный университет Астана, Казахстан; e-mail: adilzhan.good@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-8875-5390.

Ербол Ербаев – доктор PhD, и.о. доцента Политехнического института, Западно-Казахстанский аграрно-технический университет имени Жангир хана, Уральск, Казахстан; e-mail: yerbayev.yerbol@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3186-9994.

Гаухар Камалова – кандидат физико-математических наук, доцент Института цифровой экономики и устойчивого развития, Западно-Казахстанский аграрно-технический университет имени Жангир хана, Уральск, Казахстан; e-mail: gokhakam@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5252-4573.

Асемгуль Тыныкулова* – доктор философии (PhD), и.о.доцента Высшей школы информационных технологий и инженерий, Международный университет Астана, Казахстан; e-mail: asem_110981@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4557-6869.

Сексенбай Кашкинбаев – кандидат технических наук, доцент, Международный университет Астана, Казахстан; e-mail: seksenbay.kb@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-7000-0653.

Information about the authors

Adilzhan Kulmagambetov – PhD student, Astana International University, Astana, Kazakhstan; e-mail: adilzhan.good@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-8875-5390.

Yerbol Yerbayev – PhD, Acting Associate Professor of the Polytechnic Institute, 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.

Gaukhar Kamalova – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor at the Institute of Digital Economy and Sustainable Development, Director of the Center for Digital Development, Zhangir Khan West Kazakhstan Agrarian-Technical University, Oral, Kazakhstan; e-mail: gokhakam@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5252-4573.

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.

Seksenbay Kashkinbaev – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Astana International University, Kazakhstan; e-mail: seksenbay.kb@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-7000-0653.

Поступила в редакцию 30.03.2026
Поступила после доработки 22.05.2026
Принята к публикации 25.05.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-19

CC BY 4.0
Check for updates

ҒТАХР: 20.15.13

А.Р. Оразаева[1], Н.С. Смакова[1]*, К.М. Максутова[2], А.А. Абильдина[1], А.Е. Туребаева[3]
[1]Қ. Құлажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті,
010000, Қазақстан Республикасы, Астана қ., Мұхамедханов к-сі, 37А
[2]Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
010000, Қазақстан Республикасы, Астана қ., Сәтпаев к-сі, 2
[3]Академик Е.А. Бөкетов атындағы Қарағанды ұлттық зерттеу университеті,
100022, Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ., Университетская к-сі, 28
*e-mail: oar_is@mail.ru

СҮТ БЕЗІ АУРУЛАРЫН ЕРТЕ АНЫҚТАУДА ЗАМАНАУИ НЕЙРОНДЫҚ ЖЕЛІЛЕРДІ ҚОЛДАНУ (YOLOV8, FASTER R-CNN)

Аңдатпа: *Бұл зерттеу сүт бездерінің патологиясын тиімді анықтау үшін заманауи машиналық оқыту әдістерін, атап айтқанда YOLOv8 және Faster R-CNN, қолдану арқылы жетілдірілген әдістерді зерттеуге және дамытуға бағытталған. Сүт безі ауруларын диагностикалаудың дәстүрлі тәсілдері сын тұрғысынан қаралып, олардың тиімділігі қазіргі автоматтандырылған әдістермен салыстырылды. Ұсынылған модельдер маммографиялық кескіндерге қолданылады және патологиялық өзгерістерді аурудың ауырлық деңгейі мен сипаттамаларын ескере отырып, алты деңгейге жіктейді. Бұл көпдеңгейлі жіктеу аурудың дамуын дәлірек бағалауға мүмкіндік береді және емдеуді жекелендірілген жоспарлау үшін маңызды ақпарат ұсынады.*

Эксперименттік нәтижелер жоғары дәлдікті және кескінді жылдам өңдеуді көрсетіп, сүт безіндегі ықтимал патологияларды сенімді және жылдам анықтауға мүмкіндік береді. Зерттеу нәтижелері машиналық оқыту алгоритмдерінің диагностика процесін едәуір жақсарта алатынын, дәрігерлерге дәлірек және уақытында ақпарат беретінін көрсетеді. Сонымен қатар, бұл зерттеу автоматтандырылған жүйелердің ерте диагностика, емдеу стратегияларын оңтайландыру және науқастардың жағдайын жақсартудағы әлеуетін көрсетеді. Нәтижелер медициналық визуализацияда жасанды интеллекттің рөлі артып келе жатқанын және сүт безі ауруларын басқаруға әсерін көрсетеді.

Түйін сөздер: *Терең оқыту, Faster Region-based Convolutional Neural Network (R-CNN), You Only Look Once (YOLOv8), деректер базасы, модель.*

Кіріспе

Соңғы онжылдықта терең оқыту әдістері (Deep Learning) медициналық бейнелерді автоматты түрде өңдеу және талдау мүмкіндігін айтарлықтай жақсартты [1]. Сүт безі қатерлі ісігін анықтау және классификациялау тапсырмасының ең тиімді тәсілдерінің бірі Faster R-CNN (Region-based Convolutional Neural Network) алгоритмін пайдалану болып табылады. Берілген

©А.Р. Оразаева, Н.С. Смакова, К.М. Максутова, А.А. Абильдина, А.Е. Туребаева, 2026

алгоритм дәлдік пен жоғары өнімділікті біріктіреді, бұл оны тез және дәл диагностика маңызды болатын медициналық қолданбалар үшін тамаша құрал етеді. Faster R-CNN – кескіндердегі нысандарды тиімдірек және дәл анықтауға арналған R-CNN сериялы алгоритмдердің жетілдірілген нұсқасы [2]. Faster R-CNN негізгі идеясы суреттегі қызығушылық тудыратын ықтимал аймақтарды бөлектеу үшін Аймақтық ұсыныстарын (Region Proposals) пайдалануда болып табылады. Faster R-CNN архитектурасының негізгі құрамдас бөліктеріне кіріс кескінінен белгілерді шығаруға жауап беретін конволюционды желілер (Convolutional Networks), аймақтық ұсыныстар желісі (Region Proposal Network, RPN), олар объектілер бола алатын аймақтар үшін ұсыныстарды генерациялайтын негізгі конволюциялық желіге салынған арнайы желі және желілік бастар (Network Heads), анықталған нысандарды классификациялайтын және олардың шекараларын нақтылайтын қосымша қабаттар кіреді [3].

Faster R-CNN моделін оқыту үшін таңбаланған деректердің жеткілікті көлемі болуы керек. Сүт безі қатерлі ісігі жағдайында мұндай деректерге маммограмма, ультрадыбыстық және МРТ сканерлеу сияқты медициналық суреттер кіреді. Модель қалыпты және патологиялық құрылымдарды ажыратуды үйренуі үшін бұл суреттерге сарапшылар түсініктеме беруі керек. Деректерді аугментациялау (үлкейту) оқу жиынының әртүрлілігін арттыру және модельдің жалпылау қабілетін жақсартуға мүмкіндік беретін маңызды қадам болып табылады. Деректерді үлкейтудің негізгі әдістеріне кескінді айналдыру және жылжыту, жарықтық пен контрастты өзгерту, шуды бұрмалау, айналық шағылыстыру және масштабтау жатады. Модельдің оңтайлы өнімділігіне қол жеткізу үшін оқу жылдамдығы, шағын топтама өлшемдері, дәуірлер саны және т.б. сияқты гиперпараметрлер дұрыс реттелуі керек. Оқыту процесі бірнеше кезеңдерді қамтиды: модельді инициализациялау, алдын ала дайындалған конволюционды желіні жүктеу және RPN баптау, RPN оқыту, аймақтық ұсыныстар желісін кескінде қызығушылық тудыратын аймақтарды бөлуге үйрету және желі басшыларын оқыту, модельдің классификациялық мен регрессиялық бөліктерін класстарды анықтау және олардың шекараларын нақтылау үшін оқыту.

Зерттеу тәсілдері

Сүт безі қатерлі ісігін анықтау және классификациялау үшін Faster R-CNN әдісін пайдалану диагностиканың дәлдігі мен жылдамдығын айтарлықтай арттыратын перспективалы әдіс болып табылады. Бұл зерттеуде осы әдісті қолданудың негізгі аспектілері, соның ішінде деректерді дайындау, модельді оқыту және оның өнімділігін бағалау қарастырылды. Қолданыстағы шектеулерге қарамастан, медициналық диагностикада терең оқытуды пайдалану сүт безі қатерлі ісігін ерте анықтау және тиімді емдеу үшін жаңа мүмкіндіктер ашады [4, 5].

VinDr-Mammo деректер жинағы компьютерлік көру арқылы сүт безі қатерлі ісігінің диагностикасы обслысында зерттеу үшін маңызды ресурс болып табылады. Бұл деректер жиынтығы медициналық кескінді тану және талдау алгоритмдерін әзірлеуге және сынауға қолдау көрсету үшін арнайы әзірленген. Ол тіндердің түрлері мен патологиялары бойынша алуан түрлі маммографиялық кескіндердің кең ауқымды жинағын көрсетеді, машиналық оқыту модельдеріне сүт бездерінің әртүрлі жағдайларын жоғары дәлдікпен тануды үйренуге мүмкіндік береді. VinDr-Mammo деректер жинағындағы әрбір суретке мамандар мұқият аннотация жасайды, бұл жоғары сапалы белгілерді қамтамасыз етеді және бұл деректерді алгоритмдерді оқыту және тексеру үшін пайдалануға мүмкіндік береді. Осындай дәл аннотациялардың болуы патологиялардың әртүрлі түрлерін, соның ішінде қатерсіз және қатерлі ісіктерді дәл танитын және жіктей алатын сенімді машиналық оқыту модельдерін жасау үшін өте маңызды. Бұл зерттеушілерге клиникалық тәжірибеде диагностикалық процедураларды айтарлықтай жақсарта алатын дәлірек және тиімді алгоритмдерді әзірлеуге мүмкіндік береді.

VinDr-Mammo деректер жинағының тағы бір маңызды ерекшелігінің бірі оның класс бойынша теңгерімділік орнатуы болып табылады. Түрлі тіндердің түрлері мен патологиялары бар әртүрлі кескіндерді қоса алғанда, медициналық деректер жиынтығында жиі кездесетін мәселе болып табылатын кластардың теңгерімсіздігімен байланысты проблемаларды болдырмауға көмектеседі. Теңгерімделген деректер машиналық оқыту модельдеріне жақсырақ үйренуге және сүт безінің әртүрлі жағдайларын тануда жоғары дәлдікке қол жеткізуге мүмкіндік береді [6, 7]. VinDr-Mammo академиялық зерттеулерде және маммографиялық кескіндерді автоматтандырылған талдаудың жаңа әдістерін әзірлеуде

белсенді түрде қолданылады. Бұған компьютер көмегімен ісіктерді тану, қатерлі ісік қаупін бағалау және кескін сапасын жақсарту сияқты тапсырмалар кіреді. VinDr-Mammo деректер жинағы медициналық білім беру мен диагностикадағы заманауи технологияларды ілгерілетуде маңызды рөл атқарады, денсаулық сақтау сапасын жақсартуға және диагностикалық процедуралардың тиімділігін арттыруға көмектеседі. Берілген жиынтықта әрқайсысы төрт суреттен тұратын 5000 зерттеу бар, барлығы 20 000 суретті құрайды. Барлық кескіндер DICOM форматында ұсынылған және әр сүт безінің екі стандартты проекциясын қамтиды: краниокаудальды (CC) және медиальды латеральды қиғаш (MLO). Бұл формат дәл талдау және диагностика үшін қажетті жоғары сапалы және егжей-тегжейлі кескіндерді сақтауға мүмкіндік береді [8]. Деректер жиынындағы әрбір суретте сүт безінің жағдайы туралы толық ақпарат беретін көптеген атрибуттар бар. Негізгі атрибуттар BI-RADS көрсеткіші болып табылады, сүт безі тығыздығы және кескіннің биіктігі мен енін, кеуде орны мен бағытын (солға немесе оңға) және проекция түрін (CC немесе MLO) қамтитын кескін метадеректері болып табылады. BI-RADS бағалары 1-ден 5-ке дейін өзгереді, мұнда 1 – қалыпты, 5 – қатерлі ісікке шалдығу ықтималдығы жоғары. Сүт безінің тығыздығы төрт санатқа жіктеледі: A, B, C және D, ол маммограммаларды интерпретациялауға және тәуекелді бағалауға көмектеседі. Кескіннің метадеректері суретке түсірудің техникалық параметрлерін және қолданылатын жабдық моделін қамтиды.

BI-RADS санаттары және деректерді тарату. Деректер жиынындағы әрбір сурет қатерлі ісік ауруының ықтималдығын бағалау үшін пайдаланылатын BI-RADS (Breast Imaging Reporting and Data System) арқылы аннотацияланады [9, 10]. Деректерді BI-RADS санаттары бойынша бөлу келесідей жүреді:

1. BI-RADS 1: 13 406 кескін (қалыпты).
2. BI-RADS 2: 4676 кескін (қатерсіз нәтижелер).
3. BI-RADS 3: 972 кескін (мүмкін қатерсіз).
4. BI-RADS 4: 1005 кескін (қатерлі ісікке күдікті).
5. BI-RADS 5: 426 кескін (қатерлі ісіктің жоғары ықтималдығы).

Бұл санаттар сүт безінің жағдайын және қатерлі ісік ықтималдығын классификациялауға көмектеседі, бұл ауруды ерте анықтау және тиімді емдеу үшін өте маңызды (1-сурет).

study_id	series_id	image_id	laterality	view_posit	height	width	breast_bira	breast_den	finding_cat	finding_bir	xmin	ymin	xmax	ymax	split
48575a27b	26de4993fa	4e3a578fe5	R	CC	3518	2800	BI-RADS 4	DENSITY C	['Mass']	BI-RADS 4	2355.13989	1731.64001	2482.97998	1852.75	training
48575a27b	26de4993fa	dac39351b(	R	MLO	3518	2800	BI-RADS 4	DENSITY C	['Mass']	BI-RADS 4	2386.67993	1240.60998	2501.80004	1354.04003	training
75e8e4893	853b70e7e(	c83f780904	R	CC	3518	2800	BI-RADS 3	DENSITY C	['Global Asy	BI-RADS 3	2279.17993	1166.51000	2704.43994	2184.26000	training
75e8e4893	853b70e7e(	893528bc3(	R	MLO	3518	2800	BI-RADS 3	DENSITY C	['Global Asy	BI-RADS 3	1954.27001	1443.64001	2589.76000	2193.81005	training
c3487424fe	77619c914:	318264c88:	R	CC	3518	2800	BI-RADS 4	DENSITY C	['Architectura	BI-RADS 4	2172.30004	1967.41003	2388.69995	2147.15991	training
c3487424fe	77619c914:	adf961b537	R	MLO	3518	2800	BI-RADS 4	DENSITY C	['Architectura	BI-RADS 4	2252.37988	2367.07006	2438.06005	2523.42993	training
5683854ea	4ac331112(	2f944efb1c1	L	CC	3518	2800	BI-RADS 3	DENSITY C	['Mass']	BI-RADS 3	142.899002	2171.81005	439.584991	2403.37011	test
5683854ea	4ac331112(	7385e8cf7b	L	MLO	3518	2800	BI-RADS 3	DENSITY C	['Mass']	BI-RADS 3	142.899002	2045.17004	417.876007	2265.87988	test
7c51789da(	ac4d0771f6	f581ef53bb	L	CC	3518	2800	BI-RADS 4	DENSITY C	['Nipple Retr	BI-RADS 4	588.874023	1397.70996	812.361999	1734.71997	training
7c51789da(	ac4d0771f6	1142cdfbfe	L	MLO	3518	2800	BI-RADS 4	DENSITY C	['Nipple Retr	BI-RADS 4	632.033996	1727.09997	930.142028	2190.83007	training
89524e5f37	0838a0b90(	5a94dd668	R	CC	3518	2800	BI-RADS 3	DENSITY C	['Mass']	BI-RADS 3	1988.06005	1793.73999	2139.90991	1967.45996	training
89524e5f37	0838a0b90(	2bbe58aab	R	MLO	3518	2800	BI-RADS 3	DENSITY C	['Mass']	BI-RADS 3	2319.43994	1833.43005	2472.87988	1969.68005	training
d94fa669c3	198e0af097	84327b97a	L	CC	3518	2800	BI-RADS 3	DENSITY C	['Mass']	BI-RADS 3	146.856002	1529.27001	544.387023	1941.39001	training
d94fa669c3	198e0af097	d51acb58b	L	MLO	3518	2800	BI-RADS 3	DENSITY C	['Mass']	BI-RADS 3	168.690002	1760.98999	579.971008	2133.62988	training
57674c2def	080c6eda9!	dc4694b54:	L	CC	3518	2800	BI-RADS 5	DENSITY C	['Architectura	BI-RADS 5	405.055999	1599.65002	600.893981	1867.48999	training
57674c2def	080c6eda9!	dc4694b54:	L	CC	3518	2800	BI-RADS 5	DENSITY C	['Mass']	BI-RADS 4	-6.2529702	1805.45996	180.511001	1996.94995	training
57674c2def	080c6eda9!	040cc1725!	L	MLO	3518	2800	BI-RADS 5	DENSITY C	['Architectura	BI-RADS 5	446.209991	1667.46997	702.867980	1965.31994	training
57674c2def	080c6eda9!	040cc1725!	L	MLO	3518	2800	BI-RADS 5	DENSITY C	['Mass']	BI-RADS 4	156.190002	1279.10998	314.239990	1458.55004	training
917a4de3b:	22bada39b(	4dd8faf113	L	CC	3518	2800	BI-RADS 3	DENSITY C	['Mass']	BI-RADS 3	153.445999	1873.61999	449.356994	2225.02001	test
917a4de3b:	22bada39b(	19056b152(	L	MLO	3518	2800	BI-RADS 3	DENSITY C	['Mass']	BI-RADS 3	141.677001	1369.22998	432.544006	1619.73999	test
31fa226bc9	98ca3b2d3(	625aa3505(	L	MLO	3518	2800	BI-RADS 4	DENSITY C	['Mass']	BI-RADS 4	192.143005	1897.51000	373.973999	1993.38000	test
e233b75f7d	1a1f62519a	8c799782af	L	CC	3518	2800	BI-RADS 4	DENSITY C	['Suspicious	BI-RADS 4	74.0460968	1196.10998	271.809997	1476.81005	training

Сурет 1 – Оқытуға арналған деректер жинағы

VinDr-Mammo деректер жинағы келесі атрибуттарды сақтайтын кескін туралы ақпараты бар аннотацияланған құжатты қамтиды:

– study_id (Зерттеудің бірегей идентификаторы). Бұл пациентті арнайы медициналық зерттеуін идентификациялайтын бірегей нөмір. Әрбір зерттеудің өзіндік бірегей study_id бар;

– series_id (Кескін серияларының идентификаторы). Бұл идентификатор белгілі бір нақты зерттеумен байланысты кескіндер тобына жатады. Мысалы, бір зерттеу суреттердің бірнеше серияларын қамтуы мүмкін;

– image_id (Кескіннің бірегей идентификаторы). Кескіндер сериясындағы әрбір медициналық кескінге тағайындалған бірегей нөмір. Бұл әр суретті бірегей түрде идентификациялауға көмектеседі;

– laterality (Сүт безі жағы). Бұл кескінде кеуденің сол немесе оң жағы көрсетілгенін көрсетеді;

– view_position (Проеция позициясы). Бұл диагностика үшін кескіннің қандай позицияда алынғанын сипаттайды (мысалы, CC – краниокаудальды, MLO медиальды латеральды қиғаш);

– height (Пиксельдегі кескін биіктігі). Пиксельмен өлшенген кескіннің биіктігі;

– width (Пиксельдегі кескін ені). Пиксельмен өлшенген кескіннің ені;

– breast_birads (Сүт безі үшін BI-RADS бағалау). Бұл қатерлі ісік ауруының ықтималдығын анықтау үшін қолданылатын BI-RADS стардарты бойынша сүт безі жағдайының баллдық жүйесі;

– breast_density (Сүт безінің тығыздығы). Бұл суреттегі сүт безі тінінің тығыздығын сипаттайтын санат болып табылады. Бұл кескінді интерпретациялау және тәуекелді бағалау үшін маңызды;

– finding_categories (Табылған аномалиялар санаты). Бұл медициналық кескінде табылған ауытқулар немесе өзгерістер санаттары. Массаларды, кальцинацияларды, асимметрияларды және басқа да өзгерістер түрлерін қамтиды. Бұл бағанда суретте анықталған сүт безі өзгерістерінің немесе ауытқулардың санаттарынан тұрады. Бұл санаттар патология түрлерін классификациялауға және сипаттауға көмектеседі, олар мыналарды қамтуы мүмкін: Mass (Масса) – түзілу немесе ісік, Architectural Distortion (Архитектуралық бұрмалану) – тіндердің қалыпты құрылымының өзгеруі, Global Asymmetry (Ауқымды ассиметрия) – тіндердің асимметриялық орналасуы, Nipple Retraction (Емшек ұшының тартылуы) – емшек ұшының тартылуы немесе орналасуының өзгеруі, Suspicious Calcification (Күдікті кальцификация) – қатерлі өзгерістерді көрсетуі мүмкін микрокальцификаттардың бар болуы, Focal Asymmetry (Фокальды асимметрия) – нақты аймақта тіндердің асимметриялық орналасуы. Әрбір санат рентгенологтарға және басқа медицина мамандарына анықталған патологиялардың түрі мен сипатын жақсы түсінуге көмектеседі, бұл өз кезегінде диагноз қоюға және одан әрі емдеу жоспарын таңдауға көмектеседі;

– finding_birads (Аномалия үшін BI-RADS бағасы). Бұл кескіндегі әрбір нақты аномалияға тағайындалған BI-RADS бағасы. Бұл ауытқудың қатерлі ісік болу ықтималдығын анықтауға көмектеседі;

– xmin, ymin, xmax, ymax. Бұл параметрлер кескіндегі әрбір аномалия үшін шекті өріс координаттарын (bounding box) пиксельдермен көрсетеді. Олар суреттегі аномалияның орнын анықтайды және өзгерістерді дәл локализациялау және талдау үшін қолданылады.

Бұл атрибуттар машиналық оқыту алгоритмдерін талдау және әзірлеу үшін құрылымдық деректерді қамтамасыз ете отырып, әрбір кескінді және оның мазмұнын егжей-тегжейлі сипаттауға мүмкіндік береді.

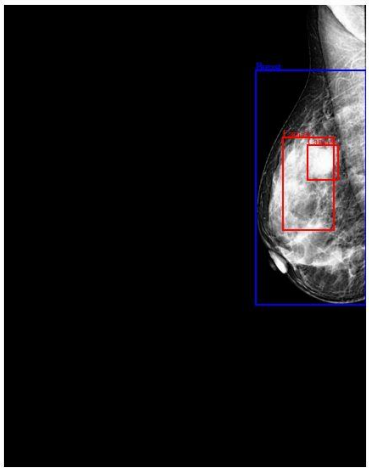
Зерттеу нәтижелері

Модельді әзірлеу процесі бірнеше негізгі кезеңдерді қамтиды: кескінді оқу және өңдеу, белгілерді есептеу, кескінді классификациялау, модельді оқыту және кейінгі валидация және тестілеу [9]. Оқу және өңдеу кезеңінде кеуде кескіндері DICOM форматында жүктеледі және қызығушылық аймақтарының көрінуін жақсарту үшін қалыпқа келтіру және гистограмманы теңестіру сияқты әдістер қолданылады. Әрбір күдікті аймақ үшін аудан, периметр, эксцентриситет, орташа қарқындылық және т.б. қоса алғанда, әртүрлі белгілер есептеледі. Сондай-ақ контраст, корреляция, энергия және біртектілік сияқты сұр деңгейдің бірлескен пайда болу матрицасы (GLCM) арқылы есептелген белгілер де ескеріледі. Содан кейін кескіндер BI-RADS санаттарына жіктеледі: BI-RADS 1 және BI-RADS 2 қалыпты деп саналады, ал қалған санаттар ауытқулардың бар екенін көрсетеді. Faster R-CNN әдісі аннотацияланған деректерге негізделген терең оқыту моделін үйрету үшін пайдаланылады, ол кескіндерді тиімді классификациялай алады және аномальді аймақтарды дәл локализациялайды. Модель оның дәлдігі мен жалпылау қабілетін бағалау үшін жаңа деректер жинағында валидация және сынақ кезеңдерін өтеді. Нәтижесінде маммографиялық кескіндердегі қалыптан тыс аймақтарды дәл классификациялауға және локализациялауға мүмкіндік беретін, диагностикалық дәлдікті айтарлықтай арттыратын және сүт безі қатерлі ісігін ерте анықтауды жеңілдететін терең оқыту моделі құрылды [11-13].



Сурет 2 – Сүт безі қатерлі ісігін анықтау нәтижесі

2-суретте R-MLO (Right Mediolateral Oblique) бағытымен маммограмма (сүт безінің рентген суреті) көрсетілген, бұл оң жақ сүт безінің қиғаш проекциясын білдіреді. 18-суретте сүт безі көрсетілген, қызыл тіктөртбұрыш диагностикалық тұрғыдан қызығушылық аймағын ерекшелейді. Бұл тіктөртбұрыштың ішінде ықтималдығы 0,94 болатын BI-RADS (Breast Imaging-Reporting and Data System) мәні 3 көрсетілген, бұл әрі қарай бақылауды қажет ететін қорытындыға сәйкес келеді, өйткені бұл қатерлі ісік ықтималдығы аз болатын қатерсіз процесі бар зақымдану болуы мүмкін. Нәтиже берілген суреттен жасалған диагностикалық қорытындыны көрсетеді. Осылайша, кескін маммографиялық талдаудың нәтижесін білдіреді, мұнда күдікті аймақ анықталған және тәуекел дәрежесін көрсететін жүйемен бағаланған.



Сурет 3 – Деректер жиынынан координат нүктесімен қабаттастырылған кескіннің визуалды көрінісі

3-суретте диагностика тұрғысынан алғанда қызығушылық аймақтарын көрсететін оң жақ сүт безінің маммограммасы көрсетілген. Бірнеше қызыл тікбұрыштар күдікті немесе ықтимал аномальді деп анықталған аумақтарды көрсетеді. Бұл аймақтарды маммографиялық кескіндердегі патологиялық өзгерістерді анықтау үшін арнайы әзірленген машиналық оқыту моделі арқылы идентификациялауға болады. Сондай-ақ қызыл тіктөртбұрыштардың бірінде мәтін белгісі бар, бұл аумақта ауытқулар болуы мүмкін екенін көрсетеді. Қызыл тіктөртбұрыштардан басқа, суретте бүкіл кеудені қоршап тұрған үлкен көк тіктөртбұрыш та көрініп тұр. Бұл көк контур талдау жүргізілген аймақты немесе бағалауға арналған модельмен қамтылған жалпы қызығушылық аймағын көрсетеді. Медициналық кескіндерде мұндай көрнекі элементтерді пайдалану мамандарға диагностикалық процесті айтарлықтай жеңілдететін қалыпты емес аймақтарды дәлірек локализациялауға және бағалауға көмектеседі. Осы

суретте көрсетілгендей сынақ нәтижелерінің көрнекі көрінісі диагностикалық дәлдікті арттырудың маңызды құралы болып табылады. Ол дәрігерлерге егжей-тегжейлі қарастыруды қажет ететін нақты аймақтарға назар аударуға мүмкіндік береді, бұл қорыта келгенде, сүт безі қатерлі ісігі сияқты патологияларды ерте анықтауға және емдеуге әкеледі.

Мамография суреттеріндегі ісігі бар аймақтарды автоматты түрде анықтауға арналған YOLOv8 және Faster R-CNN модельдерін зерттедік. Екі архитектура да нысанды анықтауға арналған заманауи терең оқыту әдістерін білдірсе де, олардың жұмыс істеу принциптері, кескінді өңдеу жылдамдығы және зақымдану аймақтарын анықтаудағы дәлдік деңгейлері әртүрлі.

Сандық көрсеткіштер негізіндегі модельдерді салыстыру:

Метрика	**YOLOv8**	**Faster R-CNN**
mAP	0.91	0.94
Precision	0.90	0.95
Recall	0.89	0.93
F1-score	0.89	0.94
FPS	41	12
Әр суретке өңдеу уақытының орташа ұзақтығы	0.024 с	0.083 с
Архитектуралық тип	бірсатылы	екісатылы
Есептеу ресурстарына талаптар	орташа	жоғары
Нақты уақыттағы жұмысы	қолданылады	шектеулі

Эксперимент нәтижелері көрсеткендей, YOLOv8 моделі бір сатылы нысанды анықтау архитектурасының арқасында маммография суреттерін өңдеу жылдамдығын айтарлықтай арттырады. Орташа өңдеу жылдамдығы секундына 41 суретке жетті, бұл модельді нақты уақыттағы жүйелерде және интерактивті диагностикалық қолданбаларда қолдануға мүмкіндік береді.

Оған қарама-қарсы, Faster R-CNN моделі зақымдану аймақтарын анықтауда жоғары дәлдік көрсетті. Оның mAP, Precision, Recall және F1-score көрсеткіштері YOLOv8-ден жоғары болып, күрделі медициналық кескіндерде ісіктерді анықтау және жіктеу бойынша оның сапасын растады.

Өңдеу жылдамдығы төмен болғанымен, Faster R-CNN екі сатылы өңдеу механизмі арқылы кескінді егжей-тегжейлі талдайды. Бұл мамография суреттеріндегі ісік өзгерістерін диагностикалау үшін аса маңызды.

Алынған нәтижелер екі модельдің де мамографияны автоматтандырылған диагностикалаудың тиімділігін растап, өңдеу жылдамдығы мен анықтау дәлдігі арасындағы тепе-теңдікті көрсетеді.

Қорытынды. Сүт безі қатерлі ісігін анықтауға арналған әзірленген ақпараттық жүйе медициналық суретті өңдеудің технологияларын және сүт безі қатерлі ісігін диагностикалау үшін терең оқыту әдістерін қолдануда айтарлықтай прогресті көрсетеді. Маммографиялық кескіндерді талдауға негізделіп құрылған жүйе BI-RADS санаттарына классификациялау және қалыптан тыс аймақтарды дәл локализациялау міндеттерін сәтті шешеді. Бұл диагноздың дәлдігі мен сенімділігін айтарлықтай арттырады, патологияларды ерте анықтауды жеңілдетеді. Толық емес немесе бүлінген деректерді өңдеуге байланысты кейбір қиындықтарға қарамастан, жүйе кескіндердің басым көпшілігін өңдеуде жоғары тиімділікті көрсетті. Бұл медициналық диагностиканы жақсарту және пациенттердің өмір сүруін жақсарту үшін осындай технологияларды әзірлеу мен қолданудың маңыздылығын көрсетеді. Талдау нәтижелерін визуализациялау және қолданушыға ыңғайлы қолданба интерфейсі де дәрігерлердің жұмысын жеңілдетуде шешуші рөл атқарады, нәтижелерді тез және дәл түсіндіруге мүмкіндік береді, бұл емдеуде уақтылы шешім қабылдауға ықпал етеді.

Әдебиеттер тізімі

1. Biomedical image segmentation method based on contour preparation / A. Orazayeva et al. // in Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments. – 2022. https://doi.org/10.1117/12.2657929.

2. Imaging fuzzy expert system for assessing dynamic changes in biomedical tumor images in breast cancer / A. Orazayeva et al // in Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments. – 2022. https://doi.org/10.1117/12.2657923.
3. Methods for detecting and selecting areas on texture biomedical images of breast cancer / A. Orazayeva et al // Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Srodowiska. – 2022. – Vol. 12(2). – P. 69-72. https://doi.org/10.35784/iapgos.2951.
4. Detection of lung pathology using the fractal method / G. Abdikerimova et al // International Journal of Electrical and Computer Engineering. – 2023. – Vol. 13(6). – P. 6778-6786. https://doi.org/10.11591/ijece.v13i6.pp6778-6786.
5. Detection of chest pathologies using autocorrelation functions / G. Abdikerimova et al // International Journal of Electrical and Computer Engineering. – 2023. – Vol. 13(4). – P. 4526-4534. https://doi.org/10.11591/ijece.v13i4.pp4526-4534.
6. Zhang Y. Deep Learning-Based Breast Cancer Detection in Mammography Images Using YOLOv8 / Y. Zhang, H. Liu, X. Chen // Diagnostics. – 2024. – Vol. 14(3). – P. 455-470. https://doi.org/10.3390/diagnostics14030455.
7. Kumar S. Breast Lesion Detection in Mammograms Using Faster R-CNN and Attention Mechanisms / S. Kumar, R. Patel, A. Singh // Computer Methods and Programs in Biomedicine. – 2023. – Vol. 231. – Article 107389. https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2023.107389.
8. Wang L. YOLOv8-Based Automated Breast Cancer Detection Framework for Medical Imaging / L. Wang, Q. Zhao, M. Li // Biomedical Signal Processing and Control. – 2025. – Vol. 92. – Article 106102. https://doi.org/10.1016/j.bspc.2024.106102.
9. Hernandez J. Artificial Intelligence Approaches for Early Breast Cancer Detection: A Comparative Deep Learning Study / J. Hernandez, D. Oliveira, P. Martins // Artificial Intelligence in Medicine. – 2024. – Vol. 150. – Article 102781. https://doi.org/10.1016/j.artmed.2024.102781.
10. Ahmed N. Comparative Analysis of YOLOv8 and Faster R-CNN for Breast Tumor Detection / N. Ahmed, T. Rahman, J. Lee // IEEE Access. – 2025. – Vol. 13. – P. 22541-22556. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3354128.
11. Silva M. Recent Advances in Deep Learning for Mammography Analysis / M. Silva, F. Costa, A. Ribeiro // Cancers. – 2023. – Vol. 15(18). – P. 4512-4530. https://doi.org/10.3390/cancers15184512.
12. Kim J. Explainable Deep Learning Models for Breast Cancer Detection in Medical Imaging / J. Kim, S. Park, Y. Choi // Healthcare. – 2024. – Vol. 12(7). – P. 1185-1201. https://doi.org/10.3390/healthcare12071185.
13. Al-Masni M. Hybrid CNN and Object Detection Models for Mammogram Classification / M. Al-Masni, D. Kim, S. Han // Sensors. – 2025. – Vol. 25(2). – P. 998-1016. https://doi.org/10.3390/s25020998.

А.Р. Оразаева[1], Н.С. Смакова[1]*, К.М.Максутова[2], А.А. Абильдина[1], А.Е. Туребаева[3]
[1]Казахский университет технологии и бизнеса университет имени К. Кулажанова,
010000, Республика Казахстан, г. Астана, ул. Мухамедханова, 37А
[2]Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева,
010000, Республика Казахстан, г. Астана, ул. Сатпаева, 2
[3]Карагандинский национальный исследовательский университет имени Е.А. Букетова
100022, Республика Казахстан, г. Караганда, ул. Университетская, 28
*e-mail: oar_is@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ РАННЕЙ ДИАГНОСТИКИ ЗАБОЛЕВАНИЙ МОЛОЧНОЙ ЖЕЛЕЗЫ (YOLOV8, FASTER R-CNN)

Данное исследование направлено на разработку и совершенствование методов эффективного выявления патологий молочной железы с использованием современных методов машинного обучения, в частности YOLOv8 и Faster R-CNN. Традиционные подходы к диагностике заболеваний молочной железы подвергнуты критическому анализу, и их эффективность оценивается по сравнению с современными автоматизированными методами. Предложенные модели применяются к маммографическим изображениям для выявления и классификации патологических образований по шести уровням с учетом степени тяжести и характеристик заболевания. Такая многоуровневая классификация позволяет более точно оценить

прогрессирование болезни и предоставляет важную информацию для персонализированного планирования лечения.

Экспериментальные результаты демонстрируют высокую точность и быструю обработку изображений, обеспечивая надежное и оперативное выявление потенциальных патологий молочной железы. Полученные данные свидетельствуют о том, что алгоритмы машинного обучения могут значительно улучшить процесс диагностики, предоставляя врачам более точную и своевременную информацию. Кроме того, исследование подчеркивает потенциал автоматизированных систем для ранней диагностики, оптимизации лечебных стратегий и улучшения исходов для пациентов. Результаты подтверждают возрастающую роль искусственного интеллекта в медицинской визуализации и его трансформирующее влияние на управление заболеваниями молочной железы.

Ключевые слова. *Глубокое обучение, Faster Region-based Convolutional Neural Network (R-CNN), You Only Look Once (YOLOv8), база данных, модель.*

A. Orazayeva[1], N. Smakova[1]*, K. Maksutova[2], A. Abildina[1], A. Turebayeva[3]
[1]Kazakh University of Technology and Business named after K. Kulazhanov,
010000, Kazakhstan, Astana, st. Mukhamedkhanova, 37A
[2]L.N. Gumilyov Eurasian National University,
010000, Kazakhstan, Astana, st. Satpaev, 2
[3]Karaganda National Research University named after academician Ye.A. Buketov,
100022, Kazakhstan, Karaganda, st. Universitetskaya, 28
*e-mail: oar_is@mail.ru

APPLICATION OF MODERN NEURAL NETWORKS IN EARLY DETECTION OF BREAST DISEASES (YOLOV8, FASTER R-CNN)

This study aims to explore and develop advanced methods for the effective detection of breast pathologies using state-of-the-art machine learning techniques, specifically YOLOv8 and Faster R-CNN. Traditional approaches to breast disease diagnosis are critically reviewed, and their effectiveness is evaluated in comparison to modern automated methods. The proposed models are applied to mammographic images to identify and categorize pathological patterns into six distinct levels, considering variations in severity and disease characteristics. This multi-level classification allows for a more precise assessment of disease progression and provides critical information for personalized treatment planning.

Experimental results demonstrate that the proposed approach achieves high accuracy and fast image processing, enabling reliable and rapid detection of potential breast abnormalities. These findings suggest that machine learning algorithms can significantly enhance the diagnostic process, providing clinicians with more accurate and timely information. Furthermore, the study highlights the potential of automated detection systems to improve early diagnosis, optimize treatment strategies, and ultimately enhance patient outcomes. The results emphasize the growing role of artificial intelligence in medical imaging and its transformative impact on the future of breast disease management.

Key words: *Deep learning, Faster Region-based Convolutional Neural Network (R-CNN), You Only Look Once (YOLOv8), database, model.*

Сведения об авторах

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.

Нургуль Сериковна Смакова* – PhD, ассистент-профессор, Казахский университет технологий и бизнеса им. К. Кулажанова; e-mail: nuri_5@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-5754-4001.

Кундыз Мухтаровна Максутова – PhD, Евразийский национальный университет имени Гумилева; e-mail: qunkabai@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3216-0397.

Айгуль Аманжоловна Абильдина – магистр, сеньор-лектор кафедры «Информационные технологии, Казахский университет технологий и бизнеса им. К. Кулажанова; e-mail: abildina12@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-6597-7910.

Айнура Ержановна Туребаева – преподаватель, Карагандинский национальный исследовательский университет имени академика Е.А. Букетова, Караганда, Казахстан; e-mail: tae15.06.89@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-0891-5426.

Авторлар туралы мәліметтер

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.

Нургуль Сериковна Смакова* – PhD, ассистент-профессор, Қ. Құлажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті; e-mail: nuri_5@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-5754-4001.

Кундыз Мухтаровна Максутова – PhD, Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана; e-mail: qunkabai@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3216-0397.

Айгуль Аманжоловна Абильдина – магистр, «Ақпараттық технологиялар» кафедрасының сеньор-лекторы, Қ. Құлажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті; e-mail: abildina12@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-6597-7910.

Айнура Ержановна Туребаева – оқытушы, Академик Е.А. Бөкетов атындағы Қарағанды ұлттық зерттеу университеті, Қарағанды, Казахстан; e-mail: tae15.06.89@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-0891-5426.

Information about the authors

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.

Nurgul Smakova* – K. Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan; e-mail: nuri_5@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-5754-4001.

Kundyz Maxutova – K L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; e-mail: qunkabai@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3216-0397.

Aigul Abildina – Master, Senior Lecturer, K. Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Department of Information Technology, Astana, Kazakhstan; e-mail: abildina12@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-6597-7910.

Ainura Tyrebayeva – teacher, Karaganda National Research University named after academician Ye.A. Buketov, Karaganda, Kazakhstan; e-mail: tae15.06.89@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-0891-5426.

Редакцияға енуі 30.03.2026
Өңдеуден кейін түсуі 16.05.2026
Жариялауға қабылданды 26.05.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-20

CC BY 4.0
Check for updates

ҒТАХР: 20.01.45, 14.85.35

Г.А. Шангытбаева[1], А.К. Шайханова[2*], Ж. Жұмағалиева[2], К.Е. Икласова[3], А.А. Абдукаримова[4]

[1]Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті,
Қазақстан Республикасы, Ақтөбе, Әлия Молдағұлова даңғылы, 34
[2]Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
010000, Қазақстан Республикасы, Астана қ., Сәтпаев к-сі, 2
[3]М.Қозыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университеті,
Қазақстан Республикасы, Петропавл, Пушкин көшесі, 86
[4]Қ. Құлажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті,
010000, Қазақстан Республикасы,Астана қ., Мұхамедханов к-сі, 37А
*e-mail: shaikhanova_ak@enu.kz

ИММЕРСИВТІ ТЕХНОЛОГИЯЛАР (VR/AR) НЕГІЗІНДЕ ҚАЗАҚСТАННЫҢ БІЛІМ БЕРУ ЖҮЙЕСІН ЦИФРЛЫҚ ТРАНСФОРМАЦИЯЛАУДЫҢ ТҰЖЫРЫМДАМАЛЫҚ ТӘСІЛДЕРІ

Аңдатпа: *Соңғы онжылдықтарда виртуалды шындық (VR) пен толықтырылған шындықты (AR) білім беру саласында қолдану айтарлықтай өсуде. Виртуалды шындық (VR) және толықтырылған шындық (AR) Қазақстандағы білім берудің цифрлық трансформациясының негізгі бағыттарының біріне айналуда. Олардың иммерсивті және интерактивті табиғаты оқытушылар мен студенттерге күрделі ұғымдар мен орталарды бірлесіп зерттеуге бірегей мүмкіндіктер береді. Жаңа технологиялар оқу үдерісінің сапасын арттыруға, заманауи білім беру ресурстарына*

©Г.А. Шангытбаева, А.К. Шайханова, Ж. Жұмағалиева, К.Е. Икласова, А.А. Абдукаримова, 2026

қолжетімділікті кеңейтуге және оқушылардың тез өзгеріп жатқан экономика жағдайында сұранысқа ие практикалық дағдыларын қалыптастыруға жаңа мүмкіндіктер ашады. VR-ды қолдану арқылы толық иммерсивті білім беру орталарын құруға болады, онда студенттер зертханалық тәжірибелер жүргізуден бастап күрделі техникалық үдерістерді меңгеруге дейінгі нақты жағдайларды қауіпсіз түрде модельдей алады. Мұндай оқыту сыни ойлауды дамытуға, мотивацияны арттыруға және қатысу әсерінің арқасында материалды жақсы меңгеруге ықпал етеді.

AR технологиялары, өз кезегінде, цифрлық ақпаратты қоршаған физикалық әлемге қабаттастыра отырып, оқыту үдерісін көрнекі әрі интерактивті етеді. Қазақстандағы мектеп және жоғары оқу орындарында AR-ды қолдану қазірдің өзінде жоғары тиімділігін көрсетуде: оқушылар анатомиялық құрылымдарды, геологиялық қабаттарды, тарихи артефактілерді және түсінуі күрделі басқа да нысандарды визуализациялай алады. Бұл абстрактілі ұғымдарды оңай түсінуге және жеке оқу қарқынын сақтауға мүмкіндік береді.

Соңғы жылдары Қазақстанда VR/AR технологияларын білім беру үдерісіне енгізуге бағытталған мемлекеттік және жеке бастамалар белсенді жүзеге асырылып келеді. Арнайы зертханалар, цифрлық кабинеттер, инженерлік, медициналық және гуманитарлық бағдарламалардағы пилоттық жобалар ашылуда. Бұл технологиялардың дамуы инновациялық білім беру экожүйесін қалыптастыруға, цифрлық сауаттылықты арттыруға және жастардың болашаққа қажетті құзыреттерін дамытуға ықпал етеді.

Осы мақсатқа жету үшін мақалада бастамаларға талдау жүргізіліп, цифрлық құралдардың пәндік білімді ғана емес, сонымен қатар трансверсалды құзыреттерді дамытуға қалай ықпал ететіні зерттелді. Таңдалған мысалдардың ішінде бұл мақала виртуалды және толықтырылған шындық технологияларының педагогикалық құндылығын, олардың артықшылықтары мен университеттік ортадағы практикалық қолданысын ерекше атап көрсетеді. Зерттеу нәтижелері иммерсивті технологиялардың оқу үдерісін тартымды, икемді және студентке бағдарланған етуге мүмкіндік беретінін дәлелдейді. Осылайша, VR және AR Қазақстанның білім беру жүйесін жаңғыртудың қуатты құралдарына айналуда. Олардың интеграциясы цифрлық экономика талаптарына және елдің стратегиялық даму бағыттарына сай келетін икемді, қолжетімді және тәжірибеге бағытталған оқу моделін қалыптастыруға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: *виртуалды шындық (VR), толықтырылған шындық (AR), білім беру, инновация, цифрландыру, иммерсия, педагогика, технология.*

Кіріспе

Соңғы кезде бүкіл әлемде виртуалды шындықты (VR) және толықтырылған шындықты (AR) білім беру контекстінде қолдануға деген ұмтылыс күшейіп келеді. Цифрлық трансформация дәуірінде әлемнің көптеген елдеріндегі білім беру жүйелері виртуалды шындық (VR) және толықтырылған шындық (AR) технологияларын белсенді енгізуде. Жаңа технологиялардың иммерсивті және интерактивті сипаты оқытушылар мен студенттерге қоршаған ортаны бірлесіп, белсенді түрде зерттеуге мүмкіндік беретін кең мүмкіндіктер спектрін қамтамасыз етеді. Біздің елімізде де бұл бағытта елеулі прогресс көрсетіп, оқу үдерісін жаңғыртуға, білім сапасын арттыруға және оқушылардың болашаққа қажетті дағдыларын қалыптастыруға ұмтылып келеді. Жаңа бағдарламалардың, жобалардың және ұлттық бастамалардың пайда болуы VR/AR технологияларының тәжірибелік құрал ретінде ғана емес, Қазақстанның жаппай білім беру жүйесіне кезең-кезеңімен интеграцияланып жатқанын көрсетеді [1].

Елде кеңістіктік жасанды интеллект орталығының ашылуы және білім беруге арналған AR/VR технологияларын енгізу сияқты ірі жобалар жүзеге асырылып жатыр. Бұл Қазақстанды Орталық Азиядағы инновациялық білім берудің жетекші алаңдарының біріне айналдырады.

VR және AR технологиялары қоғамның әртүрлі салаларында (ойын–сауық, ойын индустриясы, денсаулық сақтау, өндіріс, арнайы дайындық және т.б.) кеңінен қолданылып жатқанымен, олардың білім беру саласына әсері педагогтердің цифрлық сауаттылық деңгейіне әлі де тәуелді. Сондықтан бұл құралдарды тиімді пайдалану жолындағы кедергілерді жою үшін тұрақты және жүйелі кәсіби даму бағдарламаларын ілгерілету маңызды. Олар мұғалімдердің технологиялық құзыреттілігін арттыруға бағытталуы тиіс [2].

Бұл зерттеуде білім беруде қолданылатын орталарда Giza 3D, VirtualSpeech және MoleculARweb сияқты web-қосымшалар арқылы виртуалды және толықтырылған шындықты қолдану талдалынып алынды. Бұл қосымшалар білім беру қызметінің ауқымын айтарлықтай кеңейтеді және әртараптандырады. Маңыздысы – бұл құралдардың академиялық қауымдастыққа қолжетімді болуы. Олардың интерактивті әлеуеті парадигманы өзгертуді талап етеді, ал оқытушылардың рөлі екіжақты коммуникацияны, ынтымақтастықты,

тартылуды және студенттердің белсенді қатысуын қамтамасыз етуде шешуші мәнге ие. Мақалада виртуалды және толықтырылған шындық технологияларына қысқаша теориялық түсіндірме беріліп, Giza 3D, VirtualSpeech және MoleculARweb платформаларын қолдану мысалдары қарастырылады [3, 4].

Зерттеудің мақсаты, объектісі және пәні

Осы зерттеудің мақсаты – Қазақстанның білім беру жүйесін цифрлық трансформациялау жағдайында VR/AR технологияларын енгізудің тұжырымдамалық тәсілдерін талдау және олардың білім беру үдерісіне интеграциялану мүмкіндіктерін бағалау.

Зерттеу объектісі – Қазақстанның цифрлық трансформация жағдайындағы білім беру жүйесі.

Зерттеу пәні – білім беру ортасына VR/AR технологияларын интеграциялау үдерісі және олардың педагогикалық әлеуеті.

Ғылыми жаңалығы

Зерттеудің ғылыми жаңалығы Қазақстандағы VR/AR технологияларын енгізудің қазіргі жағдайын цифрлық білім беру экожүйесі тұрғысынан кешенді қарастыруда, сондай-ақ мемлекеттік бастамалар, білім беру платформалары және практикалық кейстер негізінде VR/AR технологияларын интеграциялаудың тұжырымдамалық моделін ұсынуда көрінеді.

Ұсынылған тәсіл VR/AR технологияларын жеке цифрлық құрал ретінде емес, цифрлық білім беру ортасының құрылымдық компоненті ретінде қарастыруға мүмкіндік береді.

Практикалық маңыздылығы

Зерттеу нәтижелері білім беру ұйымдарында VR/AR технологияларын енгізу стратегияларын әзірлеуде, цифрлық білім беру ресурстарын жобалауда және педагогтердің цифрлық құзыреттерін дамыту бағдарламаларын жетілдіруде пайдаланылуы мүмкін.

Зерттеу сұрақтары

Зерттеу барысында келесі сұрақтарға жауап ізделді:

– Қазақстанда VR/AR технологияларын білім беру жүйесіне енгізудің негізгі бағыттары қандай?

– Иммерсивті технологиялардың педагогикалық әлеуеті қандай?

– VR/AR технологияларын кеңінен енгізуге қандай факторлар әсер етеді?

– Қазақстандағы цифрлық білім беру экожүйесінде VR/AR қандай рөл атқарады?

Материалдар және зерттеу әдістері

Зерттеу жұмысы жүйелі әдеби шолу, контент-талдау және практикалық кейстерді салыстырмалы талдау әдістеріне негізделді. Талдау 2015-2025 жылдар аралығындағы ғылыми жарияланымдарды, мемлекеттік бағдарламаларды, халықаралық аналитикалық есептерді, цифрлық платформаларды және Қазақстандағы VR/AR технологияларын енгізуге қатысты материалдарды қамтыды [5, 6].

Деректерді іздеу Google Scholar, Scopus, Web of Science ғылыми деректер қорларында, сондай-ақ білім беру ұйымдары мен цифрлық платформалардың ресми материалдары негізінде жүргізілді.

Іздеу барысында келесі түйінді сөздер қолданылды:

– virtual reality in education;

– augmented reality in education;

– digital transformation;

– immersive learning;

– Kazakhstan education;

– EdTech.

Зерттеуге тек білім беру контекстінде VR/AR қолдануға арналған материалдар енгізілді.

Зерттеуде қолданылатын әдістер

Ғылыми жарияланымдарды талдау

VR/AR технологияларын білім беру жүйесінде қолдануға арналған отандық және халықаралық ғылыми зерттеулер қарастырылды. Талдау жүргізу барысында қазақстандық ғалымдардың қазақ әдебиеті мен гуманитарлық пәндерге AR/VR енгізу жөніндегі еңбектері, сондай-ақ виртуалды зертханалар, иммерсивті сабақ үлгілері, пәндік визуализацияны жақсарту тәсілдері бойынша зерттеулер пайдаланылды. Бұл әдіс VR/AR технологияларының

білім сапасына, пәнді терең меңгеруге және оқушылардың цифрлық құзыреттерін арттыруға әсерін кешенді түрде бағалауға мүмкіндік береді.

Қазақстандағы EdTech саласындағы ұлттық және халықаралық бастамаларға шолу

Қазақстанның VR/AR білім беру нарығы бойынша 2024-2031 жылдарға арналған даму болжамдары, цифрлық трансформация жөніндегі ұлттық шолулар, мемлекеттік стратегиялық құжаттар және EdTech экожүйесі туралы талдамалық материалдар зерттелді.

Шолу барысында «Цифрлық Қазақстан» бағдарламасының нәтижелері, білім беруді цифрландыру бойынша ұлттық жобалар, EdTech саласындағы әлемдік трендтер сияқты деректер ескерілді. Бұл бағыт Қазақстанда AR/VR технологияларын жүйелі енгізудің институционалдық жағдайларын анықтауға көмектеседі [7].

Практикалық кейстер мен жобаларды талдау

Қазақстан мектептері мен жоғары оқу орындарында AR платформаларын қолдану мысалдары, Next AR Tech компаниясының жобалары, виртуалды зертханалар, 3D модельдеу құралдарын пайдалану тәжірибелері қарастырылды.

Сонымен қатар STEM бағытындағы AR сабақтары, виртуалды экскурсиялар, қауіпсіздік техникасы бойынша VR тренажёрлары, медицина және инженерия салаларындағы иммерсивті симуляциялар сияқты практикалық кейстер талдауға енгізілді. Аталмыш әдіс VR/AR технологияларының нақты оқу жағдайларында қалай жұмыс істейтінін бағалауға мүмкіндік береді [8].

Білім беру бастамаларының контент-талдауы

Bilim Land, Kundelik, Ashyq sabak, STEM/Robotics орталықтарының цифрлық ресурстары сияқты ұлттық платформаларға контент–талдау жүргізілді.

Контент-талдау аясында AR/VR интеграцияланған оқу модульдері, 3D визуализация материалдары, цифрлық оқу ресурстарының қолжетімділігі, қазақ тіліндегі цифрлық контенттің көлемі мен сапасы қарастырылды. Бұл әдіс цифрлық білім беру платформаларының AR/VR технологияларымен үйлесімділігін анықтауға мүмкіндік береді.

Қазақстанның білім беру жүйесіндегі VR/AR интеграциясының тұжырымдамалық моделі

Қазақстандағы VR/AR технологияларын енгізу үш өзара байланысты деңгей арқылы қарастырылды:

1) технологиялық деңгей:
– VR/AR платформалар;
– цифрлық инфрақұрылым;
– білім беру контенті.
2) педагогикалық деңгей:
– интерактивті оқыту;
– визуализация;
– тәжірибеге бағытталған оқыту.
3) нәтижелік деңгей:
– цифрлық құзыреттер;
– практикалық дағдылар;
– студенттердің оқу белсенділігі.

Ұсынылған модель VR/AR технологияларын цифрлық трансформацияның дербес элементі емес, білім беру экожүйесінің құрамдас бөлігі ретінде қарастыруға мүмкіндік береді.

Зерттеу нәтижелері

Талдау кезеңі 2015 жылдан 2025 жылға дейінгі басылымдарды қамтыды, ал жоғары білім беру саласында цифрлық технологияларды қолдануға бағытталмаған мақалалар зерттеуге енгізілмеді. Таңдалған зерттеулердің ішінде виртуалды шындық (VR) пен толықтырылған шындықты (AR) қолданған жұмыстарға ерекше назар аударылды [9, 10].

Виртуалды шындық (VR)

Velev және Zlateva анықтамасына сәйкес, виртуалды шындық – бұл иммерсивті мультимедиа немесе компьютерлік модельденген шындық, ол нақты немесе қиялданған әлемдегі физикалық болмысты имитациялай отырып, пайдаланушыға сол әлеммен өзара әрекеттесуге мүмкіндік беретін орта.

«VR» терминін 1980-жылдары Ланье енгізген. Уақыт өте келе бұл ұғым әртүрлі мағына мен қолдану салаларын иеленгенімен, иммерсия мен интеракция идеялары арнайы әдебиеттерде ортақ түсінік болып табылады.

Академиялық контексте виртуалды шындық орталарын интеграциялау студенттерді техникалық дағдыларды, шығармашылық ойлауды және мәселелерді шешу қабілеттерін дамыта отырып, күрделі мазмұнды зерттеуге және ашуға ынталандырады. Сондай-ақ, бұл технологиялармен тығыз байланысты тәжірибелік оқыту өлшемін ерекше атап өткен жөн. VR пайдалану академиялық қауымдастыққа аудиториядан шықпай-ақ практикалық білімге тікелей қол жеткізу мүмкіндігін ұсынады. Осыған байланысты Velev және Zlateva VR-ды білім беруге енгізу нақты өмірде қайталау мүмкін емес, бірақ виртуалды ортада жүзеге асыруға болатын оқу әрекеттерін ұсынуға мүмкіндік беретінін атап өтеді.

Қолданылу аясы тұрғысынан VR технологиясы Архитектура, Азаматтық құрылыс, Химия, Медицина, Биология, Физика, Астрономия, Медиа, Спорт, Мода, Ойын-сауық және Телекоммуникациялар сияқты көптеген салаларды қамтиды. Кәсіби даярлыққа немесе ықтимал тәуекелдер мен қауіптерді азайтуға бағытталған шынайы оқыту сценарийлерін ұсыну да VR-ды білім беруде қолданудың маңызды артықшылықтарының бірі болып табылады.

Толықтырылған шындық (AR)

Wellner және т.б. анықтамасы бойынша, толықтырылған шындық (AR) – нақты әлемге компьютер арқылы жасалған ақпаратты қабаттастыру арқылы оны толықтыратын жүйе (30–бет). Azuma және т.б. бұл түсінікті толықтыра отырып, AR жүйелерінің негізгі мақсаты – нақты әлемді 3D виртуалды объектілермен толықтыру арқылы пайдаланушының шынайы ортада қабылдауын және өзара әрекеттесуін күшейту болуы тиіс екенін айтады.

Цифрлық эволюция және технологиялық құрылғылардың кең таралуы AR технологиясының білім беру саласында белсенді дамуына ықпал етті. Виртуалды шындық (VR) секілді, AR технологиясын қолданатын білім беру іс-әрекеттеріне қызығушылық пен зерттеулер саны айтарлықтай артты, әсіресе химия, биология, математика, физика және астрономия салаларында өзгерістер байқалды.

AR-ды оқыту мен оқу үдерісіне интеграциялаудың әсері туралы әдебиеттер студенттердің оқуға тартылуының жоғарылауы және оқу бағдарламасына негізделген білім нәтижелерінің жақсаруы сияқты оң өзгерістерді көрсетеді. Сонымен қатар, AR мотивацияны, интеракцияны және оқу қанағаттанушылығын арттырады, объектілерді үш өлшемді форматта зерттеуге және визуализациялауға мүмкіндік береді, сондай-ақ шығармашылық ойлауды, мәселелерді шешу дағдыларын, коммуникацияны және топтық жұмысты дамытатын гибридті оқыту орталарында цифрлық және физикалық объектілерді біріктіруге жағдай жасайды.

Қазақстандағы VR/AR технологияларының дамуы және білім беру жүйесіне интеграциясы

VR/AR технологияларын білім беру жүйесінде қолданудың артуы

Қазақстан әлемдік трендтерге сәйкес AR/VR технологияларын белсенді енгізіп келеді. Кеңістіктік жасанды интеллект орталығының ашылуы білім беру саласына арналған ауқымды AR/VR курстарын әзірлеуге жол ашты. Қазіргі уақытта республика бойынша мектептер мен университеттерге арналған 10 000-нан астам оқу модульдері дайындалуда (1 – кесте).

Кесте 1 – Қазақстандағы VR/AR технологияларының даму бағыттары

№	Даму бағыты	Сипаттамасы
1	VR/AR қолданудың өсуі	10 000+ AR/VR оқу модульдерінің жасалуы, мектептер мен ЖОО-ларға енгізілуі
2	AR платформалардың дамуы	Next AR Tech виртуалды зертханалар, 3D модельдер, AR сабақтар ұсынады
3	Гуманитарлық білімге енгізілуі	Қазақ әдебиеті, тарих, мәдениет сабақтарында интерактивті орта құру
4	Мемлекеттік қолдау	Bilim Land, OER, электрондық оқулықтар, цифрлық инфрақұрылым

Бұл бастама оқу процесін иммерсивті, көрнекі және тәжірибеге бағытталған форматқа көшіруге мүмкіндік береді. Сонымен қатар, халықаралық серіктестік экожүйенің дамуына

ықпал етіп, қазақстандық білім беру мекемелерінің жаһандық EdTech платформаларымен интеграциясын күшейтуде.

AR платформалардың және білім беру шешімдерінің дамуы

Next AR Tech сияқты қазақстандық компаниялар білім беру саласына арналған AR платформаларды жасап шығаруда. Бұл платформалар виртуалды зертханалық тәжірибелер жүргізуге, күрделі 3D модельдерді визуализациялауға, оқу материалдарына AR объектілерін енгізуге, пәндерді практикалық тұрғыда меңгеруді күшейтуге мүмкіндік береді.

Зерттеулерге сәйкес, AR технологиясын қолдану оқушылардың мотивациясын арттырып, күрделі тақырыптарды түсінуді 60%-ға жақсартады (2 – кесте).

Кесте 2 – VR және AR технологияларын қолданудың оқу үдерісіне әсері

Көрсеткіш	VR әсері	AR әсері
Иммерсивтілік	Өте жоғары	Орташа
Визуализация	3D толық орта	Нақты әлемге 3D объектілер қосылады
Мотивация	жоғары	өте жоғары
STEM пәндерінде тиімділік	өте жоғары	жоғары
Гуманитарлық пәндер	тарихи/мәдени реконструкция	мәтіндік/контексттік кеңейту
Тәжірибелік оқыту	виртуалды тренажёрлар	объектілерді аралас көрсету

Мұндай шешімдер STEM пәндерінде, биология, химия, физика сабақтарында және кәсіптік бағдар беру үдерісінде өте тиімді болып келеді.

VR/AR технологияларын гуманитарлық білімге интеграциялау

Соңғы жылдары VR/AR технологияларын гуманитарлық пәндерге енгізу бойынша да қызығушылық айтарлықтай артты. Мұғалімдер мен зерттеушілердің пікірінше, VR/AR келесі мүмкіндіктерді ашады:

– әдеби шығармалардың оқиғаларын иммерсивті форматта көрсету;

– тарихи контексттерді жандандыру;

– мәдени мұра нысандарын виртуалды зерттеу;

– қазақ әдебиеті пәнін оқытуды заманауи визуалды әдістермен байыту.

Ғылыми жұмыстар VR/AR қолдану қазақ әдебиетін меңгеруді жеңілдететінін, оқушылардың эмоционалды, когнитивтік және шығармашылық қатысуын арттыратынын көрсетеді. Бұл гуманитарлық саланың өзінде иммерсивті технологиялардың жоғары әлеуетін дәлелдейді.

Білім беруді цифрландыруға бағытталған мемлекеттік қолдау

Мемлекет білім беру саласының цифрлық трансформациясын стратегиялық деңгейде қолдап келеді. Осы тұрғыда келесі бастамалар маңызды рөл атқарады:

– Bilim Land, Kundelik, электрондық оқулықтар сияқты ұлттық цифрлық платформалар;

– Ашық білім беру ресурстары (OER) бағдарламалары;

– мектептерді цифрлық инфрақұрылыммен қамтамасыз ету;

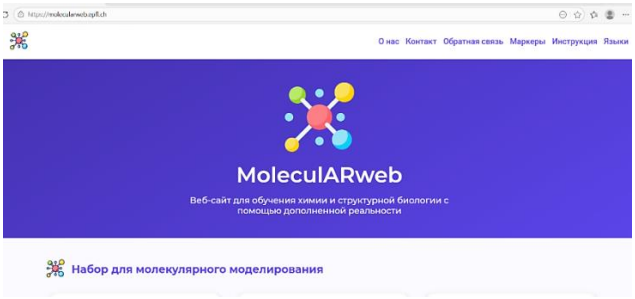
– цифрлық педагогтердің кәсіби даму бағдарламалары.

Мемлекеттік қолдау VR/AR технологияларын кең көлемде енгізуге қолайлы экожүйе қалыптастырып, мектептер мен ЖОО-ларда инновациялық білім беру тәжірибелерін кеңейтуге мүмкіндік береді.

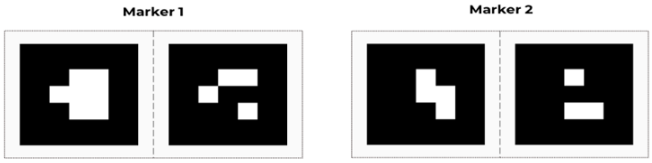
MoleculARweb

Сондай қосымшалардың бірі кеңінен қолданысқа енген MoleculARweb – химия мен биологияны AR арқылы оқытуға арналған, сегіз тілде қолжетімді web-платформа. Бұл сайт педагогтер мен студенттерге молекулалардың 3D модельдерін нақты заттар сияқты зерттеуге, визуализациялауға және манипуляциялауға мүмкіндік береді. Мұндай формат жай компьютерлік графикадан немесе пластикалық молекулалық модельдерден бірнеше есе тиімдірек әсер етеді) (1 сурет).

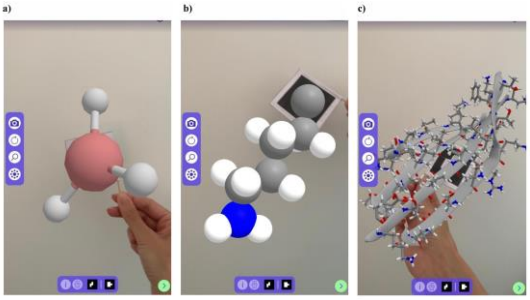
Пайдаланушылар смартфонның, планшеттің немесе компьютер камерасын арнайы маркерге (2 сурет) бағыттау арқылы молекулаларды үшөлшемді объектілер ретінде көре алады (3 сурет). Бұл оқу материалының қолжетімділігін арттырып, молекулалық құрылымдарды түсінуді айтарлықтай жеңілдетеді.



Сурет 1 – MoleculARweb web-платформасы



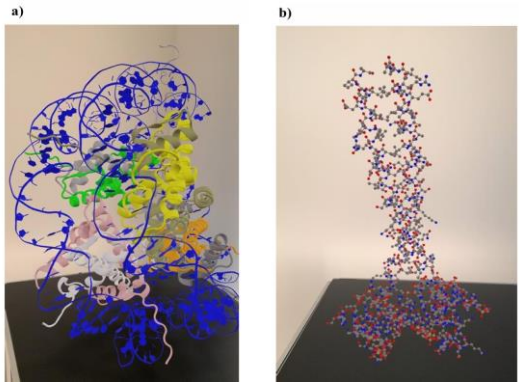
Сурет 2 – Басып шығаруға арналған маркерлер



a) VSEPR теориясы бойынша молекулалардың пішіндері – смартфон экранында маркердің үстіне орналастырылған 3D модель түрінде көрсетілген;
b) Қышқылдық және негіздік аминқышқылдарының бүйір тізбектерінің тепе-теңдігі – маркер арқылы визуализацияланған молекулалық өзара әрекеттесу үлгісі;
c) Ақуыздың екінші реттік құрылымдары және оларды тұрақтандыратын өзара байланыстар – смартфон экранындағы маркер негізінде көрсетілген үшөлшемді модельдер

Сурет 3 – Смартфон экранындағы маркер арқылы көрсетілетін молекулалық үлгілер

Web-сайт сондай-ақ маркерсіз модельдерді визуализациялау мүмкіндігін (4 сурет) ұсынады. Бұл жағдайда бағдарлама 3D модельдерді жазық бетке орналастырып, пайдаланушыларға оларды айналып өтуге, әртүрлі бұрыштардан қарауға және кеңістікте еркін зерттеуге мүмкіндік береді.



a) Нуклеосоманың рентгендік кристалл құрылымы – құрамына төрт гистон ақуызы және оралған қос тізбекті ДНҚ-ның екі айналымы кіреді. Бұл модель хроматиннің құрылымдық ұйымдасуын кеңістікте нақты түрде көруге мүмкіндік береді;
b) B-zip транскрипция факторындағы ақуыз-ақуыз және ақуыз-ДНҚ өзара әрекеттесулері – транскрипциялық реттеу механизмдерін түсіндіретін молекулалық байланыстардың үшөлшемді визуализациясы

Сурет 4 – Маркерсіз визуализацияланған биомолекулалық құрылымдар

Бұл қосымшаның басты артықшылығы – қымбат арнайы жабдықты талап етпеуі. Оны кез келген қолжетімді құрылғыларда (смартфон, планшет, ноутбук) еркін пайдалануға болады, бұл технологияны кең ауқымды білім алушылар үшін қолжетімді етеді.

MoleculARweb web-платформасы әлемнің көптеген елдерінде кеңінен қолданылып келеді, оның ішінде ең жоғары пайдалану көрсеткіші Еуропа мен АҚШ-та байқалады. Онлайн бағалау сауалнамаларына қатысқан мұғалімдердің басым бөлігі бұл қосымшаның күрделі ұғымдарды түсінуді жақсартатынын, ынтымақтастықты дамытуға ықпал ететінін және оқушылар арасындағы диалогты жеңілдететінін атап өткен. Құралды онлайн оқыту форматында, дәстүрлі офлайн сынып жағдайында, студенттердің өз бетінше білім алуы үшін тиімді пайдалануға болады.

Ғылыми нәтижелерді талқылау

Қазақстандағы білім беру жүйесіне VR/AR технологияларын енгізу соңғы жылдары айтарлықтай жеделдеп, жаңа зерттеулер мен пилоттық жобалар арқылы өз тиімділігін дәлелдеп келеді. Алынған деректер мен талдау нәтижелері білім беру процесіндегі VR/AR технологияларының мүмкіндіктерін, артықшылықтары мен шектеулерін кешенді түрде сипаттайды.

Оқытудың интерактивтілігі мен иммерсивтілігінің артуы

VR/AR технологияларын қолдану оқу үдерісін дәстүрлі модельден анағұрлым белсенді және интерактивті етеді. Студенттер оқу материалына толықтай еніп, күрделі ұғымдарды нақты әрі көрнекі түрде зерттей алады.

Зерттеулер көрсеткендей, иммерсивті орта:

- ақпаратты қабылдау жылдамдығын арттырады;
- оқушылардың есте сақтау деңгейін күшейтеді;
- тәжірибелік дағдыларды қалыптастыруға көмектеседі.

VR ортасында жүргізілетін симуляциялар оқушыларға қателесу мүмкіндігін қауіпсіз түрде береді, ал AR нақты әлеммен интеграцияланған визуалды объектілер арқылы жаңа тәжірибе ұсынады.

Жекелендірілген оқыту траекторияларын қалыптастыру

AR/VR технологиялары білім беру мазмұнын адамның жеке мүмкіндіктеріне қарай бейімдеуге мүмкіндік береді. Бұл әсіресе инклюзивті білімде, тіл үйренуде, STEM салаларында маңызды рөл атқарады.

VR платформаларда студент деңгейіне сәйкес тапсырмалар беріледі, ал AR арқылы күрделі ақпарат шағын бөліктерге бөлініп, нақты уақытта түсіндіріледі. Бұл тәсіл оқушылардың оқу стилін ескере отырып, жеке оқу траекториясын тиімді құруға мүмкіндік береді.

Болашақ мамандықтарға қажетті дағдыларды қалыптастыру

Технологиялардың қарқынды дамуы экономикаға жаңа талаптар қояды.

VR/AR қолдану келесі бағыттардағы құзыреттерді қалыптастырады:

- ақпараттық технологиялар;
- инженерия және 3D модельдеу;
- робототехника;
- цифрлық дизайн;
- өндірістік симуляциялар.

Қазақстанда бұл бағытта робот техника орталықтары, STEM зертханалары және университеттік технопарктер AR/VR-ға негізделген оқыту моделін кеңейтіп жатыр.

Инфрақұрылымдық және ұйымдастырушылық шектеулер

VR/AR енгізудегі негізгі қиындықтар ретінде:

- жабдықтардың жоғары құны;
- мектептердегі интернет пен техникалық инфрақұрылымның жеткіліксіздігі;
- педагогтердің цифрлық құзыреттерінің әркелкі деңгейі;
- әдістемелік материалдардың аздығы аталады.

EdTech нарығы бойынша аналитикалық есептер бұл факторларды басты тежеуші себептер ретінде көрсетеді. Сонымен қатар, VR жабдықтарын жиі жаңарту қажеттілігі мен контенттің қолжетімділігі де қосымша қиындық тудырады.

Қазақстанда AR/VR бағытындағы зерттеулер мен инновациялар

Қазақстанда VR/AR дамуы тек тұтынушылық деңгейде ғана емес, ғылыми бағытта да артып келеді.

ISSAI (Intelligent Systems and Artificial Intelligence Institute) секілді зерттеу институттары:

- білім беру мақсатындағы AR жүйелерін;
- мобильді AR платформаларды;
- мәдени мұраны визуализациялау жобаларын әзірлеп жатыр.

Бұл ғылыми бастамалар AR/VR технологияларын ұлттық контентке бейімдеуге және қазақ тіліндегі сандық ресурстарды көбейтуге септігін тигізеді.

Қорытынды

VR және AR Қазақстан білім беруін трансформациялаудың ең маңызды инновациялық технологияларына айналуда. Ел толыққанды AR/VR экожүйесін қалыптастыру бағыты бойынша дамып келеді, оған инфрақұрылым, цифрлық платформалар, зерттеу орталықтары және тәжірибе-бағдарланған білім беру шешімдері кіреді.

Виртуалды шындық (VR) пен толықтырылған шындық (AR) оқыту мен оқытуды әртараптандырудың түрлендіргіш әлеуетіне ие. Бұл технологиялардың тым қымбат немесе пайдалану тұрғысынан күрделі екені туралы пікірлер қазіргі таңда өзектілігін жоғалтуда, өйткені VR мен AR-дың қолжетімді болуына бағытталған айқын үрдіс байқалады.

Осы жұмыстың мақсаты – екі VR қосымшасын және бір AR қосымшасын таныстырып, олардың жұмыс принциптерін түсіндіру және жоғары білім беру контекстіндегі қолдану мүмкіндіктерін көрсету болды. Бұл қосымшалар қамтамасыз ететін интерактивтілік пен иммерсивтілік академиялық қауымдастыққа қазіргі цифрлық дәуір талаптарына неғұрлым сәйкес келетін педагогикалық тәжірибелерді енгізуге мүмкіндік береді.

VR және AR технологияларын одан әрі дамыту келесі шаралар кешенімен қолдауды талап етеді:

- цифрлық бағыттағы педагогтерді даярлау;
- VR/AR жабдықтарына қолжетімділікті кеңейту;
- қазақ тіліндегі ұлттық контентті дамыту;
- VR/AR-ды мектептер мен жоғары оқу орындарының білім беру бағдарламаларына интеграциялау.

Қазақстанда VR және AR технологияларын енгізу перспективалары өте жоғары, және алдағы бірнеше жыл жаңа цифрлық білім беру ортасын қалыптастыруда шешуші кезең болмақ.

Әдебиеттер тізімі

1. EON Reality. EON Reality Expands Its Rollout in Kazakhstan Targeting National Rollout with 10,000 Tailored Courses with the Launch of Spatial AI Center and EON AI Autonomous Agents. Irvine, CA, 2024. URL: https://eonreality.com/eon-reality-expands-its-rollout-in-kazakhstan-targeting-national-rollout-with-10000-tailored-courses-with-the-launch-of-spatial-ai-center-and-eon-ai-autonomous-agents/
2. Wresearch. Kazakhstan Augmented and Virtual Reality in Education Market (2025-2031). Industry Report ETC4426379. New Delhi, 2025. URL: https://www.6wresearch.com/industry–report/kazakhstan–augmented–and–virtual–reality–in–education–market
3. ISSAI – Institute of Smart Systems and Artificial Intelligence. ISSAI’s Senior Data Scientist Zhanat Makhataeva Speaks at the XIV NIS International Conference “School Education in the Digital Age: Key Trends and Challenges”. 2025. URL: https://issai.nu.edu.kz/2025/10/30/issais–senior–data–scientist–zhanat–makhataeva–speaks–at–the–xiv–nis–international–conference–school–education–in–the–digital–age–key–trends–and–challenges/
4. Next AR Tech. AR Education and Learning Platform in Kazakhstan. Project Overview. Krazio Cloud, 2025. URL: https://nextartech.com/project.php?slug=ar–education–and–learning–platform–augmented–reality–kazakhstan
5. Kaskyrbaeva M., Uldana A. Digital Education: New Opportunities in Kazakhstan. Bilimger.kz, 2024. URL: https://bilimger.kz/172785/
6. Nurullayeva J. Teaching Kazakh Literature Using AR (Augmented Reality) and VR (Virtual Reality) Technologies in the Educational Process. Eurasian Journal of Social Sciences, Philosophy and Culture, 2025. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/teaching–kazakh–literature–using–ar–augmented–reality–and–vr–virtual–reality–technologies–in–the–educational–process

7. Tang K.-S. Developing AI Literacy Through Dialogic Inquiry and Critical Questioning. Curtin University School of Education, Australia, 2025.
8. Baker R. Technologies and Educational Resources of the Future: The Potential of Learning Analytics. University of Adelaide, Australia, 2025.
9. Ishengoma F., Ngeze L., Ndibalema P. Augmented Reality Applications in STEM Education: A Review. 2024.
10. Latif Maftunzada S. A. The Transformative Potential of Emerging Technologies in Physics Education. 2024.

Қаржыландыру туралы ақпарат

Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырды / қаржыландырады (грант № AP 23489228).

Г.А. Шангытбаева[1], А.К. Шайханова[2]*, Ж. Жұмағалиева[2], К.Е. Икласова[3], А.А. Абдукаримова[4]
[1]Актюбинский региональный университет имени К.Жубанова,
Республика Казахстан, Актобе, проспект Алии Молдагуловой, 34
[2]Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева,
010000, Республика Казахстан, г. Астана, ул. Сатпаева, 2
[3]Северо-Казахстанский университет им.М.Козыбаева,
Республика Казахстан, Петропавловск, улица Пушкина, 86
[4]Казахский университет технологий и бизнеса им. К. Кулажанова,
010000, Республика Казахстан, г. Астана, ул. Мухамедханова, 37А
*e-mail: shaikhanova_ak@enu.kz

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ПОДХОДЫ К ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ СИСТЕМЫ ОБРАЗОВАНИЯ КАЗАХСТАНА НА БАЗЕ ИММЕРСИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ (VR/ AR)

В последние десятилетия использование виртуальной реальности (VR) и дополненной реальности (AR) в сфере образования значительно растёт. Виртуальная реальность (VR) и дополненная реальность (AR) становятся одним из ключевых направлений цифровой трансформации образования в Казахстане. Их иммерсивная и интерактивная природа предоставляет преподавателям и студентам уникальные возможности для совместного изучения сложных понятий и сред. Новые технологии открывают возможности для повышения качества учебного процесса, расширения доступа к современным образовательным ресурсам и формирования у обучающихся практических навыков, востребованных в условиях быстро меняющейся экономики.

Использование VR позволяет создавать полностью иммерсивные образовательные среды, где студенты могут безопасно моделировать реальные ситуации – от проведения лабораторных экспериментов до освоения сложных технических процессов. Такой формат обучения способствует развитию критического мышления, повышению мотивации и лучшему усвоению материала благодаря эффекту присутствия.

AR-технологии, в свою очередь, делают процесс обучения более наглядным и интерактивным, накладывая цифровую информацию на окружающий физический мир. Применение AR уже демонстрирует высокую эффективность в школах и университетах Казахстана: учащиеся могут визуализировать анатомические структуры, геологические слои, исторические артефакты и другие сложные для понимания объекты. Это облегчает восприятие абстрактных понятий и позволяет сохранять индивидуальный темп обучения.

В последние годы в Казахстане активно реализуются государственные и частные инициативы, направленные на внедрение VR/AR-технологий в образовательный процесс. Создаются специализированные лаборатории, цифровые кабинеты, запускаются пилотные проекты в инженерных, медицинских и гуманитарных программах. Развитие этих технологий способствует формированию инновационной образовательной экосистемы, повышению цифровой грамотности и развитию у молодёжи компетенций, необходимых в будущем.

Для достижения этой цели в статье проводится анализ существующих инициатив и исследуется, как цифровые инструменты способствуют развитию не только предметных знаний, но и трансверсальных компетенций. На основе выбранных примеров статья подчёркивает педагогическую ценность технологий виртуальной и дополненной реальности, их преимущества и практическое применение в университетской среде.

Результаты исследования доказывают, что иммерсивные технологии делают процесс обучения более привлекательным, гибким и ориентированным на студента. Таким образом, VR и AR становятся мощными инструментами модернизации системы образования Казахстана. Их интеграция позволяет сформировать гибкую, доступную и практикоориентированную модель обучения, соответствующую требованиям цифровой экономики и стратегическим направлениям развития страны.

Түйін сөздер: *виртуальная реальность (VR), дополненная реальность (AR), образование, инновации, цифровизация, иммерсия, педагогика, технологии.*

G. Shangytbayeva[1], A. Shaikhanova[2]*, Zh. Zhumagaliyeva[1], K. Iklassova[3], A. Abdukarimova[4]
[1]Zhubanov University,
Republic of Kazakhstan, Aktobe, Aliya Moldagulova Avenue, 34
[2]Gumilyov Eurasian National University,
010000, Republic of Kazakhstan, Astana, Satpayev Street, 2
[3]Manash Kozybayev North Kazakhstan University,
Republic of Kazakhstan, Petropavlovsk, Pushkin Street, 86
[4]K. Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business,
010000, Republic of Kazakhstan, Astana, 37A Mukhamedkhanova Street
*e-mail: shaikhanova_ak@enu.kz

CONCEPTUAL APPROACHES TO THE DIGITAL TRANSFORMATION OF KAZAKHSTAN'S EDUCATION SYSTEM BASED ON IMMERSIVE TECHNOLOGIES (VR/AR)

In recent decades, the use of virtual reality (VR) and augmented reality (AR) in the field of education has been growing significantly. Virtual reality (VR) and augmented reality (AR) are becoming one of the key directions in the digital transformation of education in Kazakhstan. Their immersive and interactive nature offers teachers and students unique opportunities to collaboratively explore complex concepts and environments. These technologies open new possibilities for improving the quality of the learning process, expanding access to modern educational resources, and developing practical skills that are in demand in a rapidly changing economy.

Using VR, it is possible to create fully immersive learning environments in which students can safely simulate real-life scenarios-from conducting laboratory experiments to mastering complex technical processes. Such learning helps develop critical thinking, increases motivation, and enhances understanding of the material due to the strong sense of presence.

AR technologies, in turn, make the learning process more visual and interactive by overlaying digital information onto the surrounding physical world. In schools and universities across Kazakhstan, the use of AR is already showing high effectiveness: students can visualize anatomical structures, geological layers, historical artifacts, and other objects that are difficult to understand. This makes abstract concepts easier to comprehend and allows students to maintain their individual learning pace.

In recent years, Kazakhstan has been actively implementing state and private initiatives aimed at integrating VR/AR technologies into the educational process. Specialized laboratories, digital classrooms, and pilot projects in engineering, medical, and humanities programs are being launched. The development of these technologies helps build an innovative educational ecosystem, enhance digital literacy, and develop the competencies required for the future among young people.

To achieve this goal, the article analyzes these initiatives and explores how digital tools contribute not only to subject-specific knowledge but also to the development of transversal competencies. Among the selected examples, this article highlights the pedagogical value of virtual and augmented reality technologies, their advantages, and their practical application in the university environment. The findings demonstrate that immersive technologies make the learning process engaging, flexible, and student–centered. Thus, VR and AR are becoming powerful tools for modernizing Kazakhstan's education system. Their integration helps create a flexible, accessible, and practice-oriented learning model that aligns with the requirements of the digital economy and the country's strategic development priorities.

Key words: *Virtual Reality (VR), Augmented Reality (AR), education, innovation, digitalization, immersion, pedagogy, technology.*

Авторлар туралы мәліметтер

Гульмира Асаугаликызы Шангытбаева – PhD, қауымдастырылған профессор, Информатика және ақпараттық технологиялар кафедрасының доценті, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе қ., Қазақстан; e-mail: gulmjanet@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4615-5756.

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

Жанар Жұмағалиева – техника ғылымдарының магистрі, Информатика және ақпараттық технологиялар кафедрасының оқытушысы, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе қ., Қазақстан; e-mail: zanar82@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-6843-0282.

Қайнижамал Есімсейітқызы Икласова – PhD, «Ақпараттық-коммуникациялық технологиялар» кафедрасының доценті, М. Қозыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университеті; Петропавл қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: keiklasova@ku.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8330-4282.

Әлия Әмірқызы Абдукаримова – PhD, қауымдастырылған профессор, «Ақпараттық технологиялар» кафедрасының меңгерушісі, Қ. Құлажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті, Астана қ., Қазақстан Республикасы.

Сведения об авторах

Гульмира Асаугаликызы Шангытбаева – PhD, ассоциированный профессор, доцент кафедры Информатики и информационных технологии, Актюбинский региональный университет имени К.Жубанова, Актобе, Казахстан; e-mail: gulmjanet@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4615-5756.

Айгуль Кайрулаевна Шайханова* – PhD, ассоциированный профессор, профессор кафедры информационной безопасности, Евразийский национальный университет имени Л.Н.Гумилева, Астана, Казахстан; e-mail: shaikhanova_ak@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6006-4813.

Жанар Жұмағалиева – магистр технических наук, Актюбинский региональный университет имини К.Жубанова, Казахстан; e-mail: zanar82@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-6843-0282.

Кайнижамал Есимсеитовна Икласова – PhD, доцент кафедры «Информационно-коммуникационные технологии», Северо-Казахстанский университет имени М. Козыбаева, г. Петропавловск, Республика Казахстан; e-mail: keiklasova@ku.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8330-4282.

Алия Амировна Абдукаримова – PhD, ассоциированный профессор, заведующий кафедрой «Информационные технологии», Казахский университет технологий и бизнеса им. К. Кулажанова, г. Астана, Республика Казахстан; e-mail: a.abdukarimova777@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6932-6282.

Information about the authors

Gulmira Shangytbayeva – PhD, Associate Professor of the Department of Informatics and Information Technologies, Zhubanov University, Aktobe, Republic of Kazakhstan; e-mail: gulmjanet@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4615-5756.

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

Zhanar Zhumagaliyeva – Master of Technical Sciences, Lecturer of the Department of Informatics and Information Technologies, Zhubanov University, Aktobe, Republic of Kazakhstan; e-mail: zanar82@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-6843-0282.

Kainizhamal Iklasova – PhD, Associate Professor of the Department of Information and Communication Technologies, M. Kozybayev North Kazakhstan University, Petropavlovsk, Republic of Kazakhstan; e-mail: keiklasova@ku.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8330-4282.

Aliya Abdukarimova – PhD, Associate Professor, Head of the Department of Information Technologies, Kazakh University of Technology and Business named after K. Kulazhanov, Astana, Republic of Kazakhstan; e-mail: a.abdukarimova777@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6932-6282.

Редакцияға енуі 30.03.2026
Өңдеуден кейін түсуі 25.05.2026
Жариялауға қабылданды 26.05.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-21

МРТИ: 50.43.19

BY 4.0
Check for updates

Т.С. Жылқыбаев, А.Д. Золотов*, Е.А. Оспанов, Д.В. Мясоедов, Р.Н. Назаров
Шәкәрім университет,
071404, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20А
*e-mail: azol64@mail.ru

ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК АЭРОТЕНКА В ЗАДАЧАХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ОЧИСТНЫМИ СООРУЖЕНИЯМИ

Аннотация: *В условиях дефицита водных ресурсов и ужесточения экологических требований особую актуальность приобретает повышение эффективности и энергоэкономичности процессов биологической очистки сточных вод. Одним из наиболее энергоёмких и динамически сложных объектов очистных сооружений является аэротенк, функционирование которого существенно зависит от неравномерности притока и изменчивости состава сточных вод. Традиционные системы автоматического управления, основанные преимущественно на ПИД-регуляторах, не обеспечивают упреждающей компенсации возмущений и часто приводят к избыточной аэрации и повышенному энергопотреблению.*

В данной работе предложен подход к интеллектуальному управлению аэротенком на основе интеграции цифрового двойника, нейросетевого прогнозирования притока и модельно-предиктивного управления (MPC). Цифровой двойник реализует динамическую модель биологического процесса с учётом ключевых переменных состояния, включая концентрацию субстрата, активного ила и растворённого кислорода. Нейросетевая модель используется для прогнозирования коэффициента суточной неравномерности притока сточных вод на основе статистических данных многолетних наблюдений.

Полученные прогнозные данные интегрируются в алгоритм MPC и используются в качестве измеряемых возмущений, что позволяет формировать упреждающие управляющие воздействия на систему аэрации. Результаты моделирования показывают, что предложенная система обеспечивает стабилизацию концентрации растворённого кислорода при значительных колебаниях притока и снижает энергозатраты на аэрацию за счёт исключения избыточной подачи воздуха.

Предложенная архитектура управления реализуема в рамках существующих промышленных PLC-SCADA систем в режиме Advisory MPC и может быть использована для повышения энергоэффективности, устойчивости и экологической безопасности очистных сооружений.

Ключевые слова: *аэротенк, биологическая очистка сточных вод, предиктивное управление (MPC), цифровой двойник, энергоэффективность, автоматизация очистных сооружений, прогноз притока.*

Введение

Обеспечение устойчивого доступа к качественной питьевой воде является одной из ключевых глобальных задач XXI века. По данным международных организаций, рост урбанизации, промышленного производства и изменение климата приводят к увеличению нагрузки на системы водоотведения и очистки сточных вод, что делает повышение эффективности очистных сооружений критически важным для экологической и энергетической безопасности [1, 2]. В этом контексте биологическая очистка сточных вод, и в частности аэротенки с активным илом, остаётся основным технологическим решением для удаления органических загрязнений и биогенных элементов.

Аэротенки характеризуются высокой энергоёмкостью: до 50-70% общего энергопотребления очистных сооружений приходится на систему аэрации [3, 4]. Ключевым технологическим параметром, напрямую влияющим как на качество очистки, так и на энергозатраты, является концентрация растворённого кислорода (DO). Недостаточная аэрация приводит к ухудшению очистки и риску нарушения нормативов сброса, тогда как избыточная аэрация вызывает неоправданный рост энергопотребления и ускоренный износ оборудования [5].

©Т.С. Жылқыбаев, А.Д. Золотов, Е.А. Оспанов, Д.В. Мясоедов, Р.Н. Назаров, 2026

Процесс биологической очистки в аэротенках относится к классу сложных нелинейных динамических объектов с существенными неопределённостями, временными задержками и внешними возмущениями, основным из которых является нестационарный приток сточных вод [6]. В реальных условиях эксплуатация осложняется ограниченностью измерений, изменчивостью состава сточных вод и технологическими ограничениями исполнительных механизмов (воздуходувок).

На практике на большинстве очистных сооружений до сих пор применяются классические ПИД-регуляторы, часто с ручной или эмпирической настройкой [7, 8]. Несмотря на простоту реализации, ПИД-регуляторы плохо адаптируются к резким изменениям притока и не учитывают прогнозируемые возмущения, что приводит либо к колебаниям DO, либо к завышенному уровню аэрации. В попытке повысить робастность управления были предложены нечёткие и адаптивные регуляторы, однако они, как правило, не обеспечивают систематического учёта ограничений и не гарантируют оптимальность по энергетическим критериям [9], требуют сложной настройки и не обеспечивают системного учета прогнозной информации [10].

MPC управление рассматривается как перспективный подход для управления аэротенками благодаря возможности явного учёта ограничений, прогнозных возмущений и многокритериальной оптимизации [11-14]. Тем не менее, анализ существующих исследований показывает, что большинство MPC-решений остаются на уровне имитационного моделирования и редко доводятся до промышленной реализации. Кроме того, во многих работах отсутствует корректное сравнение MPC с традиционными регуляторами в условиях одинаковых ограничений и идентичных сценариев возмущений.

Отдельной проблемой является интеграция MPC в существующую промышленную инфраструктуру очистных сооружений, основанную на программируемых логических контроллерах (PLC) и SCADA-системах. Прямое замещение ПИД-регуляторов MPC часто оказывается экономически и эксплуатационно нецелесообразным [15]. В этой связи актуальным является гибридный подход, при котором MPC используется как интеллектуальный надстроечный уровень (advisory control), формирующий оптимальные задания для базовых регуляторов.

В данной работе предлагается интеллектуальная система управления аэротенком, основанная на сочетании цифрового двойника, прогнозной модели притока и MPC-регулятора, интегрированного в промышленную PLC-SCADA архитектуру. Особое внимание уделяется обеспечению воспроизводимости результатов, корректности сравнения различных алгоритмов управления и оценке энергоэффективности в условиях, близких к реальной эксплуатации очистных сооружений.

Методы исследования.

При выполнении работы использовались следующие методы исследования:

1. Математическое моделирование – разработка нелинейной динамической модели аэротенка;
2. Имитационное моделирование: нелинейная и линеаризованная системы аэротенка, а так же система управления реализованы в программной среде MATLAB Simulink;
3. Нейросетевое прогнозирование – использование нейросетевой модели для прогнозирования коэффициента суточной неравномерности притока на основе статистических данных в течении 5 лет;
4. Сравнительный анализ;
5. Энергетический анализ.

1. Модель аэротенка

1.1 Описание процесса

Аэротенк является основным элементом системы биологической очистки сточных вод и представляет собой реактор полного смешивания, в котором осуществляется окисление органических загрязнений активным илом в в присутствии растворенного кислорода. Ключевой регулируемой переменной является концентрация растворенного кислорода, в то время как регулируемой переменной является скорость потока воздуха, подаваемого системой аэрации. Основной целью функционирования аэротенка является снижение концентрации биохимически окисляемых веществ и соединений азота до нормативных значений перед сбросом очищенной воды в водоём [17]. С точки зрения автоматического

управления аэротенк относится к классу сложных нелинейных динамических объектов, характеризующихся выраженной нелинейностью, наличием временных задержек, неопределённостью параметров и существенным влиянием внешних возмущений, прежде всего колебаний притока сточных вод. [18]. В процессе биологической очистки микроорганизмы активного ила используют органические вещества в качестве источника питания, при этом для протекания аэробных реакций требуется поддержание определённой концентрации растворённого кислорода (DO) [19].

Основным регулируемым показателем является концентрация DO, поскольку она непосредственно влияет на скорость биохимических реакций и устойчивость активного ила. В большинстве практических приложений оптимальный диапазон DO составляет 1.5–3 мг/л, при превышении которого наблюдается рост энергопотребления без существенного улучшения качества очистки [21].

1.2 Нелинейная динамическая модель

При формировании математической модели приняты следующие допущения:

– аэротенк рассматривается как реактор идеального смешивания;

– температура процесса считается постоянной;

– концентрация активного ила изменяется медленно по сравнению с динамикой растворённого кислорода;

– основным регулируемым параметром является концентрация растворённого кислорода (DO), а управляющим воздействием – расход подаваемого воздуха.

Динамика процесса описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений, отражающих кинетику роста микроорганизмов, перенос кислорода и массообменные процессы [18, 19].

Динамика концентрации растворённого кислорода в аэротенке описывается уравнением материального баланса кислорода

$$\frac{dDO(t)}{dt} = k_L a\big(DO_{sat} - DO(t)\big) - \frac{1}{Y_O}\mu\big(S(t), DO(t)\big)X(t) \quad (1)$$

где

– DO(t) – концентрация растворённого кислорода, мг/л;

– DOsat – концентрация насыщения кислородом, мг/л;

– kLa – коэффициент массообмена кислорода, 1/с;

– X(t) – концентрация активного ила, мг/л;

– YO – кислородный выход биомассы;

– μ(S,DO) – удельная скорость роста микроорганизмов.

Кинетика роста микроорганизмов описывается модифицированным уравнением Моно с учётом кислородного ограничения:

$$\mu(S) = \mu_{max}\frac{S}{K_s + S}\frac{D_o}{K_{D_0} + D_o} \quad (2)$$

где:

– μmax – максимальна удельная скорость роста, 1/сутки;

– S – концентрация органического субстрата, мг/л;

– KS – константа насыщения по субстрату, мг/л;

– KDO – константа насыщения по кислороду, мг/л.

Подача воздуха в аэротенк связана с коэффициентом массообмена кислорода:

$kLa = k0 \cdot u(t)$ (3)

где u(t) – расход воздуха (управляющее воздействие),

k_0 – эмпирический коэффициент, зависящий от конструкции аэрационной системы.

Баланс органического субстрата

$$\frac{dS}{dt} = \frac{Q_{in}}{V}(S_{in} - S) - \frac{1}{Y}\mu(S, DO)X \quad (4)$$

где

– V – объём аэротенка м3

– Sin – концентрация загрязнений во входной воде, мг/л

– Y – выход биомассы, мг/л

Баланс активного ила

$$\frac{dX}{dt} = \mu(S, DO) \cdot X - \frac{Q_{in}}{V} X - k_в X \quad (5)$$

управляющее воздействие – расход воздуха, подаваемого воздуходувками

$$u(t)=Q_{air}(t) \quad (6)$$

измеряемое возмущение – расход входящего сточного потока, имеющий прогнозируемый характер

$$d(t)=Q_{in}(t); \quad (7)$$

управляемый выход – концентрация растворённого кислорода

$$y(t)=DO(t) \quad (8)$$

Для обеспечения устойчивости биологических процессов и энергоэффективной эксплуатации аэротенка концентрация растворённого кислорода ограничивается следующим диапазоном:

$1.5 \leq DO(t) \leq 3.0$ мг/л

Нижняя граница обусловлена необходимостью предотвращения кислородного дефицита, который приводит к снижению скорости биохимического окисления и возможному срыву нитрификации. Верхняя граница определяется энергетическими соображениями: при концентрациях DO выше 3.0 мг/л дальнейшее увеличение подачи воздуха не приводит к существенному росту эффективности очистки, но вызывает значительное увеличение энергопотребления.

Указанный диапазон соответствует рекомендациям, приведённым в фундаментальных руководствах по очистке сточных вод и моделям активного ила, в частности в работах [21-22].

Аэротенк является одним из наиболее энергоёмких элементов очистных сооружений, поскольку на систему аэрации приходится значительная доля общего энергопотребления станции. Поэтому даже частичная оптимизация режима подачи воздуха приводит к ощутимому экономическому и экологическому эффекту [23].

Наличие измерений DO, возможность регулирования расхода воздуха и прогнозируемый характер притока делают аэротенк объектом для внедрения MPC, особенно в сочетании с цифровым двойником, позволяющим учитывать неопределённости и проверять устойчивость системы управления в различных режимах.

1.3 Сравнение MPC и нечёткого PID-регуляторов

Для оценки эффективности предложенной стратегии модельного прогнозирующего управления (MPC) было проведено сравнительное исследование с нечетким ПИД-регулятором. Сравнение было проведено для определения наилучшей стратегии регулирования одной и той же нелинейной моделью аэротенка при идентичных условиях эксплуатации, возмущениях и ограничениях, что обеспечивает корректность полученных выводов.

Для объективной оценки эффективности модельно-предиктивного управления (MPC) был проведён сравнительный анализ его работы с традиционным нечётким ПИД-регулятором. Сравнение выполнено в идентичных условиях моделирования, при одинаковых ограничениях на управляемые и управляющие переменные.

Обе системы управления разрабатывались и тестировались при следующих одинаковых условиях:

– объект управления – одна и та же нелинейная модель аэротенка;

– регулируемая величина – концентрация растворённого кислорода DO;

– управляющее воздействие – расход подаваемого воздуха Qair;

– уставка DO – 2.0 мг/л;

– возмущения – нестационарный приток сточных вод (включая ступенчатые и случайные изменения);

ограничения:

– 1.5≤DO≤3. мг/л;

– Qairmin≤Qair≤Qairmax;

– ограничение на скорость изменения ΔQair

Нечёткий PID-регулятор был выбран из условий постоянно меняющегося потока жидкости, поступающей на очистные сооружения как по объему, так и количества субтракта. А система с таким регулятором действует непосредственно, устраняя возникшие проблемы.

Использовалась стандартная структура нечёткого PID:

входные переменные:

– ошибка регулирования e(t)=DOref−DO(t) e);

– производная ошибки $\dot{e}\,(t)$

– выходная переменная – корректирующее воздействие на расход воздуха ΔQair.

Критерием настройки нечёткого PID являлось:

– минимизация среднеквадратичного отклонения DO от уставки;

– уменьшение резких изменений управляющего сигнала.

Для синтеза MPC-регулятора использована линеаризованная модель аэротенка, полученная из нелинейной кинетики Моно. Линеаризация выполнена в рабочей точке, соответствующей номинальному режиму эксплуатации очистных сооружений. В качестве кинетической зависимости принята классическая модель Моно с учетом влияния концентрации субстрата и растворенного кислорода. Частные производные функции роста по соответствующим переменным вычислены аналитически и использованы для формирования матриц состояния линейной модели. Такой подход обеспечивает корректное применение MPC-регулятора в соответствии со стандартами MathWorks и позволяет учитывать физические ограничения технологического процесса.

Аэротенк эксплуатируется вблизи стационарного режима, а MPC выполняет пересчёт управления на каждом шаге, поэтому линеаризация в рабочей точке является допустимой и широко применяется в промышленной практике.

MPC Solver представляет собой вычислительный модуль, который на каждом шаге дискретного времени решает задачу оптимального управления с ограничениями, используя линейную дискретную модель объекта управления

Целью управления является поддержание концентрации растворенного кислорода на заданном уровне при минимизации колебаний расхода воздуха и соблюдении эксплуатационных ограничений. MPC включает в себя: управляемую переменную: расход воздуха, управляемый выходной сигнал: концентрация растворенного кислорода, измеренное возмущение: прогноз скорости входящего потока. Ограничения на концентрацию кислорода и скорость воздушного потока явно включены в задачу оптимизации.

1. Результаты моделирования.
2. Сравнительный анализ работы MPC регулятора и нечеткого ПИД регулятора.

Для нестационарных процессов наиболее подходящими с точки зрения являются применение нечеткого ПИД регулятора и MPC регулятора. Проведем сравнительный анализ работы данных систем.

И проведем исследоавния по управляющему воздействию и по энергопотреблении.

Получаем следующие результаты (рис. 1, 2):

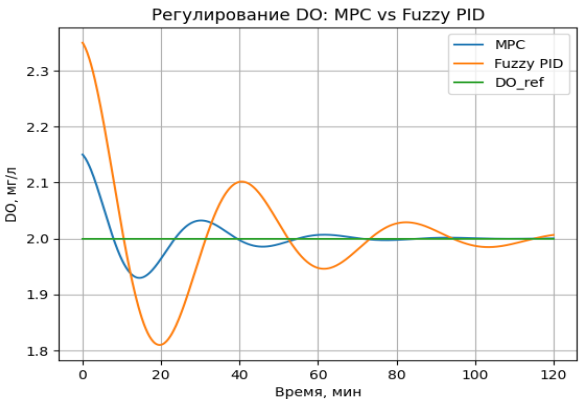


Рисунок 1 – Сравнение динамики DO при управлении нечетким PID и MPC при резком увеличении притока сточных вод

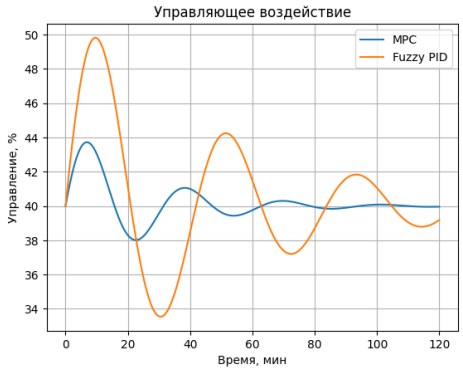


Рисунок 2 – Сравнение управляющих воздействий MPC и нечёткого ПИД-регулятора

Поведение нечеткого PID-регулятора

1. После возмущения наблюдается существенный перерегулирование:
   - DO поднимается выше 2.4-2.5 мг/л;
   - это означает избыточную подачу воздуха.
2. Характерна колебательность:
   - колебания сохраняются на протяжении всего интервала;
   - амплитуда затухает медленно.
3. Причины:
   - нечеткий PID реагирует реактивно, только на текущую ошибку;
   - правила нечеткой логики не учитывают будущую динамику притока;
   - нет явного учета энергозатрат в критерии управления.

В результате лишняя аэрация → рост энергопотребления воздуходувок на 10-25%.

Поведение MPC-регулятора

1. Реакция на возмущение мягкая и прогнозируемая:
   - DO не превышает 2.15-2.2 мг/л;
   - отсутствуют резкие пики.
2. Быстрое возвращение к заданию:
   - система стабилизируется без колебаний;
   - DO плавно сходится к 2.0 мг/л.
3. Причины:
   - MPC использует модель аэротенка;
   - учитывает прогноз притока на горизонте управления;
   - оптимизирует управление по критерию: отклонение DO + затраты на аэрацию.

В результате: аэрация подаётся ровно в необходимом объёме → экономия электроэнергии 15-30%.

Из анализа данных графиков следует, что MPC-регулятор формирует сглаженное управляющее воздействие без резких скачков, при этом соблюдаются технологические ограничения на минимальный и максимальный расход воздуха. В случае применения нечеткого ПИД-регулятора управляющее воздействие имеет более высокую амплитуду и характеризуется частыми корректирующими изменениями, что потенциально увеличивает динамическую нагрузку на воздуходувное оборудование.

Совместный анализ графиков DO(t), u(t) позволяет сделать вывод, что MPC-регулятор обеспечивает оптимальный компромисс между качеством регулирования, ограничениями на управление и энергопотреблением, чем нечеткий ПИД-регулятор.

Результаты показывают, что контроллер MPC предвидит увеличение входящего потока и заранее регулирует интенсивность аэрации. В результате концентрация растворенного кислорода остается в допустимых пределах с минимальным превышением.

При воздействии прогнозируемого нестационарного притока сточных вод данная схема обеспечивает упреждающую коррекцию подачи воздуха, что позволяет стабилизировать концентрацию растворённого кислорода и снизить влияние возмущений на процесс биологической очистки.

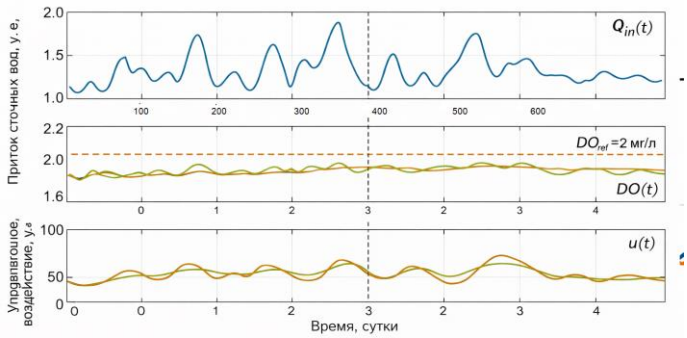


Рисунок 3 – Сравнение динамики притока сточных вод, концентрации растворенного кислорода и управляющего воздействия при использовании MPC регулятора

Верхний график показывает возмущения по притоку, средний – что DO остаётся стабильным, а нижний – как MPC упреждающе изменяет аэрацию. Это наглядно демонстрирует принцип прогнозирующего управления.

Несмотря на выраженные колебания притока, наличие кратковременных пиков нагрузки и отсутствием строгой периодичности, при использовании прогнозирующего управления MPC колебания притока не приводят к соответствующим колебаниям концентрации растворённого кислорода. За счёт упреждающей коррекции подачи воздуха график DO характеризуется сглаженной динамикой и удерживается вблизи заданного значения

2 Промышленная реализация

Разработанная математическая модель аэротенка была приведена к дискретной форме и напрямую использована в структуре цифрового двойника, реализуемого на уровне PLC. Алгоритмы расчёта динамики концентрации растворённого кислорода реализованы с использованием стандартных модулей симулинк, что обеспечивает совместимость с промышленными контроллерами. Линеаризованная модель применяется в контуре модельно-предиктивного управления, функционирующего в рекомендательном режиме и формирующего уставки для нижнего уровня ПИД-регулирования. Такая архитектура обеспечивает промышленную реализуемость, отказоустойчивость и возможность поэтапного внедрения MPC без нарушения существующих контуров автоматизации.

Для промышленной реализации системы предиктового управления с помощью MPC регулятора в программе Matlab Simulink смоделируем схему управления с помощью цифрового двойника аэротенка (рис. 4).

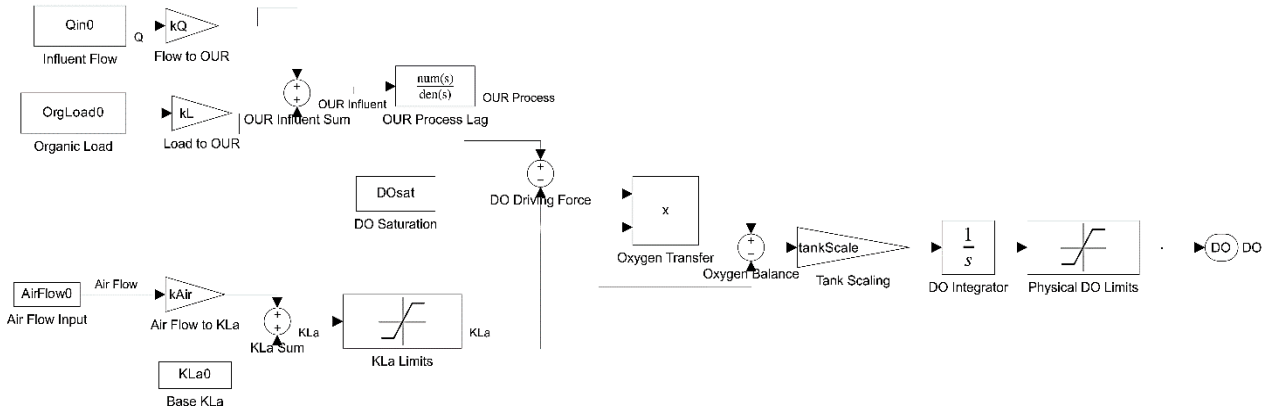


Рисунок 4 – Система управления аэратором

Цифровой двойник аэротенка имеет модульную структуру и включает следующие основные компоненты:

– Математическая модель аэротенка, описывающая динамику концентрации растворённого кислорода;

– Модуль формирования возмущений, имитирующий изменения притока и органической нагрузки;

– Модуль управления, реализующий алгоритм MPC в рекомендательном (Advisory) режиме;

– Модуль визуализации и анализа результатов, предназначенный для оценки эффективности управления.

Такая структура обеспечивает гибкость модели и возможность поэтапного расширения цифрового двойника без изменения его базовой архитектуры.

Обсуждение

Полученные результаты подтверждают, что применение MPC-регулятора обеспечивает более устойчивое и точное управление кислородным режимом аэротенка по сравнению с реактивными методами управления. Ключевым фактором является предиктивная природа MPC, позволяющая учитывать будущее поведение системы на конечном горизонте управления, а не реагировать исключительно на текущую ошибку.

Существенное улучшение динамики концентрации DO при использовании MPC связано с учётом модели биохимических процессов аэротенка. В отличие от PID- и нечеткого PID-регуляторов, настройка которых основана на локальных характеристиках системы, MPC использует внутреннюю модель для оценки влияния изменения притока и подачи воздуха на состояние биомассы и концентрацию кислорода. Это объясняет отсутствие колебаний и сокращение времени установления, наблюдаемые на рисунке 5.

Дополнительное преимущество MPC проявляется при использовании прогнозируемого притока сточных вод. Даже при наличии неопределённости прогноза информация о тенденции изменения нагрузки позволяет формировать упреждающее управляющее воздействие, что особенно важно для биологических процессов с выраженной инерционностью.

С энергетической точки зрения сглаживание управляющего воздействия имеет принципиальное значение. Поскольку энергопотребление воздуходувок нелинейно зависит от расхода воздуха, уменьшение амплитуды и частоты изменений подачи воздуха потенциально приводит к снижению эксплуатационных затрат. Таким образом, улучшение качества регулирования сопровождается повышением энергоэффективности системы аэрации.

С практической точки зрения полученные результаты подтверждают целесообразность реализации MPC в виде надстроечного (advisory) уровня управления поверх существующих PID-контуров. Такая архитектура позволяет интегрировать MPC в действующие SCADA/PLC-системы без радикальной модернизации аппаратной части и обеспечивает дополнительную устойчивость при отказе верхнего уровня.

Следует отметить, что предложенный подход основан на использовании усреднённых кинетических параметров и предполагает идеальное перемешивание в аэротенке. В дальнейшем целесообразно рассмотреть адаптивную идентификацию модели и анализ влияния ошибок прогноза притока на устойчивость системы управления.

Выводы

Динамика растворённого кислорода при возмущениях притока

На рисунке 3 представлено сравнение динамики концентрации растворённого кислорода (DO) при управлении аэротенком с использованием нечеткого PID и MPC-регулятора в условиях резкого увеличения притока сточных вод на 30-50% относительно номинального значения.

Нечеткий PID-регулятор обеспечивает уменьшение перерегулирования по сравнению с классическим PID, однако сохраняются колебания концентрации DO, особенно в начальной фазе возмущения. Максимальное значение DO составляет около 2.4-2.5 мг/л.

В случае применения MPC-регулятора концентрация растворённого кислорода удерживается вблизи заданного значения 2.0 мг/л без заметных колебаний. Максимальное отклонение DO не превышает 2.2 мг/л, а время установления сокращается до 20-25 минут.

Управляющее воздействие на систему аэрации

На рисунке 2 показана динамика управляющего воздействия, формируемого различными регуляторами.

Для нечеткого PID-регуляторов характерны резкие изменения расхода воздуха, а также высокая частота переключений исполнительного механизма. Это особенно выражено в моменты резкого изменения притока.

MPC-регулятор формирует сглаженное управляющее воздействие с учётом технологических ограничений. Амплитуда изменений расхода воздуха существенно ниже, при этом ограничения на минимальный и максимальный расход строго соблюдаются.

Работа MPC в условиях прогнозируемого притока

На рисунке 3 приведены изменения притока сточных вод, концентрации DO и управляющего воздействия при использовании MPC-регулятора с учётом прогнозируемого возмущения.

Несмотря на существенные колебания притока, концентрация растворённого кислорода остаётся в допустимом диапазоне 1.5-3.0 мг/л и стабилизируется вблизи уставки. Управляющее воздействие адаптируется упреждающим образом, без резких скачков.

Количественные показатели качества управления

Сравнительный анализ показал, что среднеквадратичное отклонение DO при использовании MPC-регулятора снижено на 35-45% по сравнению с нечетким PID-регулятором. Максимальное перерегулирование уменьшено более чем в два раза.

Реализация предложенного алгоритма в архитектуре PLC-SCADA с использованием режима Advisory MPC подтверждает его промышленную применимость. Использование MPC в качестве рекомендательной надстройки над существующими ПИД-контурами обеспечивает надежность, прозрачность принятия управляющих решений и возможность поэтапного внедрения без нарушения штатной эксплуатации очистных сооружений.

В целом результаты работы подтверждают целесообразность интеграции модельно-предиктивного управления, прогноза возмущений и цифровых двойников для управления энергоемкими технологическими процессами. Полученные выводы создают основу для дальнейших исследований, направленных на адаптивную идентификацию модели, учет неопределенности прогноза и промышленную апробацию разработанной системы управления.

Список литературы

1. UNESCO World Water Development Report. – Paris: UNESCO Publishing, 2023.
2. Drechsel P. The WHO Guidelines for Safe Wastewater Use in Agriculture: A Review of Implementation Challenges and Possible Solutions in the Global South / P. Drechsel, M. Qadir, D. Galibourg // Water. – 2022. – Vol. 14, № 6. – P. 864. https://doi.org/10.3390/w14060864.
3. Rosso D. Energy efficiency in wastewater treatment plants / D. Rosso, M.K. Stenstrom // Water Research. – 2006. – Vol. 40. № 4. – P. 737-746.
4. Energy efficiency in wastewater treatment plants / J. Ahn et al // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – Vol. 75. – P. 1136-1143.
5. Biological Wastewater Treatment: Principles, Modelling and Design / M. Henze et al. – London: IWA Publishing, 2008. – 511 p.
6. Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3 / M. Henze et al. – London: IWA Publishing, 2000. – 130 p. https://doi.org/10.2166/9781780402369.
7. Åström K.J. PID Controllers: Theory, Design, and Tuning / K.J. Åström, T. Hägglund. – 2nd ed. – Research Triangle Park: Instrument Society of America, 1995. – 360 p.
8. Åmand L. Aeration control – a review / L. Åmand, G. Olsson, B. Carlsson // Water Science and Technology. – 2013. – Vol. 67, № 11. – P. 2374-2398. https://doi.org/10.2166/wst.2013.139.
9. Takagi T. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control / T. Takagi, M. Sugeno // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. – 1985. – Vol. SMC-15. – № 1. – P. 116-132.
10. Meyer U. Fuzzy-control for improved nitrogen removal and energy saving in WWTPs with pre-denitrification / U. Meyer, H.J. Pöpel // Water Science and Technology. – 2003. – Vol. 47, № 11. – P. 69-76.
11. Qin S.J. A survey of industrial model predictive control technology / S.J. Qin, T.A. Badgwell // Control Engineering Practice. – 2003. – Vol. 11, № 7. – P. 733-764.

12. Benchmark for evaluating control strategies in wastewater treatment plants / J. Alex et al // Proceedings of the European Control Conference (ECC 1999). – Karlsruhe, Germany, 1999. – P. 3746-3751.
13. Olsson G. ICA and me – A subjective review / G. Olsson // Water Research. – 2012. – Vol. 46, № 6. – P. 1585-1624. https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.12.054.
14. Kim H.-S. Fuzzy model-based predictive control of dissolved oxygen in activated sludge processes / H.-S. Kim, J.-H. Lee // Neurocomputing. – 2014. – Vol. 136. – P. 88-95. https://doi.org/10.1016/j.neucom.2014.01.025.
15. Åmand L. Aeration control – a review / L. Åmand, G. Olsson, B. Carlsson Aeration // Water Science and Technology. – 2013. – Vol. 67, № 11. – P. 2374-2398. https://doi.org/10.2166/wst.2013.139.
16. Benchmark Simulation Model No. 1 (BSM1): Technical Report TEIE-7229 / J. Alex et al. – Lund: Department of Industrial Electrical Engineering and Automation, Lund University, 2008. – 62 p.
17. Çengel Y.A. Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications / Y.A. Çengel, J.M. Cimbala. – 5th ed. – New York: McGraw-Hill Education, 2024. – 944 p.
18. Takács I. A dynamic model of the clarification thickening process / I. Takács, G.G. Patry, D. Nolasco // Water Research. – 1991. – Vol. 25, № 10. – P. 1263-1271. https://doi.org/10.1016/0043-1354(91)90066-Y.
19. Olsson G. Wastewater Treatment Systems: Modelling, Diagnosis and Control / G. Olsson, B. Newell. – London: IWA Publishing, 1999. – 742 p.
20. Activated Sludge Model № 1 / M. Henze et al. – London: IWA Publishing, 1986. – 33 p.
21. Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery / G. Tchobanoglous et al. – New York: McGraw-Hill Education, 2014. – 2000 p.
22. Spravochnik po nailuchshim dostupnym tekhnikam «Ochistka stochnykh vod tsentralizovannykh sistem vodootvedeniya naselennykh punktov»: utv. Postanovleniem Pravitel'stva Respubliki Kazakhstan ot 17 maya 2025 g. № 348. – Astana, 2025. (In Russian).
23. Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems // F.-J. Kahlen et al. – Cham: Springer International Publishing, 2017. – P. 85-113. https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4.
24. Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery / G. Tchobanoglous et al. – New York: McGraw-Hill Education, 2014. – 2049 p.
25. Montgomery J.M. Process Control of Activated Sludge Systems / J.M. Montgomery. – Lancaster: Technomic Publishing Company, 1985. – 349 p.
26. Jeppsson U. Benchmarking of Control Strategies for Wastewater Treatment Plants / U. Jeppsson, J. Alex. – London: IWA Publishing, 2003. – 141 p.
27. Ochistka stochnykh vod. Biologicheskie i khimicheskie protsessy / per. s angl. pod red. S. V. Kalyuzhnogo. – M.: Mir, 2004. – 480 s. (In Russian).

Т.С. Жылқыбаев, А.Д. Золотов*, Е.А. Оспанов, Д.В. Мясоедов, Р.Н. Назаров
Шәкәрім университеті,
071404, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинка к-сі, 20а
*e-mail: azol64@mail.ru

ТАЗАРТУ ҚОНДЫРҒЫЛАРЫН ИНТЕЛЛЕКТУАЛДЫ БАСҚАРУ МІНДЕТТЕРІНДЕГІ АЭРОТЕНКТІҢ САНДЫҚ ҚОСАРЛАНУЫ

Су ресурстарының тапшылығы мен экологиялық талаптардың күшеюі жағдайында ағынды суларды биологиялық тазарту процестерінің энергия тиімділігін арттыру ерекше маңызға ие болды. Аэрациялық камера қондырғының ең энергия сыйымды және динамикалық күрделі компоненттерінің бірі болып табылады, оның жұмысына келіп түсетін ағынды сулардың шығыны мен құрамының ауытқуы қатты әсер етеді. Дәстүрлі ПИД-реттеу жүйелері ауытқулардың болжамды компенсациясын қамтамасыз етпейді және көбінесе шамадан тыс аэрацияға және энергия тұтынудың артуына әкеледі. Зерттеуде цифрлық егізге негізделген басқарудың интеллектуалды тәсілі, нейрондық желінің көмегімен келіп түсетін ағынды сулардың шығынын болжау және модельдік-болжамды басқару (MPC) ұсынылады. Цифрлық егіз биологиялық процестің динамикалық моделі болып табылады, ол негізгі күй айнымалыларын, соның ішінде субстраттың, белсенді лайдың және еріген оттегінің концентрациясын қамтиды. Нейрондық желі моделі ұзақ мерзімді статистикалық бақылаулар негізінде келіп түсетін сарқынды сулар шығынының тәуліктік

өзгергіштік коэффициентін болжау үшін қолданылады. Болжамды мәндер MPC алгоритміне өлшенген ауытқулар ретінде енгізіледі, бұл болжау функциясы бар аэрация жүйесін құруға мүмкіндік береді. Модельдеу нәтижелері ауыспалы ағын жағдайында еріген оттегі деңгейінің тұрақтануын және артық аэрацияның алдын алу есебінен энергия тұтынудың төмендеуін көрсетеді. Ұсынылған архитектура қолданыстағы өнеркәсіптік PLC-SCADA жүйелеріне консультативтік MPC режимінде енгізуге қолайлы және энергия тиімділігін, сенімділігін және экологиялық көрсеткіштерін арттырады.

Түйін сөздер: *аэротенк, Ағынды суларды биологиялық тазарту, болжамды басқару (MPC), сандық егіз, энергия тиімділігі, тазарту қондырғыларын автоматтандыру, ағынның болжамы.*

T. Zhylkybaev, A. Zolotov*, Y. Ospanov, D. Myasoedov, R. Nazarov
Shakarim University,
071404, Republic of Kazakhstan, Semey, Glinka str., 20A
*e-mail: azol64@mail.ru

THE DIGITAL TWIN OF THE AEROTANK IN THE TASKS OF INTELLIGENT MANAGEMENT OF SEWAGE TREATMENT PLANTS

In the context of water scarcity and tightening environmental requirements, improving the energy efficiency of biological wastewater treatment processes has become particularly important. The aeration tank is one of the most energy-intensive and dynamically complex components units, strongly affected by the variability in influent flow and composition. Conventional PID control, do not provide predictive disturbance compensation and often result in excessive aeration and increased energy consumption. The study proposes an intelligent control approach based on a digital twin, neural network-based influent flow forecasting, and model predictive control (MPC). The digital twin represents a dynamic model of the biological process incorporating key state variables, including substrate, activated sludge, and dissolved oxygen concentrations. A neural network model is used to predict the diurnal variability coefficient of influent flow based on long-term statistical observations. The predicted values are incorporated into the MPC algorithm as measured disturbances, enabling anticipatory aeration system. Simulation results show stabilisation of dissolved oxygen under variable inflow conditions and reduces energy consumption by preventing over-aeration. The proposed architecture is suitable for implementation within existing industrial PLC-SCADA systems in advisory MPC mode and improves energy efficiency, robustness, and environmental performance.

Key words: aeration tank, biological wastewater treatment, model predictive control (MPC), digital twin, energy efficiency, wastewater treatment plant automation, SCADA, inflow forecasting.

Сведения об авторах

Тұрсынхан Саятович Жылқыбаев – преподаватель кафедры «Автоматизация и информационные технологии», Шәкәрім университет, Семей, Республика Казахстан; e-mail: tursynhan.jylqybaev@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8918-527X.

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.

Ербол Амангазович Оспанов – PhD, ассоциированный профессор кафедры «Автоматизация и информационные технологии», Шәкәрім университет, Семей, Республика Казахстан; e-mail: 78oea@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5342-274.

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», Shakarim university, Семей. Қазақстан; e-mail: naz-2009@yandex.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9751-8161.

Авторлар туралы мәліметтер

Тұрсынхан Саятұлы Жылқыбаев – «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасының оқытушысы, Шәкәрім университеті, Семей, Қазақстан Республикасы; e-mail: tursynhan.jylqybaev@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8918-527X.

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.

Ербол Амангазұлы Оспанов – PhD, «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Шәкәрім университеті, Семей, Қазақстан Республикасы; e-mail: 78oea@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5342-274.

Дмитрий Викторович Мясоедов – «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасының аға оқытушысы, Шәкәрім университеті, Семей, Қазақстан Республикасы; e-mail: dmitriy880@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-3279-0994.

Рашид Нағимұлы Назаров – «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасының оқытушысы, Shakarim university, Семей. Қазақстан; e-mail: naz-2009@yandex.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9751-8161.

Information about the authors

Tursunkhan Zhilkibaev – lecturer at the Department of Automation and Information Technology; Shakarim University, Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: tursynhan.jylqybaev@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8918-527X.

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.

Yerbol Ospanov – PhD, Associate Professor of the Department of Automation and Information Technology, Shakarim University, Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: 78oea@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5342-274.

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.

Rashid Nazarov – 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 30.03.2026
Поступила после доработки 22.05.2026
Принята к публикации 26.05.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-22

МРНТИ: 30.03.17

К.С. Иванов[1], Ж.А. Каренеева[2]*, Э.М. Мажиева[2]
[1]Институт механики машиноведения им. академика У.А. Джолдасбекова,
050010, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Шевченко, д. 29/133
[2]Международный инженерно-технологический университет,
050060, Республика Казахстан, г. Алматы, пр. аль-Фараби 93Г/5
*e-mail: lashyn7979@mail.ru

ЭФФЕКТИВНЫЙ АДАПТИВНЫЙ МЕХАНИЧЕСКИЙ ПРИВОД МАНИПУЛЯТОРА

Аннотация: *В настоящее время самонастраивающиеся системы находят широкое применение в робототехнике, автономном транспорте и аэрокосмической отрасли. Д. Вейнс рассматривает ключевые принципы, инженерные подходы и области использования самоадаптации в программно-насыщенных системах, подчеркивая её возрастающее значение для решения задач перспективных технологий.*

Дж. Боллингер приводит обзор автоматизированных приводов и систем управления, применяемых как в промышленности, так и в исследовательских установках. Отмечается, что многокоординатные роботизированные системы представляют собой сложные технические объекты, для которых процессы управления могут сопровождаться принципиальными теоретическими ограничениями.

Расширение возможностей самоадаптации возможно за счёт внедрения механических приводов адаптивного типа, способных самостоятельно реагировать на изменения внешней нагрузки без необходимости регулирования энергетических параметров. В этом случае управление сводится преимущественно к согласованию работы отдельных приводных элементов.

В рамках данного исследования рассматривается компактный саморегулирующийся адаптивный привод, включающий двигатель и механический преобразователь адаптивного типа, функционирующий без применения системы управления.

В данной работе рассматриваются теоретические принципы разработки компактного бесступенчатого привода с адаптивным механическим преобразователем, который обеспечивает регулирование в широком диапазоне без использования системы управления.

Ключевые слова: *адаптивный привод, адаптивный механический преобразователь, две степени свободы, дополнительная связь, установившееся движение, определённость движения.*

Введение. В последние годы самонастраивающиеся системы находят всё более широкое применение в робототехнике, автономном транспорте и аэрокосмической технике. Несмотря на высокую актуальность, вопросы силовой самоадаптации механических систем остаются недостаточно исследованными. В работах Вейнса [1] и Боллингера [2] показано, что перспективные программно-насыщенные и роботизированные комплексы требуют новых подходов к построению адаптивных приводов и систем управления.

Одним из перспективных направлений является создание механических адаптивных приводов, способных автоматически изменять силовые и кинематические параметры без использования сложных систем управления. В данной работе исследуется компактный саморегулирующийся адаптивный привод на основе зубчатого механического преобразователя с подвижным замкнутым контуром, обеспечивающего бесступенчатую силовую адаптацию.

©К.С. Иванов, Ж.А. Каренеева, Э.М. Мажиева, 2026

Методы исследования

В качестве объекта исследования рассматривается компактный саморегулирующийся адаптивный привод, включающий двигатель и механический преобразователь адаптивного типа, функционирующий без системы управления. Для практического применения в робототехнике и аэрокосмической технике такой преобразователь должен обладать конструктивной простотой, компактностью и высокой надёжностью.

В автомобильной технике аналогичные функции выполняют бесступенчатые трансмиссии (CVT), обеспечивающие плавное изменение передаточного отношения в зависимости от нагрузки [3]. Однако использование гидротрансформаторов, коробок передач и систем управления делает такие решения сложными и малопригодными для компактных электромеханических систем.

Ранее предпринимались попытки создания адаптивных механических преобразователей на основе дифференциальных зубчатого механизмов с двумя степенями свободы [4-6]. Однако существующие аналитические подходы не позволяли полностью описать взаимосвязь силовых и кинематических параметров системы.

В настоящей работе используется предложенный автором метод анализа, основанный на принципе виртуальных работ с интерпретацией виртуальных перемещений как реальных [7-11]. Показано, что наличие подвижного замкнутого контура и дополнительной силовой связи обеспечивает возможность бесступенчатой силовой адаптации при малых потерях мощности.

Результаты исследований

В качестве механического преобразователя может быть применён адаптивный зубчатый вариатор [10]. Он представляет собой зубчатый механизм с двумя степенями свободы и постоянным зацеплением, в котором изменение момента сопротивления на выходном валу приводит к автоматическому изменению передаточного отношения в заданных пределах.

Кинематическая схема вариатора (рис. 1а) включает рейку 0, входное водило, подвижный замкнутый контур (состоящий из колес 1-2-3-6-5-4) и выходное водило. Внутри этого контура находится неподвижная часть, включающая сателлит 2, блок солнечных шестерен 1-4, блок кольцевых шестерен 3-6 и сателлит 5. Входное H_1 и выходное H_2 водила являются основными элементами, которым задаются угловые скорости ω_{H1} и ω_{H2} и моменты сил M_{H1} и M_{H2}. $M_{H1} = const$. Значение M_{H2} может изменяться в пределах заданного диапазона.

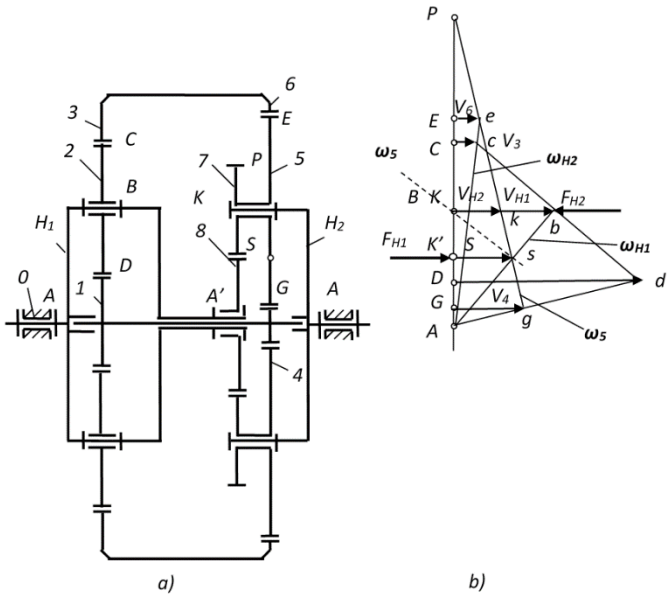


Рисунок 1 – Механизм с двумя степенями свободы и план его линейных скоростей

Имеют место линейные силовые и кинематические параметры:

$F_{H1} = M_{H1} / r_{H1}, \quad F_{H2} = M_{H2} / r_{H2}, \quad V_B = \omega_{H1} r_{H1}, \quad V_K = \omega_{H2} r_{H2}$

Здесь $r_{H1}, \quad r_{H2}$ – радиусы точек $B, \quad K$ приложения сил .

Анализ проводится для режима установившегося движения, при котором механизм функционирует равномерно, а работа движущих сил за каждый цикл уравновешивается работой сил сопротивления. Переход к неустановившемуся режиму происходит при изменении момента сопротивления.

Рассматриваемая схема двухподвижного механизма с подвижным замкнутым контуром позволяет построить план линейных скоростей на основе заданных скоростей двух ведущих звеньев и определить условия равновесия. Следует отметить, что для механизма, не содержащего замкнутого контура, выполнение равновесия при таких условиях невозможно.

Справа от схемы механизма представлен план линейных скоростей (рис. 1б).

Далее рассмотрим теоретические зависимости, описывающие взаимосвязь параметров системы.

Теоретическая реализуемость принудительной адаптации обоснована автором на основе теоремы о замкнутой цепи [9], выведенной из анализа взаимодействия параметров механической системы.

Для изучения систем с двумя степенями свободы традиционно применяется принцип виртуальных перемещений [3] с использованием дифференциальных уравнений движения. Однако для рассматриваемой схемы механизма в установившемся режиме данный подход оказывается неприменим.

В этих условиях исследование целесообразно проводить на основе уравнений равновесия. Силовой анализ механической системы с двумя степенями свободы при стационарном движении сводится к решению прямой задачи динамики — определению действующих сил по заданному закону движения.

Предполагается, что при равномерной работе системы, реализованной в виде зубчатого механизма, все её звенья движутся с постоянными скоростями, вследствие чего инерционные силы можно не учитывать.

Уточнённая формулировка теоремы о принудительной адаптации заключается в следующем.

Рассматривается двухподвижная кинематическая цепь с заданными кинематическими и силовыми параметрами (рис. 1). Требуется обосновать, что наличие подвижного замкнутого контура в такой системе с одним входным и одним выходным звеном обеспечивает возможность принудительной адаптации сил.

Предполагается, что система содержит два начальных звена, выполняющих функцию входных. При этом рассматриваются только реальные перемещения (скорости), соответствующие заданным скоростям этих звеньев, на основе которых строится план линейных скоростей (рис. 1б).

Наличие подвижного замкнутого контура обеспечивает перераспределение и передачу всех активных сил на сателлит 5 (рис. 2).

Сила $F_{H1} = M_{H1} / r_{H1}$, действующая в точке B, передаётся звену 5 от ведущего H_1 элемента к сателлиту 2 через блоки колёс 3-6 и 1-4 в виде $R_{65} = 0.5 F_{H1} r_3 / r_6$ и $R_{45} = 0.5 F_{H1} r_1 / r_4$ реакций. Приведённая к звену 5 входная сила равна сумме этих реакций [3] $F'_{H1} = 0.5 F_{H1} (r_3 r_4 + r_1 r_6) / r_4 r_6$.

Здесь r_i — радиус колеса i.

Положение точки B' приложения приведённой силы F'_{H1} определяется по формуле $KB' = r_5 (r_1 - r_4) / r_4$. Приведение силы к звену 5 соответствует условию равенства мощности источника и мощности этих сил $F_{H1} V_{H1} = F'_{H1} V'_{H1}$.

Сила F_{H2} приложена в точке K .

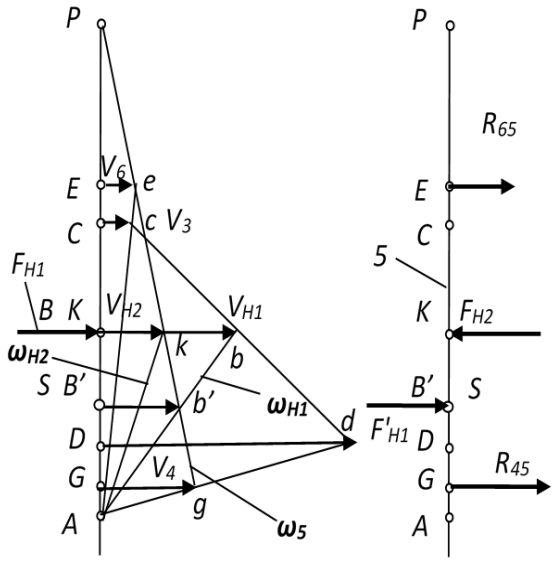


Рисунок 2 – Схема линейных скоростей и сателлит 5 с приложенными силами

Рассмотрим равновесие звена 5. Сумма моментов относительно мгновенного центра скоростей звена равна нулю.

$$\sum M_P = 0 \tag{1}$$

Или

$$F_1 \cdot (PK + KS) - R_6 \cdot PK = 0 \tag{2}$$

Здесь $KS = e$. Отсюда положение центра P мгновенной скорости (расстояние PK) может быть определено по заданным силам.

$$PK = F_1 e / (R_6 - F_1) \tag{3}$$

Принимая во внимание движение звена 5 вокруг точки P с угловой скоростью ω_5 , можно использовать подстановки в уравнение (2)

$PK + KB' = V'_B / \omega_5 \quad PK = V_K / \omega_5$. Тогда уравнение (2) примет вид

$F'_{H1} \cdot V'_B - F_{H2} \cdot V_K = 0$. Или $F_{H1} \cdot V_B - F_{H2} \cdot V_K = 0$.

Принимая это во внимание $V_B = \omega_{H1} r_{H1}, \quad V_K = \omega_{H2} r_{H2}$, получаем уравнение равновесия всего механизма согласно принципу возможных работ (мощностей) – сумма входных и выходных мощностей равна нулю.

$$M_{H1} \cdot \omega_{H1} - M_{H2} \cdot \omega_{H2} = 0 \tag{4}$$

При этом формула (4) также соответствует принципу виртуальных работ (или мощностей), но с ключевым отличием — здесь используются реальные перемещения вместо виртуальных.

Из уравнения (4) можно вывести выражение для адаптации сил

$$\omega_{H2} = M_{H1} \cdot \omega_{H1} / M_{H2} \tag{5}$$

При заданной постоянной входной мощности выходная угловая скорость автоматически подстраивается под изменяющийся тормозной момент на выходном звене.

Таким образом, наличие подвижного замкнутого контура в двухподвижной кинематической цепи с одним входом и одним выходом обеспечивает возможность силовой адаптации, что и требовалось доказать.

Уравнение (4) задаёт необходимое условие реализации силовой адаптации.

Равновесие звена 5 и всей системы соответствует принципу виртуальных работ (или мощностей) с учётом реальных перемещений. При этом допустимое движение рассматривается как одно из виртуальных.

Можно утверждать, что уравнение равновесия (4) обеспечивает определённость движения системы в рамках принципа виртуальных действий. Однако для равновесия звена 5 недостаточно учитывать только условие (1), согласно которому сумма моментов равна

нулю. В общем случае $F_{H2} > F_{H1}$, когда, в центре мгновенных скоростей P возникает сила $R_{05} = F_{H2} - F_{H1}$ – условная (фактически несуществующая) реакция со стороны рейки. Эта сила не учитывается в условии равновесия по принципу виртуальных работ (формула (4)), поскольку скорость точки её приложения равна нулю.

В данном случае условие (4) не может рассматриваться как необходимое и достаточное для обеспечения равновесия.

Сила определяется из второго условия равновесия звена 5 — сумма сил равна нулю $\sum F = 0$.

$$R_{05} = F_{H2} - F_{H1} \tag{6}$$

Определённость движения двухподвижной системы может быть достигнута заменой момента M_{05} этой несбалансированной силы R_{05} относительно точки K, неподвижной в начале, моментом трения M_{fK} в сателлитном шарнире K [6].

Момент трения, заменяющий (уравновешивающий) $M_{fK} = M_{05} = R_{05} \cdot PK$.

Однако этот подход связан с значительными потерями на трение. Возможен более эффективный метод замещения – адаптивный привод с дополнительным ограничением.

Чтобы сформировать реальное ограничение, не изменяя число степеней свободы, необходимо установить зависимость между моментом и угловой скоростью – так называемое подвижное силоскоростное ограничение. В механике такие связи известны как дифференциальные ограничения.

В инженерной практике подобная зависимость между моментом и угловой скоростью реализуется, например, в гидротрансформаторах, где она определяется их характеристиками и возникает между подвижными звеньями.

Использование замкнутого контура открывает принципиально новый и эффективный подход к формированию такой зависимости. Этот метод основан на введении избыточной связи, выявленной при анализе плана линейных скоростей системы [9, 10].

На плане линейных скоростей (рис. 3) была определена точка на пересечении наклонных линий угловых скоростей ω_{H1} и ω_5. При условии постоянной угловой скорости ω_{H1} и переменной угловой скорости ω_5 эта точка сохраняла своё положение. Иными словами, линия ω_5 вращалась вокруг неподвижной точки s.

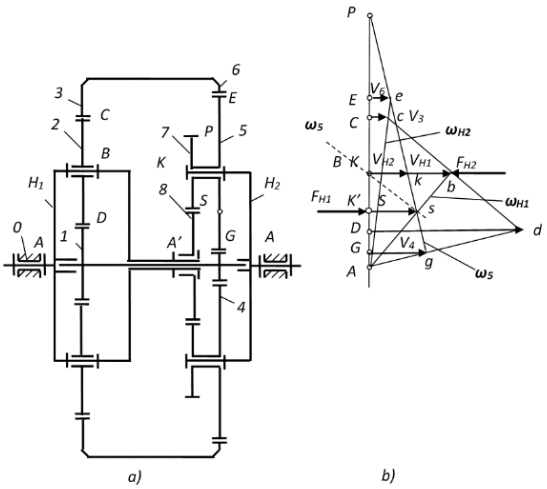


Рисунок 3 – Определяемый эффективный преобразователь

Этой точке s на плане соответствует точка S на вертикальной исходной линии скоростей точек механизма. Вектор линейной скорости Ss одинаков для точки S звена H_1 и точки S звена 5. Эта точка получила название центра совпадения скоростей звеньев.

Если в точке S ввести реальное ограничение, например, в виде точки контакта зубьев шестерён 8 и 7, жёстко соединённых со звеньями H_1 и 5, такое ограничение будет избыточным – оно лишь передаст движение от ведущего звена H_1 к звену 5 с тем же передаточным отношением, которое существует в планетарном механизме без этого ограничения. При этом, если точка S контакта зубьев данного ограничения не совпадёт с точкой S , произойдёт заклинивание: система потеряет одну степень свободы и заблокируется.

На рисунке 3 показан рассматриваемый преобразователь с подвижно-упирающейся передачей. Данная передача включает входное водило $H_1 - 5$ и упирающуюся часть 8-7-5, соединённую фрикционным элементом A'.

Для реализации эффективного реального ограничения нового типа предлагается сначала создать упирающееся (заклинивающее) соединение в точке, близкой к точке , с использованием колёс 8 и 7. При этом колесо 8 жёстко закрепляется на водиле H_1, а подвижное ограничение, например фрикционное A', вводится в шарнире, что позволяет обеспечивать небольшие относительные перемещения между разделёнными частями 8 и H_1

В таком случае звенья H_1 и 8 смогут взаимодействовать более эффективно: усилие заклинивания может быть задано произвольно, а относительная скорость между звеньями остаётся небольшой.

При использовании трения между звеньями H_1 и 8 в упирающемся (заклинивающем) ограничении, потери мощности на трение будут минимальными благодаря малой относительной скорости разделённых частей.

Взаимодействие сил показано на рис. 4.

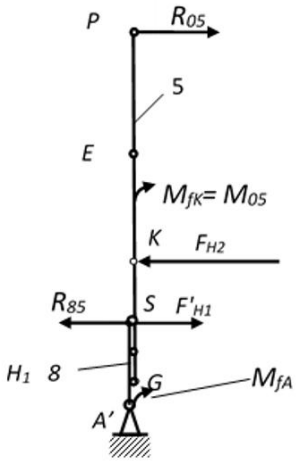


Рисунок 4 – Взаимодействие сил с учётом подвижно-упирающегося ограничения

Вместо уравновешивающего фрикционного момента сопротивления A' в шарнире предлагается использовать момент M_{fA}, который передаёт силу R_{85} на звено 5. При такой замене силы R_{05} на силу R_{85} возникает условие равновесия звена 5: $R_{85} = F'_{H1}$.

Для звена 8 или H_1 это условие принимает вид $M_{fA} = M_{H1}$, то есть уравновешивающий фрикционный момент A' в шарнире равен входному движущему моменту и остаётся постоянным по величине, не завися от изменяющегося момента сопротивления M_{H2}.

Этот неожиданный результат объясняется следующим образом. Согласно условию равновесия звена 5

$$F'_{H1} \cdot KS = R_{05} \cdot PK \qquad (7)$$

В этом уравнении левая часть является величиной постоянной. Правая часть, включающая переменную выходную силу F_{H2} (согласно формуле $R_{05} = F'_{H1} - F_{H2}$), также остаётся постоянной по величине, поскольку $F'_{H1} \cdot KS = const$. Это объясняется тем, что параметр PK , определяющий положение полюса P и зависящий от силы сопротивления по формуле (3), также изменяется. Данное свойство является важной особенностью преобразователя. Таким образом, замещающий момент на звене 5 также сохраняет постоянное значение $M_{05} = F'_{H1} \cdot KS$.

Равновесие звена 5 и всей системы достигается при условии замены реакции R_{05} на звене 5 силой R_{85} , которая создаёт эквивалентное сопротивление с добавочным моментом на входном водиле.

$$M'_{H1/} = R_{85} \cdot AS' = M_{H1} \tag{8}$$

В итоге входной ведущий элемент передаёт на сателлит 5 M_{H1}как крутящий момент через планетарную цепь, так и момент M'_{H1}, направленный на преодоление трения, через прямую передачу 8-7.

Применение подвижного упора с уравновешивающим моментом трения в шарнире (рис. 3) позволяет обеспечить широкий диапазон регулирования при малой относительной скорости звеньев.

Линия угловой скорости ω_5 может изменять своё положение под действием силы сопротивления F_{H2}: от положения $\omega_{H2} = 0$, обозначенного пунктиром, до такого, при котором пунктирная линия $\omega_{H2} = \omega_{H1}$ совпадает с основной линией ω_{H1} .

Таким образом, диапазон передаточных чисел преобразователя $u_{H1-H2} = \omega_{H1} / \omega_{H2}$ будет находиться в пределах $1 \le u_{H1-H2} \le \infty$.

Коэффициент полезного действия системы. Взаимосвязь её параметров можно определить на основе закона сохранения энергии (4) с учётом потерь на трение.

$$M_{H1} \cdot \omega_{H1} = M_{H2} \cdot \omega_{H2} + P_f \tag{9}$$

Здесь – M_{H1} входной движущий момент, преодолевающий выходной момент сопротивления M_{H2} и момент трения M_{fA} в подвижно-упирающемся ограничении, P_f – мощность потерь на трение в подвижно-упирающемся ограничении (в шарнире A').

$$P_f = M_{H1} \Delta\omega_f \tag{10}$$

Здесь $\Delta\omega_f = \omega_{H1} - \omega_8$ — разность угловых скоростей входного водила и колеса 8. Величина может быть задана путём соответствующего расположения полюса зацепления колёс 8 и 7 в точке S', близкой к центру совпадения скоростей S (рис. 3).

Можно задать её равной $\Delta\omega_f = k\omega_{H1}$. Например, $k = 0.1$. Тогда $P_f = kM_{H1}\omega_{H1}$ Коэффициент полезного действия определяется следующим образом.:

$$\eta = (M_{H1}\omega_{H1} - P_f) / M_{H1}\omega_{H1} \tag{11}$$

После подстановки значения $P_f = kM_{H1}\omega_{H1}$ получаем: $\eta = 1 - k$.

Здесь k – коэффициент потерь.

Например, при $k = 0.1$ получаем $\eta = 0.9$.

Заключение. Саморегулируемый адаптивный электропривод, включающий электродвигатель и механический адаптивный преобразователь без применения системы управления, представляет собой высокоэффективную электромеханическую систему.

Исключение управляющих устройств существенно упрощает конструкцию привода и повышает его надёжность. Предложенные и запатентованные технические решения, основанные на использовании дополнительной силовой связи и подвижно-упирающегося

ограничения, обеспечивают автоматическое изменение силовых и кинематических параметров системы в зависимости от нагрузки.

Функционирование преобразователя базируется на статическом взаимодействии параметров, что упрощает анализ взаимосвязей по сравнению с динамическими методами исследования. Дополнительная зависимость между моментом и угловой скоростью переводит систему в состояние с одной степенью свободы при сохранении возможности изменения выходных характеристик.

Преобразователь характеризуется широким диапазоном передаточных чисел и высоким коэффициентом полезного действия. Существенной особенностью является постоянство эквивалентного момента трения на пятом звене независимо от изменения нагрузки. Благодаря малым относительным скоростям взаимодействующих звеньев потери мощности на трение остаются незначительными.

Конструктивная простота, компактность и малый вес обеспечивают перспективность применения такого преобразователя в робототехнике, аэрокосмической технике и мобильных транспортных системах.

Список литературы

1. Weyns D. Введение в саморегулирующиеся системы: современный взгляд на разработку программного обеспечения / D. Weyns. – Hoboken: Wiley-IEEE, 2020. – 288 с.
2. Bollinger J.G. Продвинутые приводы и управление робототехникой / J.G. Bollinger // CIRP Annals. – 2020. – Т. 34, № 2. – С. 565-575.
3. Левицкий Н.И. Теория механизмов и машин / Н.И. Левицкий. – М.: Наука, 1979. – 576 с.
4. Crockett S.J. Бесступенчатая, самонастраивающаяся трансмиссия. Пат. США № 4932928, МПК F16H 47/08. – 1990. – 9 с.
5. Harries J. Система передачи мощности, включающая два комплекта планетарных передач. Пат. Великобритании GB 2238090 A. – 1991. – 11 с.
6. Веденев С.А. Автоматический зубчатый вариатор для изменения передаточного числа без разъединения зубчатых колес и без устройств управления или с ними. Европейская заявка EP 2348231 A1. – Опубл. 27.07.2011. – Бюл. 2011/30. – Приоритет 11.09.2008 RU 2008136621. – 28 с.
7. Иванов К.С. Устройство для автоматического и непрерывного изменения крутящего момента и частоты вращения выходного вала в зависимости от сопротивления движению. Свидетельство о регистрации полезной модели № 20 2012 101 273.1. – Федеративная Республика Германия. – Опубл. 02.05.2012.
8. Иванов К.С., Ярославцева Е.К. Трансмиссия и устройство для изменения крутящего момента и выходной частоты вращения в зависимости от сопротивления движению. Публикация № WO 2018/134664. Международная заявка № PCT/IB2018/000007. – Опубл. 26.07.2018.
9. Getriebe und Einrichtung zur Drehmoment- und Abtriebsdrehzahländerung je nach Widerstand. Свидетельство о регистрации полезной модели № 21 2018 000 129. – Федеративная Республика Германия. – Опубл. 21.08.2019. – URL: http://depatisnet.dpma.de
10. Иванов К.С. Теоретические основы создания зубчатого вариатора / К.С. Иванов // Труды EUCOMES 2018. – 2018. – С. 244-255.
11. Иванов К.С. Перспективы создания механизмов с двумя степенями свободы / К.С. Иванов // IFToMM World Congress on Mechanism and Machine Science. Advances in Mechanism and Machine Science. – Springer Nature Switzerland AG, 2019.
12. Иванов К.С. Способ автоматического и непрерывного изменения крутящего момента и скорости вращения выходного вала в зависимости от сопротивления движению. Патент № 34402. – РГП «Национальный институт интеллектуальной собственности» МЮ РК. – Бюл. № 24, 19.06.2020. – 6 с.

References

1. Weyns D. Weyns, D. Introduction to Self-Adaptive Systems: A Contemporary Perspective on Software Engineering. / D. Weyns. – Hoboken: Wiley-IEEE, 2020. – 288 s. (In English).
2. Bollinger J.G. Advanced drives and control in robotics / J.G. Bollinger // CIRP Annals. – 2020. – T. 34, № 2. – S. 565-575. (In English).

3. Levitskii N.I. Teoriya mekhanizmov i mashin / N.I. Levitskii. – M.: Nauka, 1979. – 576 s. (In Russian).
4. Crockett S.J. Continuously variable self-adjusting transmission. Pat. SSHA № 4932928, MPK F16H 47/08. – 1990. – 9 s. (In English).
5. Harries J. Power transmission system including two sets of planetary gears. Pat. Velikobritanii GB 2238090 A. – 1991. – 11 s. (In English).
6. Vedenev S.A. Avtomaticheskii zubchatyi variator dlya izmeneniya peredatochnogo chisla bez raz"edineniya zubchatykh koles i bez ustroistv upravleniya ili s nimi. Evropeiskaya zayavka EP 2348231 A1. – Opubl. 27.07.2011. – Byul. 2011/30. – Prioritet 11.09.2008 RU 2008136621. – 28 s. (In Russian).
7. Ivanov K.S. Ustroistvo dlya avtomaticheskogo i nepreryvnogo izmeneniya krutyashchego momenta i chastoty vrashcheniya vykhodnogo vala v zavisimosti ot soprotivleniya dvizheniyu. Svidetel'stvo o registratsii poleznoi modeli № 20 2012 101 273.1. – Federativnaya Respublika Germaniya. – Opubl. 02.05.2012. (In Russian).
8. Ivanov K.S., Yaroslavtseva E.K. Transmissiya i ustroistvo dlya izmeneniya krutyashchego momenta i vykhodnoi chastoty vrashcheniya v zavisimosti ot soprotivleniya dvizheniyu. Publikatsiya № WO 2018/134664. Mezhdunarodnaya zayavka № PCT/IB2018/000007. – Opubl. 26.07.2018. (In Russian).
9. Getriebe und Einrichtung zur Drehmoment- und Abtriebsdrehzahländerung je nach Widerstand. Svidetel'stvo o registratsii poleznoi modeli № 21 2018 000 129. – Federativnaya Respublika Germaniya. – Opubl. 21.08.2019. – URL: http://depatisnet.dpma.de (In English).
10. Ivanov K.S. Teoreticheskie osnovy sozdaniya zubchatogo variatora / K.S. Ivanov // Trudy EUCOMES 2018. – 2018. – S. 244-255. (In Russian).
11. Ivanov K.S. Perspektivy sozdaniya mekhanizmov s dvumya stepenyami svobody / K.S. Ivanov // IFToMM World Congress on Mechanism and Machine Science. Advances in Mechanism and Machine Science. – Springer Nature Switzerland AG, 2019. (In Russian).
12. Ivanov K.S. Sposob avtomaticheskogo i nepreryvnogo izmeneniya krutyashchego momenta i skorosti vrashcheniya vykhodnogo vala v zavisimosti ot soprotivleniya dvizheniyu. Patent № 34402. – RGP «Natsional'nyi institut intellektual'noi sobstvennosti» MYu RK. – Byul. № 24, 19.06.2020. – 6 s. (In Russian).

К.С. Иванов[1], Ж.А. Каренеева[2*], Э.М. Мажиева[2]
[1]Академик У.А. Жолдасбеков атындағы Механика және машина жасау институты,
050010, Қазақстан Республикасы, Алматы қаласы, Шевченко көшесі, 29/133-2
[2]Халықаралық инженерлік-технологиялық университеті,
050060, Қазақстан Республикасы, Алматы қаласы, әл-Фараби даңғылы, 93Г/5
[*]e-mail: lashyn7979@mail.ru

МАНИПУЛЯТОРДЫҢ ТИІМДІ АДАПТИВТІ МЕХАНИКАЛЫҚ ЖЕТЕГІ

Қазіргі уақытта өзін-өзі баптайтын жүйелер робототехникада, автономды көлікте және аэроғарыш саласында кеңінен қолданыс табуда. Д. Вейнс бағдарламалық тұрғыдан күрделі жүйелердегі өзіндік бейімделудің негізгі қағидаларын, инженерлік тәсілдерін және қолданылу аймақтарын қарастырып, оның болашақ технологиялық міндеттерді шешудегі маңызының артып келе жатқанын атап өтеді.

Дж. Боллингер өнеркәсіпте де, ғылыми-зерттеу қондырғыларында да қолданылатын автоматтандырылған жетектер мен басқару жүйелеріне шолу жасайды. Көпкоординатты роботталған жүйелер басқару үдерістері теориялық шектеулермен қатар жүретін күрделі техникалық нысандар ретінде сипатталады.

Өзіндік бейімделу мүмкіндіктерін кеңейту сыртқы жүктеменің өзгерістеріне энергия параметрлерін реттеусіз-ақ жауап бере алатын адаптивті механикалық жетектерді енгізу арқылы жүзеге асырылуы мүмкін. Мұндай жағдайда басқару негізінен жеке жетектік элементтердің жұмысын үйлестіруге келіп тіреледі.

Осы зерттеу аясында басқару жүйесін қолданбай жұмыс істейтін, қозғалтқыш пен адаптивті механикалық түрлендіргіштен тұратын ықшам өзін-өзі реттейтін адаптивті жетек қарастырылады.

Жұмыста басқару жүйесінсіз кең ауқымда реттеуді қамтамасыз ететін адаптивті механикалық түрлендіргіші бар ықшам сатылы емес жетекті әзірлеудің теориялық негіздері талданады.

Түйін сөздер: *адаптивті жетек, адаптивті механикалық түрлендіргіш, екі еркіндік дәрежесі, қосымша байланыс, орныққан қозғалыс, қозғалыстың анықтылығы.*

K.S. Ivanov[1], Zh. A. Kareneeva[2*], E. M. Mazhieva[2]

[1]Institute of Mechanics and Machine Science named after Academician U.A. Zholdasbekov,
29/133-2 Shevchenko Street, Almaty, 050010, Republic of Kazakhstan
[2]International Engineering Technological University,
93G/5 Al-Farabi Avenue, Almaty, 050060, Republic of Kazakhstan

EFFECTIVE ADAPTIVE MECHANICAL DRIVE OF A MANIPULATOR

At present, self-adjusting systems are widely used in robotics, autonomous transport, and the aerospace industry. D. Wayns examines the key principles, engineering approaches, and application areas of self-adaptation in software-intensive systems, emphasizing its growing importance in addressing the challenges of emerging technologies.

J. Bollinger provides an overview of automated drives and control systems used both in industry and in research facilities. It is noted that multi-coordinate robotic systems are complex technical objects for which control processes may be accompanied by fundamental theoretical limitations.

The expansion of self-adaptation capabilities can be achieved through the implementation of adaptive mechanical drives capable of independently responding to changes in external load without the need to regulate energy parameters. In this case, control is largely reduced to coordinating the operation of individual drive elements.

This study considers a compact self-regulating adaptive drive consisting of a motor and an adaptive mechanical converter operating without a control system.

The paper examines the theoretical principles for developing a compact continuously variable drive with an adaptive mechanical converter that provides regulation over a wide range without the use of a control system.

Key words: *adaptive drive, adaptive mechanical converter, two degrees of freedom, additional coupling, steady-state motion, determinacy of motion.*

Сведения об авторах

Константин Самсонович Иванов – доктор технических наук, профессор, Институт механики машиноведения им. академика У.А. Джолдасбекова, Республика Казахстан; e-mail: ivanovgreek@mail.ru,. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3750-8081.

Жазира Алпысбаевна Каренеева* – магистр технических наук кафедры «Техника и технология пищевых производств»; Международный инженерно-технологический университет, Республика Казахстан; e-mail: lashyn7979@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7197-5380.

Эльба Мырзахметовна Мажиева – магистр технических наук кафедры «Техника и технология пищевых производств», Международный инженерно-технологический университет, Республика Казахстан; e-mail: e.majieva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4845-3581.

Авторлар туралы мәліметтер

Константин Самсонович Иванов – техникалық ғылымдарының докторы, профессор, У.А. Джолдасбеков атындағы Машинажүйелер механикасы институты, Қазақстан Республикасы; e-mail: ivanovgreek@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3750-8081.

Жазира Алпысбаевна Каренеева* – техникалық ғылымдарының магистрі, «Тағам өндірісінің техникасы және технологиясы» кафедрасы; Халықаралық инженерлік-технологиялық университет, Қазақстан Республикасы; e-mail: lashyn7979@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7197-5380.

Эльба Мырзахметовна Мажиева – техникалық ғылымдарының магистрі, «Тағам өндірісінің техникасы және технологиясы» кафедрасы, Халықаралық инженерлік-технологиялық университет, Қазақстан Республикасы; e-mail: e.majieva@mail.ru. ORCID:https://orcid.org/0000-0002-4845-3581

Information about the authors

Konstantin Samsonovich Ivanov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Institute of Machine Mechanics named after Academician U.A. Zholdasbekov, Republic of Kazakhstan; e-mail: ivanovgreek@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3750-8081.

Zhazira Alpysbaevna Kareneeva* – Master of Technical Sciences, Department of «Technique and Technology of Food Production», International Engineering Technological University, Republic of Kazakhstan; e-mail: lashyn7979@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7197-5380.

Elba Myrzakhmetovna Mazhiyeva – Master of Technical Sciences, Department of «Technique and Technology of Food Production», International Engineering Technological University, Republic of Kazakhstan; e-mail: e.majieva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4845-3581.

Поступила в редакцию 20.04.2026
Поступила после доработки 13.05.2026
Принята к публикации 14.05.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-23

МРНТИ: 50.43.15

А.Б. Абдыхамидова*, Е.Ж. Сарсикеев[1], П.Ш. Мәди[1], Ә.Ж. Қалиқан[1], О.В. Гальцева[2]
[1]Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина,
010011, Республика Казахстан, г. Астана, пр. Женис, 62,
[2]Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634034, Российская Федерация, г.Томск, пр.Ленина,30.
*e-mail:abdykhamidovaa@gmail.com

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ IOT-МОНИТОРИНГА В ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ОТРАСЛИ

Аннотация: *В настоящей работе приводятся результаты сравнительного анализа архитектуры системы IoT-мониторинга в горнодобывающей отрасли. Анализируется внедрение технологий интернета вещей в целях повышения эффективности мониторинга и управления в промышленной среде. Акцентируется внимание на выполнение функции по обеспечению безопасных условий труда, повышению производительности и экологической устойчивости, а также соблюдению нормативных требований. Кроме того, в данной статье изучается текущее состояние информационных технологий в горнодобывающей промышленности с акцентом на риски и последствия, вызванные устаревшим оборудованием, ненадежным программным обеспечением, степенью цифровизации. В этом исследовании обсуждается интеграция технологий IoT в существующие информационные системы горнодобывающей отрасли, усиливая их уровень безопасности, эффективности и устойчивости. Научная новизна исследования заключается в создании феноменологической модели архитектуры IoT системы, подходящей для широкого спектра операций в горнодобывающей промышленности. В работе при анализе детально рассматриваются оптимизация процессов, функционирование распределенных сенсорных систем, осуществляющих сбор критически важных данных, их обратботку и анализ в режиме реального времени. На основе полученной информации формируются обоснованные решения для внедрения интеллектуальных систем мониторинга и управления, ориентированных на функционирования устойчивого процесса.*

Ключевые слова: *машинное зрение, системы мониторинга, раннее предупреждение, моделирование, методы прогнозирования, карьеры.*

Введение

В настоящее время в горнодобывающей промышленности особое внимание уделяется безопасности. Этому есть множество причин и факторов. К ним относятся

– жизнь и здоровье рабочих на горнодобывающем предприятии;

– экономические аспекты, такие как временные остановки работы, простои, износ оборудования, поломки техники и транспорта;

– экологические факторы.

В научной отрасли представлен значительный массив работ, посвящённых решению ряда актуальных задач. К ним можно отнести:

1. разработка систем мониторинга и контроля,
2. моделирование процессов и проведение испытаний,..
3. создание методов оценки и прогнозирования состояния,
4. внедрение IoT-систем.

©А.Б. Абдыхамидова, Е.Ж. Сарсикеев, П.Ш. Мәди, Ә.Ж. Қалиқан, О.В. Гальцева, 2026

Традиционными системами мониторинга, которые используются до сегодняшнего дня, являются приборы Minimate Pro, Micromate, которые соответствуют требованиям нормативных документов и демонстрируют высокую надежность и стабильность работы. Однако, они имеют ряд недостатков, такие как, невозможность работать в режиме реального времени, не интегрируются с IoT, облаком, Machine Learning-анализом, а также сбор данных осуществляется вручную, что требует физическое присутствие устройства. На рисунке 1 показана концептуальная схема применения промышленного интернета вещей для обеспечения безопасности и мониторинга в горнодобывающей отрасли.



Рисунок 1 – Концептуальная схема применения IoT

Основными проблемами являются отсутствие надежных систем, которые предоставляют точные прогнозы в режиме реального времени, а также отсутствие методик с интеграциями операционной системы мониторинга для безопасности горных работ. Исследование состоит из нескольких новых областей, которые требуют детального рассмотрения и практических испытаний.

В работе [1] рассматривается возможности IoT-систем и обсуждаются некоторые преимущества использования технологии в горнодобывающей промышленности. Датчики IoT используют радиочастотное определение местоположения, радар и технологии глобальной системы позиционирования, чтобы определить местонахождение техники или транспортных средств с целью предотвращения несчастных случаев в шахтах. Основной проблемой подобных комплексов является интеграция технологий IoT с существующими системами и обеспечение совместимости между различными устройствами и платформами. Для полноценного функционирования требуются значительные инвестиции в обновление устаревших систем и обеспечение взаимодействия между компонентами системы без отрицательного влияния друг на друга.

Целью работы [2] является создание беспроводной IoT-системы мониторинга сейсмических колебаний грунта в режиме реального времени при взрывных работах на карьерах. В качестве решаемых задач ставятся непредсказуемые вибрации от взрывов, а также обеспечение нормативных требований и снижение рисков аварийных ситуаций. В качестве результата предлагается модель RF, которая наиболее точно прогнозирует уровень вибраций и интегрируется с системой IoT-мониторинга, а также комплексная сеть для минимизации рисков аварийных ситуаций, в конечном итоге, что позволяет выполнять требования нормативных документов безопасности и повышать общую устойчивость операций.

В работе [3] предлагается система на базе интернета вещей, использующая датчики для обнаружения концентрации газов, определения температуры воздуха и влажности в подземных шахтах. Для оценки состояния шахтёров во время работы в подземных шахтах контролируется концентрация токсичных и горючих газов, что является важной задачей обеспечения безопасности подземных работ. Разработанная система мониторинга состоит из четырех блоков, а именно: блока измерения параметров, блока анализа данных, блока передачи информации и блока автоматического управления. В исследовании в качестве микроконтроллера используется элементная база Arduino UNO, которая обеспечивает

промежуточное взаимодействие между измерительными органами и устройствами передачи данных в режиме реального времени.

Для раннего выявления трещин в работе [4] предлагается мониторинговая система на базе цифрового двойника. На основе концептуальных моделей или данных геосканирования создаются визуализации физических объектов. Цифровым двойником прогнозируются производительность, оцениваются данные диспетчеризации, для этого используются информации полученные через IoT-датчики. Измерительная система с реальных открытых угольных шахт передает цифровые данные режима реального времени в виртуальную платформу через фреймворк (движения грунта, деформации, температура, итд), как показано на рисунке 2.



Рисунок 2 – Алгоритм структуры работы цифрового двойника

Методы исследования

Использованы системный и сравнительный анализ для выявления основных идей, методов и средств достижения цели с последующей группировкой по заданным критериям сравнения технологий, архитектуры, методов измерения и обработки данных [5]. В конечном итоге что позволяет определить единство и различие предлагаемых технологий, наличие проблемных вопросов и сформировать возможные пути решения.

При сравнительном анализе IoT-мониторинг систем безопасности основывается на применении комплекса общенаучных и инженерных методов исследования. Методы математического моделирования и компьютерной симуляции позволяют исследовать поведение IoT-систем. Для обобщения результатов исследований используются методы анализа и синтеза, а также индуктивно-дедуктивный подход. Основную роль играет сравнительный анализ, для оценки различных протоколов передачи данных (LoRa, ZigBee, цифровой двойник) [6], типы датчиков и архитектурные решения.

Результаты исследования

С учетом вышеизложенного, в результате анализа в таблице ниже подводятся следующие систематизированные результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Систематизированные результаты анализа системы мониторинга

Системы мониторинга	Преимущества	Недостатки
1	*2*	*3*
Zigbee	– низкое энергопотребление; – подходит для беспроводной сети; – для шахт, где невозможно тянуть кабели; – поддерживает mesh-топологию;	– дальность ограничена; – чувствительность к экранированию породами;
LoRa	– большая дальность; – подходит для распределенных датчиков; – для больших карьеров;	– низкая скорость передачи; – задержки передачи данных; – в подземных условиях сигнал может не ловить;
Xbee	– простое подключение к Arduino; – готовый модуль; – поддерживает Zigbee-mesh;	– высокая стоимость; – ограниченная дальность; – требует конфигурации;
Цифровой двойник	– можно отслеживать состояние объекта; – цифровая модель постоянно обновляется; – большие данные+анализ; – возможность прогнозировать; – поддерживает индустриальные платформы;	– пока остаются коцепцией; – нет единых стандартов; – технологии еще формируются; – мало разработанных систем мониторинга для открытых угольных карьеров; – требуются объединения датчиков, сети, моделей;

1	2	3
Arduino Uno (микроконтроллер)	– получает сигналы от датчиков; – обрабатывает аналоговые сигналы; – передает данные через Xbee, Zigbee, USB, WSN; – запускает аварийные сигналы; – рабочее напряжение 7-12В; – низкая стоимость	– слабая производительность (8-бит, 16МГц); – малый объем памяти; – отсутствие встроенных функции Wi-fi/Bluetooth; – ограничение по напряжению и току пинов; – невысокая надежность;
Raspberry Pi (мини ПК)	– высокая вычислительная мощность; – поддержка полноценной операционной системы; – встроенные Wi-fi, Bluetooth, LAN; – поддержка Python; – есть видеомодуль; – возможность работы с обалком напрямую	– не взрывозащищен; – высокое энегопотребление; – требует операционной системы; – сложность системы

Обсуждение научных результатов

Безопасность горнодобывающей промышленности требует комплексного подхода, базирующегося на принципах систематизации и непрерывности, включающего мониторинг состояния, оценку и контроль риска, разработку новых методов для выявления аварий.

Целью научных работ является создание интеллектуальной и масштабируемой модели, за счет интеграции современных технологий: IoT, обеспечивающая точность прогнозирования деформаций. Таким образом, научные и производственные работы в области создания систем мониторинга направляются на контроль динамических явлений в горных массивах, достижение высокоточных прогнозировании на основе статических данных в результате длительного мониторинга, создание новой программно-аппаратной элементной базы. Констатируются недостатки интегрированного анализа: системы мониторинга не объединяют физические и управленческие данные; фиксируется теоретический пробел: отсутствуют детальные модели, показывающие, как потеря информации ведёт к увеличению риска.

На основании сетевой модели идентифицируется ключевые факторы риска и критические пути эволюции аварии, что служит основой для управления.

Заключение

Таким образом, предлагаемая архитектура интернет вещей для системы мониторинга в открытых угольных шахтах будет представлять комплексное многоуровневое решение и включают в себя:

– уровень датчиков и устройств (датчики газа, пыли, вибраций, температуры, геолокации техники);

– уровень связи (беспроводные сети, ,mesh-сети);

– платформенный уровень (облачные или локальные серверы для хранения и обработки данны);

– прикладной уровень (интерфейсы мониторинга, аналитика, системы оповещения и поддержки принятия решений).

Феноменологическая модель архитектуры системы IoT-мониторинга состоит от 3 до 6 уровней, где каждый уровень будет отвечать за определенный аспект в цифровом формате. Уровень измерителей предполагает мониторинг массива, где каждый датчик фиксирует микросейсмическую активность, сдвижение бортов карьера или кровли выработок. Уровень связи описывает технологию сетевого взаимодействия, то есть передачу данных. Платформенный уровень обрабатывает данные с датчиков, преобразуя их в поведенческие модели. Например, виртуальный мониторинг позволяет предсказывать обрушения или аварий. Прикладной уровень визуализирует на мониторе диспетчера автоматические оповещения об аварийных ситуациях.

Внедряемые мониторинговые системы обеспечивают более раннее обнаружение угроз, высокую точность измерений и снижение затрат, формируя основу для интеллектуальных систем безопасности. Современные интеллектуальные системы безопасности должны основываться на принципе от точечных и контактных измерений к комплексным, бесконтактным и непрерывным системам. Для этого необходимо широкое

применение технологии IoT, дистанционного зондирования, геофизических методов и интегрированных сенсорных сетей для мониторинга в реальном времени деформаций, напряжений, сейсмической активности и гидрогеологических условий.

Список литературы

1. On the impact of Industrial Internet of Things (IIoT): mining sector perspectives / T. Zvarivadza et al // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. – 2024. – Vol. 38, № 10. – P. 771-809. https://doi.org/10.1080/17480930.2024.2347131.
2. Enhancing safety in surface mine blasting operations with IoT-based ground vibration monitoring and prediction system integrated with machine learning / A. Singh et al // Scientific Reports. – 2025. https://doi.org/10.1038/s41598-025-86827-w.
3. New approach for monitoring the underground coal mines atmosphere using IoT technology / A.K. Tripathi et al // Instrumentation Mesure Métrologie. – 2023. – Vol. 22, № 1. – P. 29-34. https://doi.org/10.18280/i2m.220104.
4. Yu R. Deep learning and IoT enabled digital twin framework for monitoring open-pit coal mines / R. Yu, X. Yang, K. Cheng // Frontiers in Energy Research. – 2023. – Vol. 11. – Art. № 1265111. – https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1265111
5. Monitoring, warning, and control of rockburst in deep metal mines / H. Zhou et al // Engineering. – 2017. – Vol. 3, № 4. – P. 538-545. https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.04.013.
6. Rockburst in underground excavations: A review of mechanism, classification, and prediction methods / X. Feng et al // Underground Space. – 2021. https://doi.org/10.1016/j.undsp.2021.11.008.
7. Rockburst prediction and prevention in underground space excavation / Z. Li, et al // Underground Space. – 2023. https://doi.org/10.1016/j.undsp.2023.05.009.
8. Rockburst risk control and mitigation in deep mining / Q. Zhang et al // Deep Underground Science and Engineering. – 2024. https://doi.org/10.1016/j.deepre.2024.100019.
9. Advanced risk assessment in coal mines: Integrating fuzzy logic and linguistic variables for enhanced hazard management / A. Khosravi et al // International Journal of Engineering. – 2025. – Vol. 38, № 12. https://doi.org/10.5829/ije.2025.38.12c.04.
10. Rock mass condition control by the method of predicting of water-conducting fracture zone parameters for the deposits of polymetallic ores / M. Rahimi et al // International Journal of Engineering. – 2026. – Vol. 39, № 6. https://doi.org/10.5829/ije.2026.39.06c.02.

Благодарность. *Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (AP26103403 «Разработка прототипа устройства для контроля состояния устойчивости бортов карьера на базе волоконно-оптических датчиков»)*

А.Б. Абдыхамидова[*], Е.Ж. Сарсикеев[1], П.Ш. Мәди[1], Ә.Ж. Қалиқан[1], О.В. Гальцева[2]

[1]С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті,
01001, Қазақстан Республикасы,Астана қаласы, Жеңіс 62,
[2]Томск политехникалық Ұлттық зерттеу университеті,
634034, Ресей Федерациясы, Томск қаласы, Ленин 30.
[*]e-mail:abdykhamidovaa@gmail.com

ТАУ-КЕН ӨНЕРКӘСІБІНДЕГІ IOT-МОНИТОРИНГ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫНЫҢ САЛЫСТЫРМАЛЫ ТАЛДАУЫ

Бұл мақала тау-кен өнеркәсібіндегі IoT мониторинг жүйелерінің архитектурасын салыстырмалы талдау нәтижелерін ұсынады. Бұл өнеркәсіптік ортада бақылау мен басқару тиімділігін арттыру үшін Заттар интернеті технологияларын енгізуді қарастырады. Негізгі назар қауіпсіз жұмыс жағдайларын қамтамасыз етуге, өнімділікті арттыруға, экологиялық тұрақтылықты нығайтуға және нормативтік талаптарға сәйкестікке аударылады. Сонымен қатар, мақала тау-кен өнеркәсібіндегі ақпараттық технологиялардың қазіргі жағдайын қарастырады, ескірген жабдықтар мен сенімсіз бағдарламалық қамтамасыз етудің қауіптері мен салдарына, сондай-ақ цифрландыру деңгейіне назар аударады. Бұл зерттеу тау-кен өнеркәсібіндегі қолданыстағы ақпараттық жүйелерге IoT технологияларын интеграциялауды, олардың қауіпсіздік, тиімділік және тұрақтылық деңгейлерін арттыруды қарастырады. Зерттеудің ғылыми жаңалығы

– тау-кен өнеркәсібіндегі әртүрлі операцияларға жарамды IoT жүйесінің архитектурасының феноменологиялық моделін жасау. Зерттеу нақты уақыт режимінде маңызды деректерді жинап, өңдеп, талдайтын таратылған сенсорлық жүйелердің жұмысы мен процестерді оңтайландыру бойынша егжей-тегжейлі талдауды ұсынады. Алынған ақпарат негізінде тұрақты жұмыс істеуді қамтамасыз етуге арналған интеллектуалды мониторинг және басқару жүйелерін енгізу жөніндегі негізделген шешімдер қабылданады.

Түйін сөздер: *машиналық көру, мониторинг жүйелері, ерте ескерту, модельдеу, болжау әдістері, карьерлер.*

A.B. Abdykhamidova*, Y.Zh. Sarsikeyev[1], P.Sh. Madi[1], A.Zh. Kalikhan[1], O.V. Galtseva[2]
[1]S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University,
010011, Republic of Kazakhstan, Astana, Zhenis Ave., 62,
[2]National Research Tomsk Polytechnic University,
634034, Russian Federation, Tomsk city, Lenin 30.
*e-mail: abdykhamidovaa@gmail.com

COMPARATIVE ANALYSIS OF IOT MONITORING TECHNOLOGIES IN THE MINING INDUSTRY

This paper presents the results of a comparative analysis of the architecture of IoT monitoring systems in the mining industry. It examines the implementation of Internet of Things technologies to improve the efficiency of monitoring and control in an industrial environment. The focus is on ensuring safe working conditions, increasing productivity and environmental sustainability, as well as compliance with regulatory requirements. Furthermore, this article examines the current state of information technology in the mining industry, with a focus on the risks and consequences caused by outdated equipment, unreliable software, and the degree of digitalisation. This study discusses the integration of IoT technologies into existing information systems in the mining industry, enhancing their levels of security, efficiency and sustainability. The scientific novelty of the research lies in the creation of a phenomenological model of an IoT system architecture suitable for a wide range of operations in the mining industry. The study provides a detailed analysis of process optimisation and the operation of distributed sensor systems that collect, process and analyse critical data in real time. Based on the information obtained, well-founded decisions are made regarding the implementation of intelligent monitoring and control systems designed to ensure sustainable operations.

Key words: *machine vision, monitoring systems, early warning, modeling, predictive methods, quarries.*

Сведения об авторах

Айым Бахтығалиқызы Абдыхамидова – докторант 2 курса специальности «Управление техническими системами», Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина; e-mail:abdykhamidovaa@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-3782-6668.

Ермек Жасланович Сарсикеев – PhD, ассоциированный профессор, ассоциированный профессор группы образовательных программ «Электротехника и автоматизация», Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина; e-mail: e.sarsikeev@kazatu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7209-5024.

Перизат Шаймуратқызы Мәди – PhD, и.о. ассоциированного профессора группы образовательных программ «Электротехника и автоматизация», Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина; e-mail: peri@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5930-8112.

Әділ Жандосұлы Қалиқан – студент 1 курса по специальности 6B07108 «Автоматизация и энергетическая эффективность процессов и производств», Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина; e-mail: adilespolov@gmail.com.

Ольга Валерьевна Гальцева – кандидат технических наук, доцент, отделение контроля и диагностики (ИШНКБ): доцент, Национальный исследовательский Томский политехнический университет; e-mail: tpuolga@tpu.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6919-4833.

Авторлар туралы мәліметтер

Айым Бахтығалиқызы Абдыхамидова* – «Техникалық жүйелерді басқару» мамандығының 2-курс докторанты, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті; e-mail: abdykhamidovaa@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-3782-6668.

Ермек Жасланович Сарсикеев – PhD, қауымдастырылған профессор, «Электротехника және автоматтандыру» білім беру бағдарламалары тобының қауымдастырылған профессоры, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті; e-mail: e.sarsikeev@kazatu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7209-5024.

Перизат Шаймуратқызы Мәди – PhD докторы, «Электротехника және автоматтандыру» білім беру бағдарламалары тобының қауымдастырылған профессорының м.а., С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті; e-mail: peri@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5930-8112.

Әділ Жандосұлы Қалиқан – 6B07108 «Процестер мен өндірістің автоматтандырылуы және энергия тиімділігі» мамандығы бойынша 1 курс студенті, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті; e-mail: adilespolov@gmail.com.

Ольга Валерьевна Гальцева – техникалық ғылымдар кандидаты, доцент, Бақылау және диагностика бөлімі: доцент, Томск политехникалық университеті; e-mail: tpuolga@tpu.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6919-4833.

Information about the authors

Aiym Bakhtygalikyzy Abdykhamidova* – 2nd-year PhD student in «Control of Technical Systems», S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University; e-mail: abdykhamidovaa@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-3782-6668.

Yermek Zhaslanovich Sarsikeyev – PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Educational Programs Group «Electrical Engineering and Automation», S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University; e-mail: e.sarsikeev@kazatu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7209-5024.

Perizat Shaimuratkyzy Madi – PhD, Acting Associate Professor of the Educational Programs Group «Electrical Engineering and Automation», S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University; e-mail: peri@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5930-8112.

Adil Zhandosuly Kalikhan – 1st-year student on the 6B07108 course 'Automation and Energy Efficiency of Processes and Production', S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University; e-mail: adilespolov@gmail.com.

Olga Valeryevna Galtseva – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Control and Diagnostics: Associate Professor, Tomsk Polytechnic University; e-mail: tpuolga@tpu.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6919-4833.

Поступила в редакцию 06.04.2026
Поступила после доработки 20.05.2026
Принята к публикации 25.05.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-24

IRSTI: 20.01.45

R.K. Kusainov[1], A.N. Aitkazin[2], D.B. Nurakhmetov[3], A.A. Aniyarov[3], A.K. Kenzhe[*]
[1]Shakarim University, 071404, Republic of Kazakhstan, Semey, st. Glinki, 20a
[2]College of Radio Engineering and Communications,
071401, Republic of Kazakhstan, Semey, Abay Street, 76
[3]Astana International University, 010000, Kazakhstan, Astana, Kabanbay Batyr Avenue, 8
[*]e-mail: yidgelek@gmail.com

DEVELOPMENT AND APPLICATION OF THE KEiT TRAINING STAND FOR PROGRAMMING ESP32 MICROCONTROLLERS IN PYTHON IN ENGINEERING EDUCATION

Abstract: *This paper presents a tutorial on programming the ESP32 microcontroller using MicroPython firmware and the Thonny development environment on the KEIT (Knowledge ESP32 Integration Trainer) training rig. The designed and manufactured rig, its operating principles, and a schematic diagram and printed circuit board (PCB) are provided. The MicroPython programming curriculum includes 12 lab sessions, ranging from basic GPIO control (LEDs, buttons, and buzzer) to integration with cloud services via the MQTT protocol. Sequentially completing the tasks allows students to master the fundamentals of working with digital and analog interfaces, learn to interact with sensors, displays, and actuators, and become familiar with the networking capabilities of the ESP32. Particular attention is paid to practical aspects, such as button debounce, working with interrupts, generating PWM signals, and measuring time intervals. The authors also present the specialized control software «KEIT Master Control», which complements the entire hardware and software*

©R.K. Kusainov, A.N. Aitkazin, D.B. Nurakhmetov, A.A. Aniyarov, A.K. Kenzhe, 2026

system and reinforces the theoretical foundations of microcontroller programming in MicroPython. The final lessons focus on creating a simple web server on the ESP32 and exchanging data via an MQTT broker, providing students with a basic understanding of the principles of the Internet of Things. The course concludes with mini-projects («smart room», «parking assistant», and «Wi-Fi weather station») that integrate the technologies covered and demonstrate the potential of the ESP32 for automation and smart home systems. The curriculum can be used in universities and colleges for students majoring in Information Technology, Automation, Mechatronics and Radioelectronics.

Key words: *ESP32, MicroPython, KEiT (Knowledge ESP32 Integration Trainer), Thonny IDE, Internet of Things (IoT).*

Introduction

The modern development of digital technologies and the Internet of Things (IoT) requires training specialists capable of working with microcontrollers and embedded systems. Traditionally, microcontroller programming was conducted in assembly languages or C/C++, which provided high efficiency and low-level control, but required significant knowledge of processor architecture, registers, and memory management. For beginners, this entry barrier is often too high. In recent years, many countries, including Kazakhstan, have increasingly prioritized Python in educational programs. This is due to its simplicity, readability, and widespread popularity among students and young professionals. Using MicroPython in microcontrollers, such as the ESP32, allows us to extend the familiar Python syntax to embedded systems while maintaining access to key hardware capabilities-digital pins, I²C, SPI, and UART interfaces, sensor support, and network connectivity [1, 2]. This approach has the following key advantages:

– lower entry barrier: students don't need in-depth knowledge of microcontroller architecture or low-level programming languages to begin controlling devices;

– a unified educational ecosystem: Python is used in data analysis, machine learning, and automation. The ability to control the system with MicroPython makes it possible to apply acquired knowledge to digital electronics.

Thus, using Python and MicroPython to teach microcontrollers in the classroom allows for a more accessible and modern educational process [3-5]. This helps prepare specialists prepared to work with smart home, IoT, and digital automation technologies, and increases the attractiveness of engineering and IT fields among students.

Materials and methods

Hardware architecture of the KEIT training system. The ESP32 microcontroller was selected as the computing core of the KEIT training system due to its comprehensive technical and functional characteristics. This microcontroller is equipped with integrated Wi-Fi and Bluetooth wireless modules, allowing it to be used for studying network technologies and IoT systems without the need for external communication modules. Furthermore, the ESP32 boasts a high clock rate and sufficient RAM and flash memory, enabling the implementation of both simple training examples and more complex applied tasks. A significant factor in this choice was official support for MicroPython firmware, enabling the use of the high-level Python programming language when working with the microcontroller's hardware [6]. The widespread use and availability of the ESP32 make it a suitable solution for widespread use in educational institutions.

The KEIT training system's hardware is complemented by a set of peripheral modules that support laboratory and practical exercises of varying complexity. The setup includes a 2004-format liquid crystal display connected via an I²C interface and designed to display text and service information. A DHT11 temperature and humidity sensor [7, 8] is used to study the principles of operating environmental sensors. The setup also incorporates actuators such as LEDs, a buzzer, and controlled loads, enabling the development of digital output control methods and pulse-width modulation (PWM) signal generation. Standard UART and I²C interfaces enable the study of data exchange protocols and the organization of microcontroller interaction with external devices, including a personal computer. Figure 1 shows the setup's printed circuit board.

When designing the setup, special attention was paid to the power supply system and protection of its components. The design and circuitry are aimed at reducing the risk of component damage due to improper connections or errors during laboratory work. This ensures safe operation of the setup in classrooms and allows it to be used for teaching students of various skill levels, including beginners.

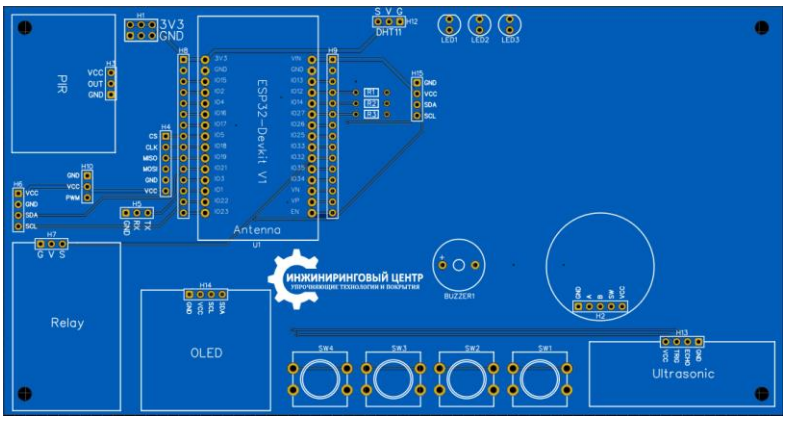


Figure 1 – Layout of the printed circuit board of the training stand

Microcontroller Software Implementation. The KEIT training rig's software implementation is based on MicroPython firmware, an interpreted runtime environment for microcontrollers. MicroPython was chosen due to its ability to quickly load and modify program code without the need for time-consuming compilation and reflashing of the device, significantly accelerating the training and debugging process. Sample programs for the rig provide programmatic access to all the main hardware resources of the ESP32 microcontroller, including digital and analog inputs and outputs, pulse-width modulation modules, timers, and hardware interrupts. The use of standard MicroPython libraries provides a unified and intuitive syntax for controlling peripheral devices, which is especially important when training students and novice developers [9]. During laboratory work, students gain practical skills in working with buttons, LEDs, actuators, and sensors, and also learn methods for contact debounce and measuring time intervals. A key feature of the setup's software implementation is support for the microcontroller's communication interfaces and network capabilities. The software supports UART and I²C interfaces, enabling data exchange with a personal computer and peripheral modules. For remote monitoring, the setup utilizes a built-in web server, displaying current device parameters and status in real time via a standard web browser. This mechanism clearly demonstrates the principles of building network applications and device interaction within the Internet of Things (IoT) concept [10, 11].

A UART interface is used to communicate between the microcontroller and the control software on the personal computer. The microcontroller's software and circuit architecture is modular, simplifying the expansion of the setup's functionality and enabling its use as a basic platform for custom and project-based tasks.

KEIT Master Control Control Software. To expand the functionality of the KEIT training system and ensure convenient user interaction with the hardware, specialized control software, KEIT Master Control (Figure 2), was developed for use on a personal computer. This software acts as a link between the ESP32 microcontroller and the user, providing data visualization, control of actuators, and monitoring of the system's operation during laboratory and practical exercises [12].

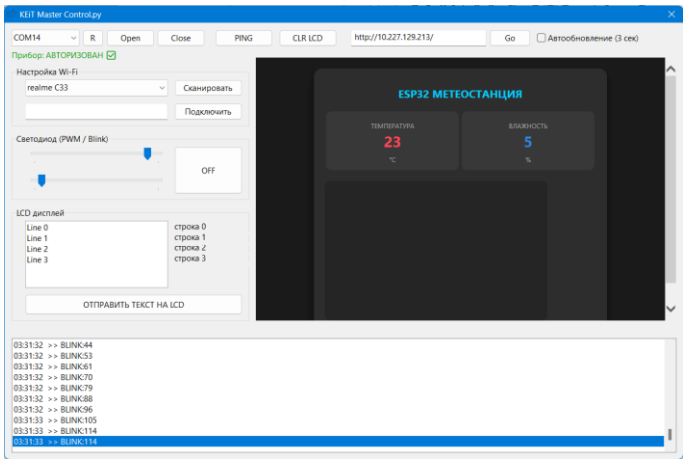


Figure 2 – The «KEIT Master Control» program window

PureBasic was chosen as the control software development environment due to its high performance, compact size, and the ability to create cross-platform desktop applications. Using PureBasic allows for the creation of executable files that are compact and require no additional libraries or dependencies, which is especially important when using software in classrooms and computer labs. Furthermore, this environment provides convenient tools for working with serial interfaces and a graphical user interface.

The KEIT Master Control software provides visual monitoring of parameters received from the microcontroller, including data from temperature and humidity sensors, as well as the status of the test bench's actuators. Through the graphical interface, the user can interactively control the device's operating modes, change pulse-width modulation parameters, turn loads on and off, and send control commands via the UART interface. This approach allows for a clear demonstration of the principles of data exchange between the system's software and hardware components.

To enhance information security and prevent the use of unauthorized equipment, the software implements a hardware identification system. Access to the test bench's control functions is based on verification of unique device data, which creates a list of authorized hardware identifiers (WhiteList). This mechanism allows the test bench to be used in training and examination modes and reduces the risk of incorrect connection of third-party devices.

An additional feature of the software is integration with the microcontroller's web interfaces. The KEIT Master Control software includes a built-in browser that displays graphs and data generated by the ESP32's built-in web server. This allows for the unification of local control and network monitoring within a single software environment, helping students develop a holistic understanding of the interaction between desktop and embedded applications.

These features demonstrate that the KEIT Master Control software complements the KEIT hardware and software, enhances the clarity of the learning process, and expands the range of educational tasks, including the study of data exchange protocols, human-machine interface principles, and the fundamentals of information security in automation systems.

Methodological Value and Application Scenarios. The KEIT training rig offers high methodological value and focuses on a practice-oriented approach to teaching microcontroller and embedded systems programming. The rig's architecture and the MicroPython software platform allow for a step-by-step learning process, starting with basic digital input and output control operations and gradually moving on to more complex tasks related to data processing, networking, and integration into IoT systems.

The KEIT training course includes a series of lab exercises covering key aspects of microcontroller systems. Initially, students learn to control LEDs, buttons, and a buzzer, as well as the principles of timers and pulse-width modulation. Subsequent stages focus on working with sensors, signal processing, and displaying information on an LCD display, which develops students' understanding of the interaction between software code and physical processes [13-15].

The networking capabilities of the ESP32 microcontroller play a key role in the learning process. Using built-in wireless modules, students can explore issues of scanning Wi-Fi networks, establishing network connections, and transmitting data via various protocols. Implementing an embedded web server and messaging via an MQTT broker clearly demonstrates the principles of building distributed systems and provides students with a basic understanding of the Internet of Things [16-18]. Using scanning Wi-Fi networks as an example, we will explain the process as follows.

```
import network
import binascii
# Инициализация Wi-Fi интерфейса в режиме станции (клиента)
wlan = network.WLAN(network.STA_IF)
wlan.active(True)
print("Сканирование доступных сетей...")
# Выполнение сканирования
# Возвращает список кортежей: (ssid, bssid, channel, RSSI, authmode, hidden)
networks = wlan.scan()
print(f"Найдено сетей: {len(networks)}\n")
print(f"{'SSID':<25} {'BSSID':<20} {'Канал':<10} {'RSSI':<10}")
print("-" * 65)
for net in networks:
```

```
    ssid = net[0].decode('utf-8') if net[0] else "Hidden SSID"
    bssid = binascii.hexlify(net[1]).decode()
    channel = net[2]
    rssi = net[3]
    print(f"{ssid:<25} {bssid:<20} {channel:<10} {rssi:<10}")
```

MicroPython uses the basic network module to work with wireless interfaces. The process of obtaining a list of available access points can be divided into three key stages: initialization, activation, and data processing. When preparing a network interface, the ESP32 microcontroller can operate in several modes. In this case, Station mode (STA_IF) is used for scanning, in which the device acts as a client.

```
wlan = network.WLAN(network.STA_IF) # Создание объекта интерфейса
wlan.active(True)                   # Программное включение радиомодуля
```

Activating the module (active(True)) supplies power to the Wi-Fi chip. It's important to remember that an enabled radio module significantly increases the device's power consumption, which is critical when developing standalone IoT sensors.

The wlan.scan() method causes the controller to sequentially switch between radio channels and listen for beacon frames from access points. The function returns a list of tuples. Each tuple contains technical information about the detected network. Particular attention should be paid to the RSSI (Received Signal Strength Indicator) parameter during training-this value is measured in decibel-milliwatts (dBm). Data received from the module is received in raw form (bytes), which requires conversion for display to the user. The data is listed in Table 1.

Table 1 – Data received from the module

Parameter	Description	Data Type in MicroPython
SSID	Access point name	bytes (requires decode())
Channel	Radio channel	($1-13$)int
RSSI	Signal strength	int (negative number)
Authmode	Security protocol	int (constant 0-5)
BSSID	Physical address (MAC) of the access point	Converted to hexadecimal for readability

The final stage of training consists of mini-projects focused on integrating previously learned technologies and programming methods. By completing projects such as a «smart room», «parking assistant», or «Wi-Fi weather station», students consolidate their skills with hardware interfaces, network protocols, and user interfaces, and gain experience designing complete application systems. Compared to traditional Arduino-compatible platforms, the KEIT platform facilitates faster learning through the use of the Python language and a unified educational ecosystem. This lowers the entry barrier to the subject, increases student motivation, and fosters sustainable practical competencies in demand in the modern fields of automation, digital electronics, and the IoT.

Conclusion. The KEIT training system's methodological value lies in its practice-oriented approach, allowing students to progress from basic I/O port control to the creation of complex distributed systems. Using MicroPython in combination with the ESP32 architecture significantly lowers the learning curve, allowing students to focus on algorithmic logic and interface principles rather than low-level compilation complexities.

Key educational outcomes of the program:

– Mastering hardware interfaces: Students gain solid skills in working with digital and analog signals, PWM, interrupts, and communication protocols (I2C, UART).

– Learning networking technologies and IoT: Using the integrated Wi-Fi module, students practice working with a wireless network:

1. Initialization: Activating the radio module in client mode (STA_IF).

2. Scanning: Analyzing the airwaves and obtaining access point parameters, including signal strength (RSSI, measured in dBmd).

3. Interaction: Implementing web servers and exchanging data via the MQTT protocol.

– System Integration: Final mini-projects, such as «Smart Room», «Parking Assistant», and «Wi-Fi Weather Station», allow students to combine disparate knowledge into a single application system.

The KEIT booth is a ready-made educational ecosystem that provides a faster learning curve than traditional Arduino platforms. This helps students develop relevant competencies in automation, digital electronics, and the Internet of Things, which are in demand in today's labor market.

References

1. Bell C. MicroPython for the Internet of Things. Apress: New York, NY, USA. – 2017.
2. Gololobov V.N. Where do robots begin? About the Arduino project for schoolchildren (and more) [S chego nachinayutsya roboty? O proekte Arduino dlya shkol'nikov (i ne tol'ko)]. BHV-Petersburg. – 2013.
3. An IoT-Based Solution for Monitoring a Fleet of Educational Buildings Focusing on Energy Efficiency / D. Amaxilatis et al // Sensors. – 2017. – № 17(10). – P. 2296. https://doi.org/10.3390/s17102296.
4. Programming of ATmega8 microcontrollers in C language: Methodological manual [C tilinde ATmega8 mikrokontrollerlerin bagdarlamalaý: Ádistemelik qural] / R.K. Kusainov et al // Shakarim University. – 2021.
5. Sánchez-Gómez J.S., & Cajiao M.C.R. Design of a Python programming course by big ideas with a STEM approach. https://doi.org/10.18687/LACCEI2024.1.1.361.
6. Espressif Systems. 2024. ESP32 technical reference manual (Version 5.2). www.espressif.com.
7. Oner V.O. 2021. Developing IoT Projects with ESP32: Automate your home or business with inexpensive Wi-Fi devices. Packt Publishing Ltd.
8. IEEE 802 LAN/MAN Standards Committee. 2009. IEEE Standard for Information technology-Telecommunication and information exchange between systems-Local and metropolitan area networks-Specific requirements Part11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment1: Radio Resource Measurement of Wireless LANs. http://standards. ieee. org/getieee802/download/802.11 n-2009. pdf .
9. MicroPython Group. 2024. MicroPython documentation: Quick reference for the ESP32. docs.micropython.org
10. Ionescu V.M. Investigating the performance of MicroPython and C on ESP32 and STM32 microcontrollers / V.M. Ionescu, F.M. Enescu // In 2020 IEEE 26th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME). – 2020. – P. 234-237. https://doi.org/10.1109/SIITME50350.2020.9292199.
11. Thonny IDE Development Team. 2024. Thonny: Python IDE for beginners (Version 4.1). thonny.org
12. PureBasic Support. 2023. PureBasic language reference. www.purebasic.com
13. Somantri Y. Low Cost, Advanced, Integrated Microcontroller Training Kit. / Y. Somantri, I. Fushshilat // In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 180, № 1. – P. 012107. IOP Publishing. https://doi.org/10.1088/1757-899X/180/1/012107.
14. Habibi M.W. Impact of Training Kit-Based Internet of Things to Learn Microcontroller Viewed in Cognitive Domain / M.W. Habibi, I.G.P.A. Buditjahjanto // TEM Journal. – 2024. – № 13(2). – P. 1157.
15. Development of a Microcontroller Training Kit to Increase Student Learning Motivation / F. Eliza et al // Engineering, Technology & Applied Science Research. – 2025. – № 15(3). – P. 22319-22326. https://doi.org/10.48084/etasr.10142.
16. MicroPython PyBoard for IoT / J.S. Parab et al // In Python Programming Recipes for IoT Applications. – 2023. – P. 89-122. Singapore: Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-9466-1_4.
17. Standard O.A.S.I.S. 2019. MQTT Version 5.0. Retrieved June, 22(2020), 1435.
18. Ni Z. A sensing system based on public cloud to monitor indoor environment of historic buildings / Z. Ni, Y. Liu, M. Karlsson, S. Gong // Sensors. – 2021. – № 21(16). – P. 5266. https://doi.org/10.3390/s21165266.

Р.К. Кусаинов[1], А.Н. Айтқазин[2], Д.Б.Нұрахметов[3], А.А. Анияров[3], А.К. Кенже[1]*
[1]Шәкәрім Университеті,
071404, Қазақстан Республикасы, Семей қаласы, Глинка көшесі, 20а
[2]Радиотехника және байланыс колледжі,
071401, Қазақстан Республикасы, Семей қаласы, Абай көшесі, 76
[3]Халықаралық Астана университеті,
010000, Қазақстан, Астана қ., Қабанбай батыр даңғылы, 8
*e-mail: yidgelek@gmail.com

ИНЖЕНЕРЛІК БІЛІМ БЕРУДЕ PYTHON ТІЛІНДЕ ESP32 МИКРОКОНТРОЛЛЕРЛЕРІН БАҒДАРЛАМАЛАУҒА АРНАЛҒАН KEIT ОҚУ-ЖАТТЫҒУ СТЕНДІН ӘЗІРЛЕУ ЖӘНЕ ҚОЛДАНУ

Жұмыста KEIT (Knowledge ESP32 Integration Trainer) оқу-жаттығу стендінде MICROPYTHON микробағдарламасын және Thonny әзірлеу ортасын пайдалана отырып, ESP32 микроконтроллерін бағдарламалауды оқыту процесі ұсынылған. Әзірленген және өндірілген стенд пен жұмыс принципі толықтай сипатталған және электр схемасы мен платасы берілген. MicroPython бағдарламалауды оқыту жоспары негізгі GPIO басқарудан (жарықдиодты шамдар, түймелер, буззер) бастап MQTT протоколы арқылы бұлттық қызметтерге біріктіруге дейінгі 12 зертханалық сабақты қамтиды. Тапсырмаларды дәйекті орындау студенттерге сандық және аналогтық интерфейстермен жұмыс істеу негіздерін меңгеруге, сенсорлармен, дисплейлермен және атқарушы құрылғылармен өзара әрекеттесуді үйренуге және ESP32 желілік мүмкіндіктерімен танысуға мүмкіндік береді. Практикалық аспектілерге ерекше назар аударылады: түймелерді бұруға қарсы, үзілістермен жұмыс, PWM сигналдарын генерациялау, уақыт аралықтарын өлшеу. Сондай-ақ, авторлар әзірлеген «KEIT master Control» арнайы басқару бағдарламалық жасақтамасы ұсынылған, ол бүкіл аппараттық-бағдарламалық кешеннің қосымша буыны болып табылады және MicroPython-да микроконтроллерді бағдарламалау негіздерінің теориялық дамуын бекітеді. Аяқталатын сабақтар ESP32-де қарапайым веб-сервер құруға және MQTT брокері арқылы мәліметтер алмасуға арналған, бұл студенттерде заттар интернетінің принциптері туралы негізгі түсінікті қалыптастырады. Ұсынылған курс үйренген технологияларды біріктіретін және автоматтандыру жүйелері мен смарт үй үшін ESP32 қолдану мүмкіндіктерін көрсететін шағын жобалармен («ақылды бөлме», «тұрақ көмекшісі», «Wi-Fi метеостанциясы») аяқталады. Оқу жоспарын жоғары оқу орындары мен колледждерде «Ақпараттық технологиялар», «Автоматтандыру», «Мехатроника» және «Радиоэлектроника» бағыттарындағы студенттерді оқыту кезінде пайдалануға болады.

Түйін сөздер: *ESP32, MicroPython, KEIT (knowledge ESP32 integration Trainer), Thonny ide, Заттар интернеті (IoT).*

Р.К. Кусаинов[1], А.Н. Айтқазин[2], Д.Б.Нұрахметов[3], А.А. Анияров[3], А.К. Кенже[1]*
[1]Шәкәрім университет,
071404, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20а
[2]Колледж радиотехники и связи,
071401, Республика Казахстан,г. Семей, ул. Абая, 76
[3]Международный университет Астаны,
010000, Казахстан, г. Астана, проспект Кабанбай Батыра, 8
*e-mail: yidgelek@gmail.com

РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ УЧЕБНО-ТРЕНИРОВОЧНОГО СТЕНДА KEiT ДЛЯ ПРОГРАММИРОВАНИЯ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ ESP32 НА ЯЗЫКЕ PYTHON В ИНЖЕНЕРНОМ ОБРАЗОВАНИИ

В работе представлен процесс обучения программированию микроконтроллера ESP32 с использованием прошивки MicroPython и среды разработки Thonny на учебно-тренировочном стенде KEIT (Knowledge ESP32 Integration Trainer). Подробно описан разработанный и изготовленный стенд и принцип работы и приведены принципиальная электрическая схема и печатная плата. План обучения по программированию в MicroPython включает 12 лабораторных занятий, начиная с базового управления GPIO (светодиоды, кнопки, буззер) и заканчивая интеграцией в облачные сервисы по протоколу MQTT. Последовательное выполнение заданий позволяет студентам освоить основы работы с цифровыми и аналоговыми интерфейсами, научиться взаимодействовать с датчиками, дисплеями и исполнительными устройствами, а также познакомиться с сетевыми возможностями ESP32. Особое внимание уделено практическим аспектам: антидребезг кнопок, работа с прерываниями, генерация ШИМ-сигналов, измерение временных интервалов. Также представлена разработанная авторами специальное управляющее

программное обеспечение «KEIT Master Control», которое является дополняющим звеном всего аппаратно-программного комплекса и закрепляющий теоретическое освоение основ программирования микроконтроллера в MicroPython. Завершающие занятия посвящены созданию простого веб-сервера на ESP32 и обмену данными через MQTT-брокер, что формирует у студентов базовое понимание принципов Интернета вещей. Предложенный курс завершается мини-проектами («умная комната», «парковочный помощник», «Wi-Fi метеостанция»), которые интегрируют изученные технологии и демонстрируют возможности применения ESP32 для систем автоматизации и умного дома. Учебный план может использоваться в вузах и колледжах при обучении студентов направлений «Информационные технологии», «Автоматизация», «Мехатроника» и «Радиоэлектроника».

Ключевые слова: *ESP32, MicroPython, KEIT (Knowledge ESP32 Integration Trainer), Thonny IDE, Интернет вещей (IoT).*

Information about authors

Rinat Kenzheevich Kusainov – Master of Technical Sciences, Head of the Engineering Center, Shakarim University, Semey, Kazakhstan; e-mail: rinat.kus@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5166-4761.

Ayan Nurtaevich Aitkazin – student, College of Radio Engineering and Communications, Semey, Kazakhstan; e-mail: ayan_aitkazin@mail.ru.

Daulet Bagdatovich Nurakhmetov – PhD, Associate Professor, Astana International University, Astana, Kazakhstan; e-mail: nurakhmetov@math.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2358-9092.

Almir Askarovich Aniyarov – candidate of physical and mathematical sciences, associate professor, Astana International University, Astana, Kazakhstan; e-mail: almir.aniyarov@aiu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4786-1556.

Aruzhan Kenzhekyzy Kenzhe* – student of group DYa-2502, Shakarim University, Semey, Kazakhstan; e-mail: yidgelek@gmail.com.

Авторлар туралы мәлімет

Ринат Кенжеевич Кусаинов – физика магистрі, инжинирингтік нентра басшысы, Шәкәрім университеті, Қазақстан; e-mail: rinat.kus@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5166-4761.

Аян Нұртайұлы Айтқазин – студент, Радиотехника және байланыс колледжі, Қазақстан; e-mail: ayan_aitkazin@mail.ru.

Дәулет Бағдатұлы Нұрахметов – философия докторы (PhD), қауымдастырылған профессор, Астана халықаралық университеті, Астана қ., Қазақстан; e-mail: nurakhmetov@math.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2358-9092.

Альмир Аскарович Анияров – физика-математика ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, Астана халықаралық университеті, Қазақстан; e-mail: almir.aniyarov@aiu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4786-1556.

Аружан Кенжекызы Кенже* – ДЯ-2502 студенттік тобы, Шәкәрім университеті, Қазақстан; e-mail: yidgelek@gmail.com.

Информация об авторах

Ринат Кенжеевич Кусаинов – магистр физики, руководитель Инжинирингового Центра, Шәкәрім университет, г. Семей, Казахстан; e-mail: rinat.kus@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5166-4761.

Аян Нуртаевич Айтқазин – студент, Колледж радиотехники и связи, г. Семей, Казахстан; e-mail: ayan_aitkazin@mail.ru.

Даулет Багдатович Нұрахметов – доктор философии (PhD), ассоциированный профессор, Международный университет Астана, Казахстан; e-mail: nurakhmetov@math.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2358-9092.

Альмир Аскарович Анияров – кандидат физико-математических наук, ассоциированный профессор, Международный университет Астана, Казахстан; e-mail: almir.aniyarov@aiu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4786-1556.

Аружан Кенжекызы Кенже* – студент группы ДЯ-2502, Шәкәрім университет, г. Семей, Казахстан; e-mail: yidgelek@gmail.com.

Received 12.04.2026
Revised 25.05.2026
Accepted 29.05.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-25

МРНТИ: 65.09.05

BY 4.0

Check for updates

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: gbulasheva@mail.ru

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГОЛОЗЕРНОГО ОВСА, ЯЧМЕНЯ, ТРИТИКАЛЕ И ЗЕЛЁНОЙ ГРЕЧИХИ В ПРОИЗВОДСТВЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПРОДУКТОВ ПИТАНИЯ

Аннотация: *Проведенные исследования направлены на изучение химического состава и физических свойств зерна нетрадиционных культур, таких как овес голозерный, тритикале, ячмень голозерный и гречиха зеленая. Несмотря на ограниченное использование изучаемых культур в пищевой промышленности, их зерно обладает значительным потенциалом благодаря высокому содержанию белков, флавоноидов, витаминов, пищевых волокон, антиоксидантов и фенольных кислот, которые обладают полезными свойствами. В результате проведенных исследований было установлено, что наибольшее количество белка содержится в зерне овса голозерного (16,17%), тогда как наименьшее содержание жира было обнаружено в зерне гречихи зеленой (1,54%). Анализ углеводов показал, что самое высокое содержание углеводов в гречихе зеленой. Содержание минералов, оцениваемое через зольность, варьируется от 0,16% в гречихе зеленой до 1,22% в ячмене голозерной. Наибольшее содержание сырой клетчатки наблюдается в гречихе зеленой (3,52%). Также был проведен анализ аминокислотного состава зерна, где овес выделяется высоким содержанием фенилаланина, а ячмень – валина. Результаты исследования подчеркивают важность этих нетрадиционных зерновых культур для пищевой промышленности, поскольку они могут быть использованы как ценные источники белков, аминокислот и пищевых волокон, а также для создания функциональных продуктов с улучшенными питательными свойствами.*

Ключевые слова: *тритикале, ячмень голозерный, овес голозерный, гречиха зеленая, физико-химические показатели, аминокислотный состав.*

Введение

В научной литературе активизировались дискуссии о диетической ценности и терапевтическом потенциале для здоровья человека продуктов из зерна нетрадиционных культур [1]. Имеются научные сведения о функциональном и лечебно-профилактическом влиянии продуктов на основе зерна тритикале, овса голозерного, ячменя голозерного и др. на развитие таких заболеваний, как ишемическая болезнь сердца [2, 3] высокий уровень холестерина в сыворотке крови, ожирение, диабет [4], а также некоторые виды рака [5]. Однако, в связи с ограниченностью производства этих новых зерновых культур, они недостаточно изучены.

Зерно тритикале помогает контролировать диабет, улучшает пищеварение, улучшает кровообращение, увеличивает выработку клеток и стимулирует рост костей [6]. Тритикале является хорошим источником белка наравне с пшеницей и другими злаками, также содержащими высокое содержание лизина. Некоторые исследователи разработали методы, позволяющие изготавливать изделия из муки тритикале без добавления пшеничной муки. В Австралии и Соединенных Штатах мука из зерна тритикале широко используется для приготовления хлеба, кексов, тортов, печенья и других хлебобулочных изделий [7]. Несмотря на все это, зерна тритикале выращиваются и потребляются гораздо реже, чем другие зерновые культуры, что может быть объяснено отсутствием более подробной информации об их питательной ценности.

©С.Г. Каманова, Г.Д. Акшораева, Б. Калемшарив, Г.Х. Оспанкулова, 2026

Тритикале, овес, ячмень и гречиха содержат фенолы и пищевые волокна (растворимые и нерастворимые), обладающие антиоксидантной активностью (алкилрезорцины, проантоцианидин), [8], витамины, макро- и микроэлементы, и полисахариды (арабиноксиланы, фруктан, β-глюкан и целлюлоза) [9, 10] и авенантрамиды (конъюгаты фенольных аминов, относящиеся к группе вторичных метаболитов), [11] фитиновая кислота, фенольные соединения (рутин, изоориентин, кверцетин, изовитексин, витексин и ориентин) [12, 13], дубильных веществ, растительных стеринов и фагопиринов [14].

Ячмень богат (1-3) (1-4)-β-D-глюканами, которые являются одними из важнейших растворимых волокон в питании человека. Эти соединения регулируют уровень глюкозы в крови и снижают эффекты холестеринемии и артериального давления, и, следовательно, снижают риск сердечно-сосудистых заболеваний. Кроме того, они считаются антиоксидантными, антибактериальными, противоопухолевыми и противовоспалительными средствами и играют важную роль в иммуномодуляции и регуляции кишечной флоры человека [15].

Доказано, что диеты, богатые этими химическими веществами, могут обеспечить защиту от гипертонии, сердечно-сосудистых заболеваний и диабета. Ячмень признан как культура, обладающая большим потенциалом в качестве здоровой или функциональной пищи.

Таким образом, так как в Казахстане активно диверсифицируется производство яровой пшеницы, путем расширения посевов новых культур, разработка продуктов функционального назначения на их основе будет особенно актуальной.

Объекты и методы исследований

В работе было использовано зерно тритикале, ячменя голозерного, голозерного овса и гречихи зеленой, которое было предоставлено Научно-производственным центром зернового хозяйства им. А.И. Бараева.

Процентное содержание влаги было определено согласно методе AOAC, 2000 [16]. Содержание влаги определялось путем высушивания образцов в сушильном шкафу с горячим воздухом при температуре 100±5°C до постоянного веса.

Зольность определяли в соответствии с [16]. Содержание золы определяли путём взвешивания 2 г образца в фарфоровом тигле и обжига при температуре 600°C в течение 6 часов в муфельной печи (SnolTherm, UAB Plento str. 3, Narkūnai, LT-28104 Utena dis., Lithuania) до получения белой золы.

Общее содержание жира определяли согласно методу [16]. Жир определяли путём взвешивания 3 г образца, экстрагированного петролейным эфиром в аппарате SOXTHERM SOX414, Gerhardt (Германия) в течение 6 часов.

Определение массовой доли общего азота, содержащегося в пробе, определяли методом Кьельдаля [17], путём разложения 1 г анализируемой пробы серной кислотой с образованием солей аммония, превращении аммония в аммиак с помощью подщелачивания, отгонка аммиака и определение его количества титриметрическим методом.

Для определения углеводного состава 50 мг образца гидролизуют трифторуксусной кислотой (ТФК), при 120°C в течение 3 ч, фильтруют и выпаривают досуха при 65°C. Далее пробоподготовку проводили согласно методе [18] с помощью жидкостного хроматографа Agilent 1260 (США), колонка ZORBAX SB-C18 (4,6*150 мм, 5 мкм), изократическое элюирование.

Определение сырой клетчатки проводили согласно [19]. Сущность метода заключается в обработке пробы кипящей разбавленной серной кислотой.

Содержание аминокислотного состава определяли согласно методу [20] с помощью жидкостной хроматографии использованием (UPLC) (ExionLC AD, SCIEX, Darmstadt, Hessian, Germany) в сочетании с устройством для тандемной масс-спектрометрии (MS/MS, QTRAP 5500, SCIEX). Хроматографическая колонка: Waters C18 (2,1×100 мм, 1,8 мкм). Для проведения анализа брали 10 мг образца.

Все измерения проводились в трех повторностях для каждого эксперимента. Статистическая обработка полученных результатов осуществлялась с использованием программного обеспечения Origin 2021.

Результаты исследований

Настоящее исследование направлено на изучение химического состава и физико-технологических свойств нетрадиционных зерновых культур. К таким культурам относятся голозерный овёс, голозерный ячмень, тритикале и зелёная гречиха, которые пока ограниченно используются в пищевой промышленности. Вместе с тем их зерно характеризуется высоким содержанием белков, пищевых волокон, витаминов, флавоноидов, антиоксидантов, фенольных соединений и других биологически активных веществ, обладающих потенциальными профилактическими и оздоровительными свойствами. В таблице 1 представлены результаты анализа физико-химического состава исследуемых зерновых культур.

Таблица 1 – Физико-химические показатели зерна

Наименование показателей	Овес голозерный	Ячмень голозерный	Тритикале	Гречиха зеленая
Влажность %	11,83±0,153	11,50±0,153	13,06±0,180	11,7±0,152
Белок, %	16,17±0,015	11,77±0,606	14,46±0,115	8,72±0,195
Жир, %	4,31±0,101	2,42±0,058	1,92±0,03	1,54±0,056
Зольность %	0,65±0,002	1,22±0,002	0,37±0,009	0,16±0,0005
Углеводы, %	62,04±0,150	67,59±0,025	67,19±0,045	73,87±0,02
Сырая клетчатка, %	2,71±0,035	2,34±0,141	2,18±0,065	3,52±0,105

В результате проведенных исследований изучен детальный анализ физико-химического состава зерна нетрадиционных зерновых культур, таких как овес голозерный, ячмень голозерный, тритикале и гречиха зеленая, что позволило выяснить их уникальные питательные и функциональные свойства. Содержание влаги в зерне влияет на вес, внешний вид, вкус, текстуру и срок годности пищевых продуктов и имеет значение для состава других питательных веществ. Среди изучаемых культур наименьшей влажностью обладало зерно ячменя голозерного – 11,5%, наивысшей зерно тритикале 13,06%. Контроль содержания влаги в зерне имеет решающее значение в переработке пищевых продуктов для обеспечения качества и безопасности продукции.

В результате приведенных исследований установлено, что зерно овса голозерного содержит наибольшее количества белка – 16,17%. Анализ сырого жира в зерне показал, что самое высокое значение выявлено в овсе голозерном (4,31%), а самое низкое – в гречихе зеленой (1,54%). Углеводы как основные компоненты злаков, составляют более 70% от сухого веса. Общие углеводы состоят из сахаров, крахмала и гемицеллюлозы. Результаты исследований, приведенные в таблице 1 показали, что зерно гречихи зеленой содержит наибольшее количество углеводов 73,87%.

Содержание золы даёт индекс содержания минералов в пищевом материале. Из приведенных данных таблицы 1 видно, что наибольшее содержание золы содержится в зерне ячменя голозерного (1,22%), за тем следует зерно тритикале (0,37%), гречихи зеленой (0,16%), и овса голозерного (0,65%). Анализ содержания золы помогает оценить питательную ценность зерна и его потенциальный вклад в пищевую промышленность.

Содержание и состав пищевых волокон являются факторами, определяющими качество зерновых культур. Сырая клетчатка является компонентом пищевых волокон. Согласно данным таблицы 1 наибольшее содержание сырой клетчатки содержится в гречихе зеленой – 3,52%, наименьшее в зерне тритикале – 2,18 %.

Соответствующее содержание волокна в пище человека имеет важное значение, так как оно стимулирует перистальтику пищеварительного канала [21]. Аминокислоты играют важную роль в обмене веществ, многие из них являются активаторами ферментов и витаминов. Состав аминокислот влияет на качество пищи. Исследования показывают, что недостаток незаменимых аминокислот в пище может привести к нарушению обмена веществ [22]. В таблице 2 приведены данные по изучению аминокислотного состава изучаемых культур.

Таблица 2 – Аминокислотный состав зерна нетрадиционных зерновых культур, %

Наименование	Тритикале	Гречиха зеленая	Овес голозерный	Ячмень голозерный
Аргинин	0,88±0,350	1,80±0,724	0,69±0,423	1,59±0,346
Лизин	0,51±0,172	0,62±0,208	0,42±0,321	0,76±0,235
Фенилаланин	0,84±0,252	0,49±0,123	0,53±0,036	0,68±0,138
Гистидин	0,29±0,149	0,34±0,165	0,23±0,081	0,35±0,654
Лейцин+изолейцин	0,99±0,259	0,67±0,173	0,86±0,023	1,78±0,347
Метионин	0,26±0,089	0,30±0,140	0,26±0,125	0,37±0,463
Валин	0,86±0,343	0,71±0,283	0,53±0,061	0,94±0,423
Треонин	0,56±0,224	0,49±0,197	0,33±0,236	0,93±0,401
Тирозин	0,42±0,126	0,27±0,083	0,31±0,232	0,53±0,134
Серин	0,70±0,182	0,64±0,165	0,42±0,723	1,01±0,286
Аланин	0,65±0,168	0,70±0,188	0,50±0,632	0,89±0,291
Глицин	0,65±0,220	0,39±0,134	0,49±0,513	0,75±0,342

Представленная таблица содержит количественные данные об аминокислотном составе зерна изучаемых нетрадиционных зерновых культур. Для каждой из культур приведены средние значения процентного содержания как заменимых, так и незаменимых аминокислот. Анализ представленных данных позволяет проводить сравнительную оценку аминокислотного профиля изучаемых нетрадиционных зерновых культур. Выявленные различия в содержании отдельных аминокислот между культурами могут иметь важное значение для определения их потенциальной ценности и функциональных свойств. Данные о содержание таких незаменимых аминокислот как лизин, фенилаланин, лейцин+изолейцин, метионин, валин и треонин являются критически важными для оценки нутритивного качества зерна. В проводимых исследованиях наибольшее содержание фенилаланина было определено в зерне тритикале (0,84%) и аргинина в гречихе зеленой (1,80%), содержание серина в ячмене голозерном (1,01%), наибольшее содержание валина (0,94%) определено в зерне ячменя голозерного. Наименьшее содержание лизина и треонина определено в зерне овса голозерного (0,42% и 0,33% соответственно), тирозин и глицин в гречихе зеленой (0,27% и 0,39% соответственно).

Заключение

В результате проведенного исследования установлено, что зерно нетрадиционных культур (голозерный овес, голозерный ячмень, тритикале и зеленая гречиха) характеризуется высоким содержанием основных макронутриентов и биологически активных соединений, определяющих их высокую пищевую ценность. Показано, что голозерный овес отличается повышенным содержанием белка и жира, зеленая гречиха – высоким уровнем углеводов и пищевых волокон, а голозерный ячмень – значительным содержанием минеральных веществ. Анализ аминокислотного состава подтвердил наличие незаменимых аминокислот, влияющих на биологическую ценность белка, при этом тритикале характеризовалось высоким содержанием фенилаланина, гречиха – аргинина, а ячмень – серина и валина. Полученные результаты подтверждают перспективность использования исследуемых культур в качестве сырья для разработки функциональных продуктов питания, включая ферментированные системы, направленные на повышение пищевой ценности и профилактику алиментарно-зависимых заболеваний.

Список литературы

1. New approaches to increasing the nutritional value of bread products based on the use of non-traditional cereals and biologically active substances with detoxifying properties / G.K. Altynbayeva et al // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2023. – Т. 1206. – №. 1. – P. 012047.
2. Molecular mechanism of functional ingredients in barley to combat human chronic diseases / Y. Zeng et al // Oxidative medicine and cellular longevity. – 2020. – Т. 2020. – № 1. – P. 3836172.
3. Barley: a potential cereal for producing healthy and functional foods / L. Geng et al // Food Quality and Safety. – 2022. – Т. 6. – P. fyac012.
4. The metabolic effects of oats intake in patients with type 2 diabetes: A systematic review and meta-analysis / Q. Hou et al // Nutrients. – 2015. – Т. 7. – № 12. – P. 10369-10387.

5. Nutritional quality of triticale (× Triticosecale Wittm.) grown under different cropping systems / E. Straumīte et al // Proceedings of the Latvian Academy of Sciences. – De Gruyter Poland, 2017. – Т. 71. – № 6. – P. 481.
6. Cappelli A. Challenges and opportunities in wheat flour, pasta, bread, and bakery product production chains: A systematic review of innovations and improvement strategies to increase sustainability, productivity, and product quality / A. Cappelli, E. Cini // Sustainability. – 2021. – Т. 13. – № 5. – P. 2608.
7. Glycaemic profile and insulin response after consuming triticale flakes / G. Havensone et al // Proceedings of the Latvian Academy of Sciences, Section B: Natural, Exact, and Applied Sciences. – 2017.
8. Prospects for the use of a new non-traditional culture spring tritical in the precise agriculture system in the North-Kazakhstan region / A.K. Kurishbayev et al // Herald of science of S. Seifullin Kazakh agrotechnical university: Multidisciplinary. – 2020. – № 2(105).
9. Buchholz M. Thiamin (vitamin B1) and thiamin phosphate esters in five cereal grains during maturation / M. Buchholz, A.M. Drotleff, W. Ternes // Journal of Cereal Science. – 2012. – Т. 56. – № 1. – P. 109-114.
10. Kaur H. Physicochemical, functional, pasting and antioxidant properties of flours from different cereals: A comparative evaluation / H. Kaur, B.S. Gill, B.L. Karwasra // International Journal of Advanced Biotechnology and Research. – 2017. – Т. 8. – № 2. – P. 1220-1231.
11. Collins F.W. Oat phenolics: biochemistry and biological functionality. – 2011.
12. Abdel-Aal E.S.M. Differences in compositional properties of a hulless barley cultivar grown in 23 environments in eastern Canada / E.S.M. Abdel-Aal, T.M. Choo // Canadian Journal of Plant Science. – 2014. – Т. 94. – № 5. – P. 807-815.
13. Relationships between antioxidant compounds and antioxidant activities of tartary buckwheat during germination / X. Zhou et al // Journal of Food Science and Technology. – 2015. – Т. 52. – P. 2458-2463.
14. Phytochemicals and biofunctional properties of buckwheat: a review / A. Ahmed et al // The Journal of Agricultural Science. – 2014. – Т. 152. – № 3. – P. 349-369.
15. Physiological functionalities and mechanisms of β-glucans / J. Bai et al // Trends in Food Science & Technology. – 2019. – Т. 88. – P. 57-66.
16. Horwitz W., Latimer G. Association of official analytical chemists. Gaithersburg, MD, USA 2000.
17. International A. AOAC Official Method 2001.11 Protein (crude) in animal feed, forage (plant tissue), grain and oilseeds. 2009.
18. A modified GC-MS analytical procedure for separation and detection of multiple classes of carbohydrates / Y.-G. Xia et al // Molecules. – 2018. – № 23. – P. 1284.
19. GOST ISO 6865-2015 Korma dlya zhivotnykh. Metod opredeleniya soderzhaniya syroi kletchatki. – Moskva: Standartinform, 2016. – 15 s. (In Russian).
20. Determination of 16 kinds of amino acids in health foods by high performance liquid chromatography with pre-column derivatization / S.J. Sun Jian et al. – 2016.
21. Capuano E. The behavior of dietary fiber in the gastrointestinal tract determines its physiological effect / E. Capuano // Critical reviews in food science and nutrition. – 2017. – Т. 57. – № 16. – P. 3543-3564.

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

ФУНКЦИОНАЛДЫҚ ТАҒАМ ӨНІМДЕРІН ӨНДІРУДЕ ЖАЛАҢАШ ДӘНДІ СҰЛЫ, АРПА, ТРИТИКАЛЕ ЖӘНЕ ЖАСЫЛ ҚАРАҚҰМЫҚТЫ ПАЙДАЛАНУДЫҢ ПЕРСПЕКТИВАЛАРЫ

Жүргізілген зерттеу жұмыстары жалаңаш сұлы, тритикале, жалаңаш арпа және жасыл қарақұмық сияқты дәстүрлі емес дақылдардың дәндерінің химиялық құрамы мен физикалық қасиеттерін зерттеуге бағытталған. Зерттелетін дақылдардың тамақ өнеркәсібінде шектеулі қолданылуына қарамастан, олардың дәні пайдалы қасиеттері бар ақуыздардың, флавоноидтардың, витаминдердің, тағамдық талшықтардың, антиоксиданттардың және фенол қышқылдарының жоғары болуына байланысты айтарлықтай әлеуетке ие. Зерттеулер нәтижесінде ақуыздың ең көп мөлшері жалаңаш сұлы дәнінде (16,17%), ал майдың ең аз мөлшері жасыл қарақұмық дәнінде (1,54%) болатыны анықталды. Көмірсулардың талдауы жасыл қарақұмықтың құрамында көмірсулардың ең жоғары екенін көрсетті. Күлділік арқылы бағаланатын минералды құрам жасыл қарақұмықта 0,16%-дан жалаңаш арпада 1,22%-ға дейін өзгереді. Шикі талшықтың ең көп мөлшері жасыл қарақұмықта (3,52%) байқалады. Дәннің аминқышқылдық құрамына талдау да жүргізілді, мұнда сұлы фенилаланиннің жоғары құрамымен, арпа валиннің жоғары мөлшерімен ерекшеленеді. Зерттеу нәтижелері бұл дәстүрлі емес дәнді дақылдардың тамақ өнеркәсібі үшін маңыздылығын көрсетеді, өйткені олар белоктардың, аминқышқылдарының және диеталық талшықтың құнды көздері ретінде, сондай-ақ жақсартылған тағамдық қасиеттері бар функционалды тағамдарды жасау үшін пайдаланылуы мүмкін.

Түйін сөздер: *тритикале, жалаңаш арпа, жалаңаш сұлы, жасыл қарақұмық, физика-химиялық көрсеткіштері, аминқышқылдарының құрамы.*

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

PROSPECTS FOR THE USE OF NAKED OATS, BARLEY, TRITICALE, AND GREEN BUCKWHEAT IN THE PRODUCTION OF FUNCTIONAL FOOD PRODUCTS

The conducted research is aimed at studying the chemical composition and physical properties of non-traditional crops, such as naked oats, triticale, naked barley and green buckwheat. Despite the limited use of the studied crops in the food industry, their grain has significant potential due to the high content of proteins, flavonoids, vitamins, dietary fiber, antioxidants and phenolic acids, which have beneficial properties. As a result of the conducted research, it was found that the highest amount of protein is contained in naked oat grain (16.17%), while the lowest fat content was found in green buckwheat grain (1.54%). Carbohydrate analysis showed that the highest carbohydrate content is in green buckwheat. The mineral content, estimated through ash content, varies from 0.16% in buckwheat to 1.22% in barley. The highest content of crude fiber is observed in green buckwheat (3.52%). An analysis of the amino acid composition of the grain was also conducted, where oats stand out for their high content of phenylalanine, and barley for its high content of valine. The results of the study highlight the importance of these non-traditional grain crops for the food industry, as they can be used as valuable sources of proteins, amino acids and dietary fiber, as well as for the creation of functional products with improved nutritional properties.

Key words: *triticale, naked barley, naked oats, green buckwheat, physicochemical parameters, amino acid composition.*

Сведения об авторах

Светлана Георгиевна Каманова – PhD докторант института «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 института «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 института «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 30.03.2026
Поступила после доработки 16.04.2026
Принята к публикации 17.04.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-26

CC BY 4.0
Check for updates

МРНТИ 65.09.30

И.Ж. Темирова*, Г.Х. Оспанкулова, А.К. Игенбаев
Казахский агротехнический исследовательский университет им. С. Сейфуллина,
010000, Республика Казахстан, г. Астана, пр. Женіс, 62
*e-mail: indira_t85@mail.ru

ПОДБОР СТРУКТУРООБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПИЩЕВЫХ ОЛЕОГЕЛЕЙ

Аннотация: *В работе представлены результаты исследования получения пищевых олеогелей на основе пчелиного воска, моноглицерида и их бинарной смеси (50:50), используемых в качестве структурообразователей. Обоснован выбор оптимального структурообразователя на основе оценки структурно-механических (твердость, упругость) и функционально-технологических (маслосвязывающая способность) характеристиколеогелей для применения в технологии масложировых продуктов.Установлено, что все исследуемые образцы формируют самоподдерживающиеся олеогели с однородной структурой. Показано, что образцы, полученные с использованием бинарных смесей структурообразователей, характеризуются более высокими значениями твердости, упругости и маслосвязывающей способности по сравнению с однокомпонентными образцами. Это свидетельствует о более эффективном формировании пространственной гелевой сети и повышенной способности удерживать масло. Пчелиный воск способствует образованию прочной кристаллической структуры, тогда как моноглицериды обеспечивают пластичность и улучшенную способность к удержанию масла. Их совместное применение приводит к формированию структурированной гелевой системы с оптимальным сочетанием структурно-механических и функционально-технологических характеристик итакже могут свидетельствовать о наличии синергетического взаимодействия структурообразователей. Полученные результаты данного исследования подтверждают*

©И.Ж. Темирова, Г.Х. Оспанкулова, А.К. Игенбаев, 2026

целесообразность использования бинарных систем структурообразователей и их перспективность при разработке спредов и других масложировых продуктов.

Ключевые слова: *твердые жиры, растительные масла, структурообразователи, олеогели, твердость, маслосвязывающая способность, трансизомеры жирных кислот.*

Введение

Твердые и полутвердые жиры, характеризуются структурной организацией, обусловленной кристаллическими триацилглицеринами. Эти молекулы в основном состоят из насыщенных жиров (далее НЖК) и могут содержать трансизомеры жирных кислот (далее ТИЖК), что влияет на их физико-химические свойства, стабильность и питательную ценность. Однако потребление продуктов, содержащих ТИЖК, полученных промышленным путем, связано с риском развития сердечно-сосудистых заболеваний, диабета II типа и другими негативными воздействиями на здоровье [1].

Учитывая вред от употребления ТИЖК и меняющиеся предпочтения потребителей в сфере полезных продуктов, изучаются альтернативные методы частичной или полной замены ТИЖК в пищевых продуктах с целью улучшения их питательного профиля. Одной из таких технологий, вызывающий большой интерес в последнее время, является структурирование жидких растительных масел [2]. При структурировании, молекулы структурообразователя, заключают жидкие растительные масла в трехмерную сеть, с получением олеогеля со свойствами твердого или полутвердого жира [3]. При этом жирнокислотный состав растительных масел не претерпевает изменений, что подходит для здорового питания. Свойства олеогелей зависят от типа растительного масла и типа структурообразователя [4].

В настоящее время известны такие структурообразователи как воски, моноглицериды, лецитины, этилцеллюлоза, жирные кислоты, жирные спирты, фитостерины и др [5-7]. Пчелиный воск является одним из наиболее распространённых структурообразователей при получении олеогелей, что обусловлено его сложным химическим составом, включающим эфиры жирных кислот, углеводородные фракции и свободные жирные кислоты. Благодаря способности формировать плотную трёхмерную кристаллическую сеть он эффективно удерживает жидкое масло и способствует улучшению реологических и текстурных характеристик системы [8]. Олеогели, структурированные пчелиным воском, характеризуются удовлетворительной растекаемостью и находят применение в хлебопекарной и кондитерской промышленности, а также рассматриваются как функциональная альтернатива традиционным маргаринам. Дополнительно пчелиный воск повышает окислительную стабильность олеогелей, формируя физический барьер, который снижает скорость диффузии кислорода в жировую матрицу [9]. Так, исследования показали, что 10%-ная концентрация пчелиного воска в сочетании с растительными маслами приводит к образованию олеогелей с желаемыми реологическими свойствами и низким содержанием насыщенных жирных кислот, которые могут использоваться в качестве заменителей в хлебобулочных изделиях, кондитерских изделиях, молочных и мясных продуктах [10, 11]. Моноглицериды являются одними из наиболее широко изученных олеогелеобразователей благодаря их способности образовывать сеть кристаллических частиц, подобную сети твердых жиров [12]. Комбинирование различных олеогелеобразователей рассматривается как эффективный подход к формированию хорошо организованных кристаллических сетей с высокой маслосвязывающей способностью, что позволяет целенаправленно оптимизировать физико-механические свойства олеогелей и компенсировать ограничения, характерные для отдельных структурообразующих агентов [13].

В последнее время все больше внимания уделяется сочетанию олеогелеобразователей, поскольку использование одного олеогелеобразователя может быть недостаточным для оптимального сочетания характеристиктвердых жиров в сложной пищевой системе.

Целью настоящего исследования является подбор структурообразователей для получения олеогелейна основе пчелиного воска, моноглицерида и их бинарной смеси (50:50) в качестве структурообразователей и обоснование выбора оптимального структурообразователя на основе оценки структурно-механических (твердость, упругость) и функционально-технологических (маслосвязывающая способность) свойств полученных олеогелей для дальнейшего использования в технологии спредов.

Таким образом, структурирование растительных масел необходимо для пищевой промышленности, для замены и использования в качестве ингредиентов, в различных продуктах, включая маргарины, спреды, шортенинги и другие, позволяющие снизить потребление НЖК и ТИЖК, обладая при этом их технологическими функциями.

Объектыи методы исследований

Объекты исследования – олеогели.

Маслосвязывающаяспособностьопределялась по методу, описанному [14]. Перед проведением исследования пробирки с олеогелями выдерживали в течение 24 ч при комнатной температуре.В предварительно взвешенные центрифужные пробиркипомещали около 1,000±0,001 г олеогеля и взвешивали. Пробирки центрифугировали при 11000 g в течение 10 мин. Далее маслосвязывающую способность рассчитывали по стандартным формулам. Испытание проводилось в 3-х повторностях для каждого образца.

Структурно-механические свойства (твердость и упругость) олеогелей определяли с помощью анализатора текстурыStableMicroSystemsTA.XTPlusC (Суррей, Великобритания). Использовались следующие параметры:для проникновения в образцы использовался конический зонд с углом 45° со скоростью 3 мм/с и глубиной проникновения 15 мм. Испытание проводилось в 3 -х повторностях для каждого образца.

Структурирование подсолнечного масла осуществляли с использованием структурообразователей – пчелиный воск, моноглицерид и их бинарными смесями в соотношении 50:50 для формирования стабильной полутвёрдой консистенции.

Структурирование подсолнечного масла проводили в лабораторном химическом реакторе, рисунок 1, снабжённом верхнеприводной мешалкой.



Рисунок 1 – Технологический процесс структурирования подсолнечного масла различными структурообразователями

Технологический процесс получения олеогелей включал следующие стадии:

– нагрев масла: подсолнечное масло нагревали до 70 °С в лабораторном химическом реакторе до получения однородной жидкой фазы;

– введение структурообразователей: добавляли пчелиный воск (10%, образец 1), моноглицерид (10%, образец 2) или их бинарную смесь (пчелиный воск 5% + моноглицерид 5%, образец 3);

– структурирование: проводили при 75-80 °С в течение 50 мин при скорости перемешивания 150 об/мин для обеспечения равномерного распределения и полного растворения структурообразователей;

– стабилизация: олеогели охлаждали при 20-25 °С в течение 2 ч, затем хранили при 4 °С до проведения последующих анализов.

Результаты исследований

Внешний вид полученных олеогелей представлен на рисунке 2.

Все образцы успешно структурировались с образованием самоподдерживающихся твердых олеогелей. При визуальной оценке внешнего вида установлено, что олеогель на основе пчелиного воска имел слегка желтоватый оттенок, тогда как олеогель, структурированный моноглицеридами, характеризовался кремово-белой окраской. Олеогели, полученные с использованием бинарных смесей структурообразователей, имели светло-желтый оттенок. При этом все образцы отличались однородной структурой без признаков выделения свободного масла.



А Б В

А – олеогели на основе пчелиного воска; Б – олеогели на основе моноглицерида;
В -олеогели на основе бинарных смесей

Рисунок 2 – Полученные олеогели

Формирование структурно-механических свойствв значительной степени зависит от природы и концентрации применяемых структурообразователей. Так твердость и упругость олеогелей относятся к числу ключевых показателей, определяющих перспективы их использования в пищевой промышленности [15]. Под твердостью понимают способность олеогеля противостоять деформации при воздействии внешней нагрузки, тогда как упругость характеризует его способность восстанавливать первоначальную форму после снятия деформирующего усилия [16]. В технологической практике особое значение придается достижению оптимального соотношения между твердостью и упругостью, обеспечивающего формирование структурно прочных и одновременно пластичных олеогелевых систем.

Показатели твердости и упругости полученных олеогелей представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Структурно-механические свойстваолеогелей

Образец олеогеля	Твердость, Н	Упругость
10% Пчелиный воск	2,73±0,02	1,22±0,08
10% Моноглицерид	0,83±0,07	0,62±0,02
Пчелиный воск 5% и моноглицерид 5%	3,25±0,04	2,05±0,06

Данные, представленные в таблице 1, свидетельствуют о различиях в структурно-механических свойствах олеогелей, полученных с использованием пчелиного воска, моноглицерида и их бинарной смеси. Олеогель на основе моноглицерида характеризовался наименьшей твердостью – 0,83 Н и упругостью – 0,62. У олеогеля, структурированного пчелиным воском, показатели твердости и упругости составили 2,73 Н и 1,22 соответственно. Наибольшее значение этих параметров было установлено у образца олеогеля на основе бинарной смеси – 3,25 Н и 2,05 соответственно. Полученный диапазон значений подтверждает влияние типа гелеобразователя на структурно-механические свойства олеогелей. Так, в ранее проведённом исследовании [17] также наблюдалось увеличение структурно-механических характеристик при совместном использовании воска и моноглицерида, что может свидетельствовать о синергетическом взаимодействии структурообразователей. Таким образом, совместное использование пчелиного воска и моноглицеридов позволяет эффективно регулировать текстурные свойства олеогелей, так пчелиный воск обеспечивает формирование более прочной и жёсткой структуры, тогда как моноглицериды – большую пластичность. Их комбинирование позволяет получить олеогели с более сбалансированными структурно-механическими характеристиками.

Маслосвязывающая способность является важным показателем, характеризующим способность гелевой структуры удерживать жидкое масло. Более высокие значения данного показателя свидетельствуют о большей стабильности системы и повышают её технологическую пригодность при транспортировке и использовании в пищевой промышленности.

В таблице 2 приведены значения маслосвязывающей способности олеогелей с различными структурообразователями.

Таблица 2 – Маслосвязывающая способность структурообразователей

Образец олеогеля	Маслосвязывающая способность, %
Пчелиный воск (10 %)	96,56±0,56
Моноглицерид (10 %)	97,85±0,72
Пчелиный воск 5 % + моноглицерид 5 %	98,25±0,89

Данные, представленные в таблице 2, свидетельствуют о высокой маслосвязывающей способности всех исследованных образцов олеогелей. Наименьшее значение этого показателя было зафиксировано у олеогеля, структурированного пчелиным воском, и составило 96,56%. Олеогель на основе моноглицерида характеризовался маслосвязывающей способностью 97,85%, а бинарная смесь продемонстрировала наивысшее значение – 98,25%. Полученные результаты указывают на то, что все исследованные структурообразователи обеспечивают эффективную иммобилизацию жидкой масляной фазы, формируя стабильную гелевую сетку.

При этом несколько более высокие значения маслосвязывающей способности в образцах на основе бинарной смеси согласуются с данными ранее проведённого исследования [18], в котором показано, что минимальное отслаивание масла наблюдалось при смешивании канделильского воска и моноглицерида, а более твёрдая текстура олеогеля способствовала предотвращению выделения масла. Выбор смеси пчелиного воска и моноглицеридов в соотношении 50:50 обусловлен необходимостью достижения баланса между структурной прочностью и пластичностью олеогеля.

Заключение

Проведённые исследования подтвердили возможность использования пчелиного воска, моноглицерида и их бинарных смесей в выбранных соотношениях для получения пищевых олеогелей с заданными технологическими свойствами. Установлено, что все исследованные структурообразователи обеспечивают формирование самоподдерживающейся гелевой структуры. Образцы, полученные с использованием бинарных смесей, характеризуются более высокими значениями твердости, упругости и маслосвязывающей способности по сравнению с однокомпонентными образцами. Это свидетельствует о более эффективном формировании пространственной гелевой сети и повышенной способности удерживать жидкое масло. Пчелиный воск способствует формированию прочной кристаллической структуры, тогда как моноглицериды обеспечивают пластичность и улучшенное удержание масла. Совместное применение пчелиного воска и моноглицеридаприводит к формированию структурированной гелевой системы с оптимальным сочетанием структурно-механических и функционально-технологических характеристик. Полученные олеогели могут рассматриваться как перспективная альтернатива традиционным твёрдым жирам и применяться при разработке масложировых продуктов, такие как спреды и маргарины.

Список литературы

1. Prospective association between trans fatty acid intake and depressive symptoms: Results from the study of women's health across the nation / D. Li et al // Journal of Affective Disorders. – 2020. – Т. 264. P. 256-262.
2. Doan C.D. Internal and external factors affecting the crystallization, gelation and applicability of wax-based oleogels in food industry / C.D. Doan, I. Tavernier, P.K. Okuro // Innovative Food Science & Emerging Technologies. – 2018. – Т. 45. – P. 42-52.
3. Jaberi R. Rheological and structural properties of oleogel base on soluble complex of egg white protein and xanthan gum / R. Jaberi, A. Pedram Nia, S. NajiTabasi // Journal of Texture Studies. – 2020. – Т. 51. – № 6. – P. 925-936.
4. Oleogels, a promising structured oil for decreasing saturated fatty acid concentrations: Production and food-based applications / H. Pehlivanoğlu et al // Critical reviews in food science and nutrition. – 2018. – Т. 58. – № 8. – P. 1330-1341.
5. Li L. Cornoil-based oleogels with different gelation mechanisms as novel cocoa butter alternatives in dark chocolate / L. Li, G. Liu //Journal of Food Engineering. – 2019. – № 263. – P. 114-122. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.06.001.

6. Kaushik I. Organogelation: It'sfoodapplication / I. Kaushik // MOJ Food Processing & Technology. – 2017. – № 4(2). – P. 66-72. https://doi.org/10.15406/mojfpt.2017.04.00089.
7. Tailoring properties of mixed-component oleogels: wax and monoglyceride interactions towards flaxseed oil structuring / N.G. Barroso et al // Gels. – 2020. – № 6(1). – P. 5. https://doi.org/10.3390/gels6010005.).
8. Structure and thermal properties of beeswax-based oleogels with different types of vegetable oil / M. Pang et al // Grasas y Aceites. – 2020. – № 71. – P. e380-e380. https://doi.org/10.3989/gya.0806192.
9. Wang H. Effects of cocoa butter triacylglycerides and minor compounds on oil migration / H. Wang, F. Maleky // Food Research International. – 2018. – № 106. – P. 213-224. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.12.057.
10. Zameniteli zhira na osnove oleogeleobrazovaniya pchelinogo voska/shellakovogo voska i poleznykh rastitel'nykh masel / Eh. Morales i dr. // LWT-Food Sci. Technol. – 2023. – № 185. – R. 115144. (In Russian).
11. Vliyanie pchelinogo voska i kombinatsii ego fraktsii na okislitel'nuyu stabil'nost' oleogelei / R. Sobolev i dr. // Pishchevaya bionauka. – 2022. – № 48. – R. 101744. (In Russian).
12. Palla C.A. An overview of structure engineering to tailor the functionality of monoglyceride oleogels / C.A. Palla, M. Dominguez, M.E. Carrín // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. – 2022. – № 21(3). – P. 2587-2614. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12930.
13. Tailoring properties of mixed-component oleogels: wax and monoglyceride interactions towards flaxseed oil structuring / N.G. Barroso et al // Gels. – 2020. – № 6(1). – P. 5. https://doi.org/10.3390/gels6010005.).
14. Yilmaz E. Properties and stability of hazelnut oil organogels with beeswax and monoglyceride / E. Yilmaz, M. Ögütcü // J. Am. Oil Chem. Soc. Wiley Online Library. –2014. – Vol. 91, № 6. – P. 1007-1017.
15. Utilization of oleogels with binary oleogelator blends for filling creams low in saturated fat / M. Kim et al // LWT. – 2022. – № 155. – P. 112972.
16. Characterization of construction and physical properties of composite oleogel based on single low molecular weight wax and polymer ethyl cellulose / K. Qu et al // LWT. – 2024. – № 192. – P. 115722.
17. Utilization of oleogels with binary oleogelator blends for filling creams low in saturated fat / M. Kim et al // Lwt. – 2022. – T. 155. – P. 112972.
18. The thermal, rheological, and structural characterization of grapeseed oil oleogels structured with binary blends of oleogelator / K.O. Choi et al // Journal of Food Science. – 2020. – T. 85, № 10. – C. 3432-3441.

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».

И.Ж. Темирова*, Г.Х. Оспанкулова, А.К. Игенбаев
С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті,
010000, Қазақстан Республикасы, Астана қаласы, Жеңіс даңғылы, 62
*e-mail: indira_t85@mail.ru

ТАҒАМДЫҚ ОЛЕОГЕЛЬДЕР АЛУ МАҚСАТЫНДА ҚҰРЫЛЫМ ТҮЗУШІЛЕРДІ ІРІКТЕУ

Бұл жұмыста құрылымдаушы ретінде қолданылатын балауыз, моноглицерид және олардың тең мөлшердегі қоспасы (50:50) негізіндегі тағамдық олеогельдерді алу бойынша зерттеу нәтижелері келтірілген. Олеогельдердің құрылымдық-механикалық (қаттылық, серпімділік) және функционалдық-технологиялық (май байланыстыру қабілеті) қасиеттерін май өнімдерінің технологиясында қолдану үшін бағалау негізінде оңтайлы құрылымдаушыны таңдау негізделген. Барлық зерттелген үлгілер біртекті құрылымы бар бір-бірімен байланыстырлған олеогельдерді құрайтыны анықталды. Құрылымдық түзгіштердің тең мөлшердегі қоспалары арқылы алынған үлгілер бір компонентті үлгілермен салыстырғанда қаттылық, серпімділік және май байланыстыру қабілетінің жоғары мәндерімен сипатталатыны көрсетілген. Бұл кеңістіктік гель желісінің

тиімдірек қалыптасуын және майды ұстау қабілетінің жоғарылауын көрсетеді. Балауыз күшті кристалды құрылымның пайда болуына ықпал етеді, ал моноглицеридтер икемділік пен майдың сақталу қабілетін жақсартады. Оларды бірлесіп қолдану құрылымдық-механикалық және функционалды-технологиялық сипаттамалардың оңтайлы үйлесімі бар құрылымдық гель жүйесінің қалыптасуына әкеледі және сонымен қатар құрылымдаушылардың синергетикалық өзара әрекеттесуінің болуын көрсете алады. Алынған нәтижелер құрылымды құраушылардың тең мөлшердегі қоспасы жүйелерін пайдаланудың орындылығын және олардың спрэдтер мен басқа да май өнімдерін әзірлеу кезіндегі перспективалылығын растайды.

Түйін сөздер: *қатты майлар, өсімдікмайлары, құрылымтүзушілер, олеогельдер, қаттылық, майдыбайланыстыруқабілеті, май қышқылдарының транс-изомерлері.*

I. Temirova*, G. Ospankulova, A. Igenbayev
S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University,
010000, Republic of Kazakhstan, Astana, Zhenis Ave. 62
*e-mail: indira_t85@mail.ru

SELECTION OF STRUCTURING AGENTS FOR THE PRODUCTION OF FOOD OLEOGELS

The paper presents the results of a study on the production of food oleogels based on beeswax, monoglyceride and their binary mixture (50:50) used as structure-forming agents. The choice of the optimal structurizer is justified based on the assessment of the structural-mechanical (hardness, elasticity) and functional-technological (oil-binding ability) properties of oleogels for use in the technology of fat-and-oil products. It was found that all the studied samples form self-sustaining oleogels with a homogeneous structure. It is shown that the samples obtained using binary mixtures of structure-forming agents are characterized by higher values of hardness, elasticity, and oil-binding ability compared with single-component samples. This indicates a more efficient formation of the spatial gel network and an increased ability to retain oil. Beeswax promotes the formation of a strong crystalline structure, while monoglycerides provide plasticity and improved oil retention. Their combined use leads to the formation of a structured gel system with an optimal combination of structural-mechanical and functional-technological characteristics and may also indicate the presence of synergistic interaction of structure-forming agents. The results obtained confirm the expediency of using binary systems of structure-forming agents and their prospects in the development of spreads and other fat-and-oil products.

Key words: *solid fats, vegetable oils, structuringagents, oleogels, hardness, oil-binding capacity, transfattyacidisomers.*

Сведения об авторах

Индира Жанатовна Темирова* – PhDдокторант институт «Инжиниринга и пищевых технологий», Казахский агротехнический исследовательский университет имени Сакена Сейфуллина, Республика Казахстан; e-mail: indira_t85@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9717-3236.

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.

Айдын Каирбекович Игенбаев – PhD, ассоциированный профессор, институт «Инжиниринга и пищевых технологий», Казахский агротехнический исследовательский университет имени Сакена Сейфуллина, Республика Казахстан; e-mail: aidyn_mamyt@mail.ru. ORCiD: https://orcid.org/0000-0002-9903-2912.

Авторлар туралы мәліметтер

Индира Жанатовна Темирова* – PhD докторанты, Инжиниринг жәнеазық-түлік технологиялары институты; Сәкен Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: indira_t85@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9717-3236.

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.

Айдын Каирбекович Игенбаев – PhD, қауымдастырылған профессор, Инжиниринг және азық-түлік технологиялары институты, Сәкен Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: aidyn_mamyt@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9903-2912.

Information about the authors

Indira Temirova* – PhD candidate, Institute of Food Technology and Engineering, Saken Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Republic of Kazakhstan; e-mail: indira_t85@mail.ru. ORCiD: https://orcid.org/0000-0002-9717-3236.

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.

Aidyn Igenbayev – PhD, associate professor, Institute of Food Technology and Engineering, Saken Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Republic of Kazakhstan; e-mail:aidyn_mamyt@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9903-2912.

Поступила в редакцию 30.03.2026
Поступила после доработки 12.04.2026
Принята к публикации 16.04.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-27

IRSTI: 65.59.23

M. Sharapatova*, K. Issayeva
Toraighyrov University,
140000, Pavlodar, Republic of Kazakhstan, Pavlodar, Lomov Street, 64
*e-mail: madina_szd@mail.ru

RECENT ADVANCES IN THE TECHNOLOGICAL INTENSIFICATION OF ENZYMATIC PROCESSES IN MEAT SYSTEMS

Abstract: *Enzymatic reactions play a fundamental role in the transformation of muscle tissue into meat and in the formation of quality attributes in meat products. Postmortem glycolysis, proteolysis, and lipolysis mediated by endogenous enzymes – calpains, cathepsins, aminopeptidases, and lipases – determine texture, color, and flavor. Additional modification of the protein–lipid matrix is ensured by microbial enzymes of starter cultures and by exogenous plant-derived proteases used to regulate structural and sensory properties. Their activity promotes the accumulation of free amino acids, peptides, and volatile compounds responsible for characteristic flavor development. However, the natural rate of enzymatic reactions and the complexity of their control, influenced by pH, temperature, salt content, and water activity, require the application of controlled intensification strategies.*

This review summarizes current advances in innovative technologies aimed at accelerating and optimizing enzymatic processes in the meat industry. The effects of ultrasound (US), pulsed electric fields (PEF), moderate electric fields (MEF), high hydrostatic pressure (HHP), and supercritical CO_2 (SC-CO_2) are discussed in relation to protease activation, increased tissue permeability, and enzyme activity modulation. The review emphasizes that integrating non-enzymatic intensification methods with conventional fermentation and ripening technologies offers prospects for shortening production cycles, improving quality stability, and expanding the range of functional meat products. The findings provide a theoretical basis for the development of scientifically grounded modernization strategies in meat fermentation and ripening processes.

Key words: *enzymatic processes, meat industry, proteolysis, lipolysis, intensification.*

Introduction. Meat products occupy a significant position in human nutrition, serving as a major source of high-quality protein, essential amino acids, and micronutrients, while also providing distinctive sensory attributes that shape consumer perception of quality. Under conditions of intense market competition, the flavor profile of meat products is regarded as one of the key determinants of their commercial attractiveness and technological differentiation, thereby stimulating the search for scientifically grounded approaches to controlling texture and flavor development processes [1]. In this context, enzymatic mechanisms underlying the post-mortem transformation of muscle into meat play a pivotal role.

©M. Sharapatova, K. Issayeva, 2026

Enzymatic processes, through modification of the protein-lipid matrix, determine the structural-mechanical, sensory, and technological properties of meat products. Following slaughter, a cascade of interrelated biochemical reactions is initiated in muscle tissue, including glycolysis, proteolysis, and lipolysis, which are regulated by endogenous enzymatic systems. Anaerobic glycolysis is accompanied by the accumulation of lactic acid and a decline in pH, which induces the development of rigor mortis and significantly affects the ultrastructural organization of muscle fibers [2].

During the subsequent post-mortem period, calpains, cathepsins, and components of the ubiquitin-proteasome system play a central role in the selective degradation of myofibrillar and cytoskeletal proteins, leading to the development of tenderness and the accumulation of low-molecular-weight flavor-active compounds [3].

Concurrently, lipolytic enzymes catalyze the hydrolysis of triacylglycerols and phospholipids, generating precursors of volatile aroma compounds that contribute to the characteristic sensory profile of meat products.

In addition to endogenous enzymatic systems, exogenous plant-derived proteases are applied in meat processing to further intensify proteolysis through the hydrolysis of myofibrillar and, to some extent, connective tissue proteins. This approach enables targeted regulation of tenderization and acceleration of raw material maturation (Figure 1).

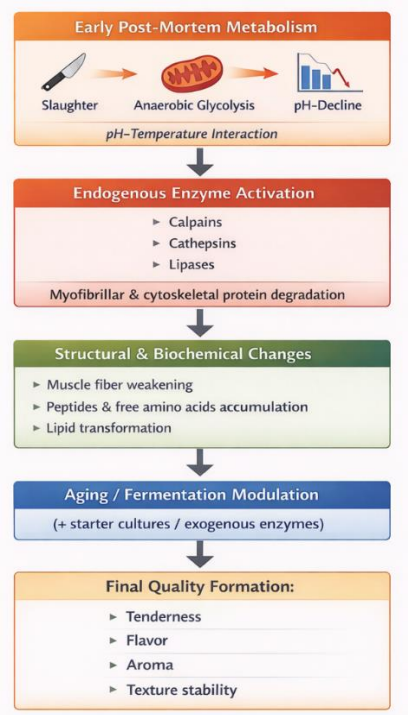


Figure 1 – Post-mortem biochemical cascade and quality formation in meat systems

In dry-cured and fermented meat technologies, endogenous enzymatic processes are substantially enhanced by microbial enzymes produced by starter cultures, as well as by yeasts and molds. The metabolic activity of these microorganisms intensifies proteolytic and lipolytic transformations, promoting the accumulation of free amino acids, low-molecular-weight peptides, and volatile compounds (e.g., aldehydes and ketones) responsible for the development of the product's characteristic flavor profile [2].

However, the rate of enzymatic reactions remains inherently limited and highly variable due to the sensitivity of enzyme systems to both intrinsic and extrinsic factors. These include temperature regimes, the dynamics of pH decline, sodium chloride concentration, water activity, and the physiological status of animals prior to slaughter, which determines muscle glycogen reserves and the subsequent extent of post-mortem acidification [4, 5].

The multifactorial nature of these processes complicates the standardization of technological parameters, reduces the reproducibility of quality attributes, and necessitates extended maturation times to achieve stable sensory and structural characteristics.

Contemporary development strategies in the meat industry focus on optimizing technological processes, including shortening maturation periods, improving quality reproducibility, and ensuring sensory consistency. In this context, particular attention has been directed toward approaches aimed at intensifying enzymatic reactions through the application of controlled physical factors.

In recent years, ultrasound, pulsed and moderate electric fields, high hydrostatic pressure, and supercritical carbon dioxide have been extensively investigated as tools for the targeted modulation of biochemical processes in muscle tissue [5, 6]. According to current research, these technologies can modify cell membrane permeability, induce the release of calcium-dependent proteases, alter the conformational state of enzymatic proteins, and enhance substrate availability for enzymatic interactions. Collectively, these effects contribute to the acceleration of proteolytic and lipolytic transformations while preserving nutritional value and microbiological safety.

The integration of physical intensification methods with conventional fermentation and aging strategies is therefore regarded as a promising direction for technological modernization in meat processing. Systematizing current knowledge on their mechanisms of action and their impact on the dynamics of proteolysis, lipolysis, and post-mortem structural modifications constitutes a necessary prerequisite for the development of scientifically grounded models for the controlled fermentation of meat products.

The objective of this review is to systematize contemporary technologies for the intensification of enzymatic processes in the meat industry, to analyze their molecular and biochemical mechanisms of action, and to evaluate their technological potential for industrial application.

Materials and methods. The present review is based on a systematic analysis of scientific publications addressing the intensification of enzymatic processes in the meat industry. Relevant sources were identified through searches conducted in the international bibliographic databases Scopus and Web of Science Core Collection. In addition, open-access search engines and academic electronic libraries were used to retrieve publications not indexed in the aforementioned databases. Statistical data from the Agency of Statistics of the Republic of Kazakhstan were used as supplementary reference information where relevant.

The systematic search was carried out using keywords and their combinations reflecting the scope of the study, including: enzymatic reactions, meat processing, process intensification, ultrasound, pulsed electric fields, moderate electric fields, high-pressure processing, supercritical CO_2, proteolysis, lipolysis, postmortem metabolism, and fermented meat products. The publication period was restricted to articles published between 1 January 2018 and 1 February 2026.

The initial screening of publications was performed through analysis of titles and abstracts to assess their relevance to the intensification of enzymatic processes in meat systems. The review included experimental and analytical studies focusing on the application of physical treatment methods influencing proteolysis, lipolysis, and post-mortem biochemical transformations. Publications not related to the meat industry or lacking sufficient scientific rigor were excluded from consideration.

Results and Discussion. Analysis of recent studies indicates that the intensity of post-mortem enzymatic transformations is primarily governed by the activity of endogenous proteases and lipases, as well as by technological processing conditions. In particular, the activity of the calpain system during the early post-mortem period has been shown to correlate with the rate of degradation of structural myofibrillar proteins, thereby determining meat texture and influencing its mechanical properties [7, 8].

These findings are further supported by experimental evidence demonstrating that variations in the kinetics of post-mortem pH decline and temperature regimes are associated with differences in calpain and cathepsin proteolytic activity. Consequently, heterogeneous modification of sarcoplasmic and myofibrillar proteins directly affects tissue toughness and the rate of structural relaxation [9]. Thus, the dynamics of post-mortem acidification play a decisive role in determining the extent of proteolytic modification and the degree of muscle fiber disintegration.

During subsequent aging, endogenous proteolytic mechanisms may be complemented by exogenous enzymes and microbial activity, which contribute to further degradation of connective

tissue and muscle proteins. This synergistic action enhances tenderization and promotes the development of a more pronounced flavor profile.

In fermented meat products, endogenous post-mortem processes are augmented by microorganisms originating from the natural microbiota of raw meat and by deliberately inoculated starter cultures. The most commonly used microorganisms in the meat industry include lactic acid bacteria (e.g., Lactiplantibacillus plantarum, Lacticaseibacillus sakei, Pediococcus spp.), Gram-positive catalase-positive cocci (Staphylococcus carnosus, Staphylococcus xylosus), as well as yeasts and molds [10, 3].

Recent studies emphasize that microbial metabolites produced during lactic acid bacterial fermentation may exert pronounced antimicrobial activity and technological stabilization effects without the need to introduce viable cells. This approach is considered promising for the development of “clean-label” meat products [11, 2].

The potential of starter cultures in reduced-nitrite meat processing has also been demonstrated. In one study, the incorporation of a mixed culture of Limosilactobacillus fermentum and Staphylococcus carnosus enabled a reduction in sodium nitrite levels during meat curing without deterioration of technological or sensory properties [12]. The addition of approximately 10^7 CFU/g in combination with 50 mg/kg $NaNO_2$ resulted in a statistically significant decrease in residual nitrite and nitrate levels ($p < 0.05$), while simultaneously increasing nitrosyl pigment formation and improving redness compared with both reduced and standard nitrite treatments (100 mg/kg). Sensory and microbiological parameters remained comparable to control samples, supporting the feasibility of microbial cultures as partial substitutes for synthetic preservatives without compromising product quality and safety.

Alongside microbial mechanisms, alternative sources of exogenous proteases are actively explored to achieve more pronounced intensification of proteolysis. Among plant-derived enzymes, cysteine proteases such as papain (Carica papaya) [13], bromelain (Ananas comosus) [14, 15], and ficin (Ficus carica) [16] are widely applied due to their strong activity toward myofibrillar and connective tissue proteins. In experimental studies on beef steak, bromelain demonstrated a more controlled proteolytic effect and superior sensory performance compared to papain [14].

The mechanism of action of these plant enzymes involves nucleophilic attack by the thiolate group at the active site on peptide bonds, resulting in intensive hydrolysis of structural proteins, reduction of muscle toughness, and disruption of collagen fibers. However, their relatively low substrate specificity may lead to excessive degradation of the protein matrix and the development of a pasty texture when optimal dosages are exceeded. Moreover, excessive proteolysis has been shown to negatively affect water-holding capacity and structural integrity [17,18].

An additional limitation is the sensitivity of the thiol group in the active center to oxidation and thermal effects, which complicates the maintenance of a stable technological outcome.

To systematize the biological factors used for enzymatic process intensification in meat technology, Table 1 summarizes the principal groups of plant proteases and starter culture microorganisms, their mechanisms of action, and their technological effects.

Despite the potential of endogenous enzymatic systems, exogenously added proteases, and metabolically active starter cultures, the extent and direction of proteolytic and lipolytic transformations in meat systems largely depend on processing conditions. In this context, environmental parameters – including temperature, pH, water activity (aw), salt concentration, and aging regimes – act as key factors modulating enzyme activity, microbial viability, and substrate availability [19, 20].

An increase in temperature accelerates proteolysis and lipolysis; however, exceeding optimal levels may result in uncontrolled degradation of the protein matrix. Conversely, a reduction in water activity and changes in ionic strength limit enzyme mobility and substrate diffusion, thereby slowing biochemical reactions. Thus, technological parameters simultaneously function as regulatory tools and limiting factors of enzymatic transformations.

Consequently, there is a growing need to develop controlled intensification strategies capable of regulating the rate and direction of biochemical processes without compromising nutritional value or microbiological safety. In recent years, particular attention has been directed toward physical treatment methods capable of modifying the structure of the protein matrix and the activity of enzymatic systems in muscle tissue.

Table 1 – Plant-derived exogenous enzymes and starter culture microorganisms applied in meat technology

A)Plant proteases (exogenous enzymes)

Enzyme (source)	Class / Targets	Main Technological Effect	Risks / Limitations	References
Papain (Carica papaya)	Cysteine protease; myofibrillar and partially connective tissue proteins	Intensive proteolysis → tenderization and acceleration of aging; increased levels of low-molecular-weight peptides and free amino acids (FAAs)	Low substrate specificity → risk of pasty texture at excessive dosages; sensitivity of the –SH group to oxidation and thermal exposure	[17], [13]
Bromelain (Ananas comosus)	Pineapple-derived proteases; active against muscle proteins, elastin, and collagen (depending on conditions)	More controlled tenderization; improvement of juiciness, tenderness, and overall acceptability under optimized marination conditions	Excessive application may cause over-proteolysis and structural deterioration; activity strongly dependent on pH, temperature, and dosage	[18], [14], [15]
Ficin (Ficus carica)	Cysteine protease; muscle and matrix proteins	Mild tenderization and proteolysis; in formulations incorporating plant ingredients (e.g., fig powder) may improve the quality of fermented products	Careful optimization of dosage and treatment time required; activity varies depending on the product matrix	[16], [17]

(B) Starter Culture Microorganisms Used in Fermented and Dry-Cured Meat Products

Group / Species (examples)	Key Enzymatic Functions	Technological Effects (Quality / Safety)	Remarks on Processing Conditions (pH, aw, salt, temperature)	References
Lactic Acid Bacteria (LAB): Lactiplantibacillus plantarum, Latilactobacillus sakei, Limosilactobacillus fermentum, Pediococcus acidilactici, Latilactobacillus curvatus	Rapid acidification (↓pH); proteolysis/peptidolysis (contribution to FAAs); production of bacteriocins and organic acids	Biopreservation; inhibition of pathogens; fermentation stabilization; contribution to flavor and aroma via metabolic intermediates and precursors of volatile compounds	Strongly dependent on temperature, rate of pH decline, water activity (aw), and salt concentration; activity may be reduced under low aw or high salt conditions	[10], [3], [2]
Catalase-positive cocci (CNS): Staphylococcus carnosus, S. xylosus, (occasionally Kocuria varians)	Nitrite reductase activity (color formation/stabilization); catalase (↓oxidation); lipolysis and proteolysis (aroma development)	Improvement of color stability; enhancement of aromatic profile via secondary metabolites; reduction of oxidative defects; technological compatibility with LAB	Require controlled salt concentration and temperature; sensitive to aggressive curing/aging regimes	[12], [3]
Yeasts: Debaryomyces hansenii (commonly used in dry-cured products)	Proteolysis/peptidolysis; contribution to volatile compound formation; lactate utilization; surface stabilization	Enhancement of aroma; reduction of surface defects; gradual moderation of excessive acidity	Strongly dependent on aw and salt; surface aeration is essential	[3]
Molds: Penicillium nalgiovense (surface inoculation)	Surface enzymes (proteases/lipases); antioxidant and barrier effects; competitive inhibition of undesirable microflora	Stabilization of ripening; development of aged flavor; surface protection	Requires controlled humidity and aeration; risk of defects under improper environmental control	[5]

Ultrasound (US)

Ultrasound treatment is considered one of the most promising physical methods for intensifying biochemical processes in the meat industry. Its mechanism of action is based on acoustic cavitation generated during the propagation of low-frequency waves (20-100 kHz) in a liquid medium. During alternating compression and rarefaction cycles, cavitation bubbles are formed; their growth and collapse generate localized extreme temperatures and pressures, shock waves, and microjets, resulting in pronounced mechanical and physicochemical effects on muscle tissue structure [21]. The combined cavitational, mechanical, and localized thermal effects constitute the basis for targeted microstructural modification, enhanced diffusion phenomena, and activation of enzymatic systems.

Within technologically relevant parameter ranges, ultrasound is capable of disrupting the ultrastructure of muscle fibers and increasing the permeability of cellular and lysosomal membranes, thereby facilitating the release of intracellular enzymes and substrates [22]. Cavitation has been shown to modulate endogenous protease activity through multiple mechanisms. For example, ultrasound treatment of salted pork resulted in pronounced myofibrillar fragmentation and lysosomal disruption, leading to increased release of cathepsins B and L and accelerated proteolysis [23].

Similarly, peptidomic analyses of ultrasound-treated bacon revealed increased concentrations of low-molecular-weight peptides and flavor-active compounds [25]. Additional studies confirmed enhanced degradation of myofibrillar and sarcoplasmic proteins following ultrasound application, accompanied by elevated levels of free amino acids (e.g., Glu, Ala, Thr) and oligopeptides [25, 26].

Ultrasound-induced cavitation also increases membrane permeability and promotes extracellular Ca^{2+} influx, thereby facilitating activation of μ- and m-calpains. It has been demonstrated that elevated intracellular Ca^{2+} levels following ultrasound exposure stimulate the calpain system and accelerate hydrolysis of structural proteins such as actin and myosin, ultimately improving textural properties [27]. Thus, ultrasound intensifies proteolysis via both lysosome-dependent and calcium-dependent pathways, involving cathepsin and calpain enzyme systems.

In contrast to conventional technologies primarily relying on thermal treatment and microbial fermentation, ultrasound operates through cavitational, mechanical, and localized thermal effects, enabling more rapid and precise modulation of biochemical processes [24]. When parameters are optimized, ultrasound accelerates flavor development with reduced dependence on prolonged aging, while preserving nutritional and sensory attributes.

Beyond its effect on endogenous enzymes, ultrasound enhances the efficiency of exogenous proteases. Cavitation-induced disruption of Z-lines and collagen structures in the bovine longissimus lumborum muscle has been shown to facilitate papain penetration into deeper tissue layers and to accelerate the formation of low-molecular-weight peptides [28]. Furthermore, ultrasound has been reported to induce peptide chain unfolding and increase substrate accessibility, thereby enhancing the release of flavor-active amino acids (e.g., Asp, Glu) [29]. This synergistic effect is attributed to improved mass transfer and increased exposure of protein active sites.

Ultrasound may also influence lipolytic processes. Disruption of membrane structures and modification of the substrate microenvironment enhance lipase access to triacylglycerols and phospholipids, potentially intensifying lipolysis and the formation of aroma precursors [30]. Consequently, ultrasound is capable of modulating both proteolytic and lipolytic pathways, exerting a comprehensive effect on the development of the flavor profile.

Consequently, ultrasound is capable of modulating both proteolytic and lipolytic transformations, thereby exerting a comprehensive influence on flavor development. The practical relevance of this mechanism becomes particularly significant in the processing of meats characterized by a pronounced specific aroma, where the controlled formation and transformation of volatile compounds are critical determinants of consumer acceptability. In the context of lamb processing – widely represented in the structure of red meat consumption in the Republic of Kazakhstan – ultrasound may be regarded as a tool for targeted modification of lipid and protein fractions involved in the formation of the characteristic ovine aroma. Controlled intensification of lipolysis and subsequent transformation of free fatty acids may potentially regulate the balance of aroma precursors, reducing the intensity of undesirable sensory notes while preserving the traditional qualities and cultural identity of the product.

Despite its demonstrated efficacy, excessive ultrasound intensity may promote lipid and protein oxidation, reduce the stability of volatile compounds, and generate variability in textural attributes due to localized extreme cavitation effects.

Practical limitations include the relatively high energy demand of the process; as stable cavitation requires high-power equipment. A portion of acoustic energy dissipates as heat, resulting in localized temperature increases and necessitating additional thermal control, thereby increasing total energy consumption within the production line [22].

Scale-up from laboratory to industrial applications presents additional challenges. Non-uniform distribution of the ultrasonic field in bulk material – particularly in large muscle cuts – often requires multi-probe or flow-through system configurations [21], increasing both energy consumption and capital investment. Moreover, the absence of universal processing regimes for different meat types complicates standardization and necessitates further optimization considering tissue morphology and physicochemical characteristics.

Overall, further advancement of ultrasound technology in meat processing requires parameter optimization, deeper investigation of molecular mechanisms, and the development of energy-efficient industrial systems that ensure process controllability, reproducibility, and sensory stability.

High-Pressure Processing (HPP)

High-Pressure Processing (HPP) is a non-thermal technology based on the application of uniform isostatic hydrostatic pressure in the range of 300-700 MPa for short durations (seconds to minutes), typically using water as the pressure-transmitting medium [31].

A major advantage of HPP is the ability to perform treatment at ambient or reduced temperatures, thereby preserving the sensory and nutritional characteristics of meat products. In contrast to ultrasound, HPP is not associated with cavitation phenomena; instead, its effects result from the uniform transmission of pressure throughout the product according to Pascal's principle. The primary effects include denaturation of membrane proteins, disruption of membrane integrity, increased cellular permeability, conformational modifications of proteins, and inactivation of certain enzymes and vegetative microorganisms [32]. For this reason, HPP has traditionally been applied as a cold pasteurization technology. However, increasing attention has recently been directed toward its potential to modulate enzymatic processes in meat systems.

The influence of HPP on enzymatic systems strongly depends on processing parameters such as pressure level, temperature, and treatment time. At moderate pressure levels, stimulation of certain enzymatic reactions may occur, whereas higher pressures often lead to enzyme denaturation. For example, moderate pressure treatment (130 MPa at 10 °C) has been shown to promote metmyoglobin reduction through activation of the enzymatic redox system, thereby enhancing meat redness [32]. However, increasing pressure beyond optimal levels resulted in impaired enzymatic activity.

It has also been reported that treatment at 600 MPa for 6 minutes in dry-cured ham increased lipid oxidation intensity while reducing aminopeptidase activity, suggesting partial enzyme denaturation at high pressures [33]. Thus, depending on processing intensity, HPP may either modulate or suppress proteolytic and lipolytic reactions.

The effect of HPP on meat tenderness is associated with pressure-induced enzyme release at specific pressure levels, followed by maintenance of enzymatic activity during subsequent holding under controlled time–temperature conditions [34]. Combined application of papain and HPP has been shown to significantly reduce shear force and enhance meat tenderization [35].

In addition, HPP can be applied to improve lower-value cuts by inducing structural modification of muscle tissue and enhancing gel formation in processed meat products. This contributes to the development of stable protein matrices with improved water- and fat-holding capacity [34].

Considering the high consumption of red meat (beef, lamb, and horse meat) in Kazakhstan [36], along with the extensive use of cuts containing high levels of connective tissue, increasing the consumer value of tougher and less demanded carcass portions represents an important technological objective. In this context, HPP can be regarded as a value-added processing tool, enabling targeted reduction of shear force and formation of stable protein structures in minced and restructured products, thereby improving water and fat retention, processing yield, and textural uniformity [33].

Despite its technological potential, HPP applications in this field remain limited at the industrial scale due to technical complexity and the need for substantial adaptation of production lines. The labile nature of muscle proteins makes fresh tissue highly sensitive to pressure – temperature-time combinations. Depending on processing parameters, undesirable changes in appearance, color, and texture may occur, thereby restricting broader industrial adoption [37]. Furthermore, elevated pressures may accelerate lipid oxidation and inactivate beneficial enzymatic systems.

Overall, High-Pressure Processing represents a powerful tool for controlled modulation of protein and enzymatic systems in meat tissue. Unlike ultrasound, which primarily acts through localized mechanical disruption and enzyme activation, HPP exerts isotropic conformational effects on molecular structures, resulting in either enhancement or suppression of enzymatic reactions depending on the selected processing regime. The technological promise of HPP lies in its capacity to enable controlled modulation of proteolysis, color formation, and texture development, provided that parameters are carefully optimized and the process is effectively adapted for industrial implementation.

Electrical Stimulation (ES)

Electrical Stimulation (ES) is a post-mortem technology based on the application of electrical impulses to carcasses in order to accelerate biochemical processes and improve meat quality attributes. At the industrial scale, high-voltage electrical stimulation (HVES; 450-3600 V) is widely applied to enhance tenderness and improve the technological properties of beef and lamb [38].

High-voltage electrical stimulation induces intensive muscle contractions during the early post-mortem period, leading to accelerated ATP depletion, activation of glycolysis, and a more rapid decline in pH. As a result, rigor mortis develops at a relatively higher muscle temperature, reducing the risk of cold shortening and contributing to improved tenderness.

A key biochemical effect of ES is the enhanced release of Ca^{2+} from the sarcoplasmic reticulum due to electrically induced muscle contractions. This process activates the calpain system and accelerates proteolytic degradation of myofibrillar proteins [38]. In contrast to ultrasound treatment – where increased Ca^{2+} levels are primarily associated with enhanced membrane permeability and mechanical disruption of intracellular structures – electrical stimulation triggers a physiologically mediated release of calcium ions characteristic of muscle contraction [39]. Thus, calpain activation during ES occurs within the framework of the muscle's natural contraction mechanism.

The effect of pulsed electric fields (PEF; 2.5-10 kV; 50-90 Hz) on the Longissimus dorsi muscle during a 21-day aging period has also been investigated [40]. A moderate increase in calpain activity and enhanced proteolysis of Troponin-T were observed, indicating the potential of PEF to accelerate tenderization; however, no pronounced effect on shear force was detected.

Other authors [41] demonstrated that treatment of lamb with electric pulses (1-1.4 kV/cm) was associated with increased levels of free amino acids and enhanced release of cathepsins, suggesting stimulation of enzymatic processes. Simultaneously, a reduction in fatty acid content was observed, attributed to intensified lipid oxidation. Therefore, the effectiveness of PEF depends on field strength and the stage of post-mortem aging.

Moderate Electric Fields (MEF; 1-1000 V/cm; 50-25,000 Hz) represent a technology combining membrane electroporation with controlled ohmic heating generated by alternating current passing through biological tissue [42]. In contrast to high-energy pulsed regimes, MEF provides a milder yet controlled impact on muscle structure.

Application of MEF is accompanied by increased membrane permeability, accelerated post-mortem glycolysis, and a faster decline in pH (to values below 6.0 before muscle temperature reaches approximately 10°C), thereby optimizing early post-mortem processes [39]. In addition, electroporation induces intracellular Ca^{2+} release, activating calpains and enhancing proteolytic degradation of myofibrillar proteins during aging [36].

From a technological perspective, the combined application of electrical stimulation, PEF, and MEF contributes to accelerated pH decline, reduced risk of cold shortening, intensified proteolysis, improved tenderness, and shortened aging time. However, the magnitude of these effects critically depends on field strength, frequency, temperature, and treatment duration. Under uncontrolled conditions, excessive pH decline, intensified oxidative reactions, and deterioration of

color characteristics may occur, limiting the universality of the technology and necessitating strict optimization of processing parameters.

Supercritical Fluids (SC-CO_2)

Supercritical fluids, predominantly supercritical carbon dioxide (SC-CO_2), represent a technology based on the use of CO_2 above its critical parameters (Pc = 73.8 bar; Tc = 31.1 °C). In this state, the substance exhibits combined properties of a gas (high diffusivity) and a liquid (solvent capacity), enabling intensive mass transfer and selective interaction with biological matrices [43]. Although the primary application of SC-CO_2 in the food industry has traditionally been the extraction of target compounds, increasing attention is being directed toward its potential for modification of meat systems, including lipid, microbial, and structural components.

Of particular relevance to the meat sector are studies investigating the use of SC-CO_2 for lipid extraction. Research has demonstrated that supercritical CO_2 effectively extracts lipids from pork and lamb tissues [44]. Owing to its selective solubility toward nonpolar compounds, the technology may be applied for controlled defatting of meat raw materials, partial modification of lipid profiles, and recovery of functional lipid fractions. Additionally, SC-CO_2 has been used for the extraction of trace amounts of antibiotics from meat matrices [43], highlighting its potential in food safety and quality control. These findings indicate that the technology can efficiently penetrate dense muscle tissue and interact with intramuscular components without causing pronounced thermal degradation of structural integrity.

Particular practical interest lies in studies exploring the combined application of SC-CO_2 with other physical methods. In the same study [45], SC-CO_2 in combination with ultrasound and physiological saline was applied for the inactivation of Escherichia coli in dry-cured ham. Effective microbial decontamination was achieved without significant alterations in color, texture, or pH. This result is particularly important, as it demonstrates the possibility of mild non-thermal stabilization of meat products while preserving sensory characteristics.

Other authors [46] investigated a combined ultrasound and SC-CO_2 technology during drying of chicken breast. The integrated approach achieved inactivation of mesophilic microbiota, yeasts, molds, and Salmonella spp., while preserving protein nutritional value and minimizing thermal tissue damage. Thus, SC-CO_2, particularly when integrated with complementary technologies, functions as a tool for controlled microbial stabilization and structural modification of meat systems. Due to its high solubility in the aqueous phase of muscle tissue and its ability to form carbonic acid, SC-CO_2 can alter the microenvironment of the protein-lipid matrix, affect membrane permeability, and influence the kinetics of enzymatic reactions.

Industrial implementation of supercritical CO_2 in meat processing remains limited by high equipment costs and the requirement for operation under elevated pressures, which complicate process scale-up and increase energy consumption [39]. Furthermore, the limited number of studies specifically addressing the impact of SC-CO_2 on muscle enzymatic systems, as well as the potential for enzyme inactivation under extreme processing conditions, indicate the need for further parameter optimization and deeper investigation of the molecular mechanisms underlying SC-CO_2 interaction with the meat matrix.

Overall, comparison of the discussed technologies highlights fundamental differences in their mechanisms of action on the protein and lipid matrix of muscle tissue. A comparative analysis of these physical methods is presented in Table 2.

The presented data indicate that the selection of an intensification method should be based on the targeted technological outcome and the morpho-functional characteristics of the processed raw material.

The application of starter cultures (LAB, Staphylococcus spp., yeasts/molds) and/or exogenous plant-derived proteases, as well as the integration of physical intensification methods (US, HPP, PEF/MEF, SC-CO_2), expands the possibilities for targeted modulation of membrane permeability, activation of Ca^{2+}-dependent proteases, and alteration of protein conformational states. Collectively, these approaches enhance quality reproducibility and enable shortening of maturation time while maintaining sensory acceptability.

Nevertheless, large-scale industrial implementation remains constrained by technological and economic factors, including high capital investment requirements (particularly for HPP and SC-CO_2), energy consumption, operational safety considerations associated with high pressures and voltages, and the risk of undesirable effects under improperly optimized conditions (e.g., intensified

lipid oxidation, color instability, excessive proteolysis, and loss of structural integrity in the case of plant proteases).

Table 2 – Comparative mechanisms of action of physical methods for the intensification of enzymatic processes in meat systems

Method	Cellular / Structural Effect	Enzymatic Effect	Technological Outcome	References
Ultrasound (US)	Cavitation, shock waves, microstreaming; increased permeability of cellular and lysosomal membranes; enhanced diffusion	↑ Release of cathepsins B/L (lysosomal); ↑ Ca^{2+} influx and activation of μ- and m-calpains; intensified proteolysis and accumulation of peptides and FAA	↑ Tenderness; ↑ flavor-active peptides and FAA; accelerated development of flavor profile; enhanced efficacy of exogenous proteases	[21], [22], [23], [26], [29]
High-Pressure Processing (HPP)	Isotropic pressure (300-700 MPa); protein conformational changes; membrane disruption; altered membrane permeability	Modulation of enzymatic activity: under moderate regimes, activation of specific systems possible (e.g., MetMb reduction); under high pressures, enzyme inactivation (e.g., aminopeptidases) and increased oxidative reactions	"Cold pasteurization"; effects on color/redness; texture modification; controlled structuring/gelation; tenderization potential for low-value cuts	[31], [32], [33], [34]
Electrical Stimulation (HVES / PEF / MEF)	HVES: intensive contractions, accelerated glycolysis and pH decline; PEF/MEF: membrane electroporation; MEF additionally induces ohmic heating	↑ Ca^{2+} release and calpain activation; accelerated proteolysis of myofibrillar proteins; under PEF, possible release of cathepsins (regime- and aging stage-dependent)	↓ Risk of cold shortening; accelerated aging; ↑ tenderness; effect critically depends on processing parameters (voltage/frequency/temperature/time)	[38], [39], [40], [41]
Supercritical CO_2 (SC-CO_2)	High diffusivity and selective interaction; extraction of lipids and microcomponents; when combined with US – enhanced mass transfer and microbial destabilization	Direct evidence on muscle enzymatic systems remains limited; technologically relevant effects include extraction and microbial inactivation (especially in combination with US)	Lipid/fraction extraction; reduction of undesirable trace components; microbial inactivation while preserving color/texture/pH (under combined regimes)	[43], [44], [45]

In this regard, the most promising practical trajectory lies in combined, selectively applied solutions – particularly for premium products, clean-label segments, food safety enhancement, shelf-life extension, or processing of low-value cuts – accompanied by strict parameter standardization (P–T–t; E–f–t; ultrasound intensity; aw/NaCl/pH) and mandatory validation for specific raw materials and processing schemes.

Under the conditions of Kazakhstan, the applied relevance of such approaches is further strengthened by the structure of the raw material base and consumption patterns. The high proportion of red meat (beef, lamb, horse meat) and the extensive utilization of cuts with elevated connective tissue content generate demand for solutions that improve tenderness, water-holding capacity, and technological yield without compromising traditional product identity. In this context, controlled intensification of proteolysis and the formation of more stable protein matrices – particularly through HPP and combined schemes involving ultrasound, electric fields, and starter

cultures – may serve as a pathway for increasing the added value of tougher cuts and developing product lines with more predictable sensory profiles.

An additional prerequisite for market acceptance of these technologies is appropriate communication of their benefits. Labeling and informational elements should translate technological terminology into consumer-relevant advantages (e.g., safety, quality stability, reduced nitrite/additive levels, reproducible flavor and texture), thereby mitigating skepticism toward non-thermal processing technologies.

Conclusion. The quality of meat products is determined by the multifactorial interaction of post-mortem glycolysis, proteolysis, and lipolysis with technological processing parameters that regulate the rate and direction of biochemical transformations within the protein-lipid matrix. The synthesized evidence indicates that the combination of biotechnological tools (starter cultures, microbial metabolites/postbiotics, exogenous enzymes) with physical intensification methods (ultrasound, electric fields, high-pressure processing, and supercritical CO_2) provides a scientifically grounded framework for the controlled acceleration of aging and the targeted formation of desirable sensory and textural attributes while ensuring microbiological safety. The practical potential of these approaches lies in improving quality reproducibility and technological stability. However, their broader industrial implementation requires careful optimization of processing regimes, thorough assessment of risks associated with oxidative and structural defects, and the development of standardized protocols tailored to specific raw materials and product categories.

References

1. Libera J. Consumption of processed red meat and its impact on human health: A review / J. Libera, K. Iłowiecka, D. Stasiak // International Journal of Food Science and Technology. – 2021. – № 56(12). – P. 6115-6123.
2. Bio-Preservation of Meat and Fermented Meat Products by Lactic Acid Bacteria Strains and Their Antibacterial Metabolites / S. Kaveh et al // Sustainability. – 2023. – № 15(13). – P. 10154. https://doi.org/10.3390/su151310154.
3. Role of enzymatic reactions in meat processing and use of emerging technologies for process intensification / B. Abril et al // Foods. – 2023. – № 12(10). – P. 1940.
4. Animal Welfare Assessment and Meat Quality through Assessment of Stress Biomarkers in Fattening Pigs with and without Visible Damage during Slaughter / N.N. Ogawa et al // Animals. – 2024. – № 14(5). – P. 700. https://doi.org/10.3390/ani14050700.
5. A comprehensive review of drying meat products and the associated effects and changes / A. Mediani et al // Frontiers in Nutrition. – 2022. – № 9.
6. Jadhav H.B. Emerging techniques for the processing of food to ensure higher food safety with enhanced food quality: a review / H.B. Jadhav, P. Choudhary // Discov Food. – 2024. – № 4. – P. 20. https://doi.org/10.1007/s44187-024-00089-5.
7. Deciphering PSE-like muscle defect in cooked hams: A signature from the tissue to the molecular scale / L. Théron et al // Food Chem. – 2019. – № 270. – P. 359-366.
8. Changes in Physical Meat Traits, Protein Solubility, and the Microstructure of Different Beef Muscles during Post-Mortem Aging / YH. Feng et al // Foods. – 2020. – № 9(6). – P. 806. https://doi.org/10.3390/foods9060806.
9. Relationship between pre-rigor temperature of pork longissimus muscle, myofibril-bound calpain activity and protein degradation / J. Lyu et al // Meat Science. – 2023. – Vol. 198. – P. 109094. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2022.109094.
10. Application of lactic acid bacteria for the biopreservation of meat products: A systematic review / C. Barcenilla et al // Meat Science. – 2022. – Vol. 183. – P. 108661. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2021.108661.4.
11. From Production to Application: Postbiotics in Meat, Meat Products, Other Food Matrices, and Bioactive Packaging / M. Trymers et al // Foods. – 2026. – № 15(3). – P. 501. https://doi.org/10.3390/foods15030501.
12. The Use of the Mixed Bacteria Limosilactobacillus fermentum and Staphylococcus carnosus in the Meat Curing Process with a Reduced Amount of Sodium Nitrite / P. Szymański et al // Applied Sciences. – 2021. – № 11(3). – P. 904. https://doi.org/10.3390/app11030904.
13. INFLUENCE OF PAPAIN FERMENT AND BIOPROTECTIVE B-SF-43 ON PH AND FATTY ACIDITY OF MEAT PRODUCTS / A. Beisembayeva et al // Вестник Университета Шакарима.

Серия технические науки. – 2025. – № 3. https://cyberleninka.ru/article/n/influence-of-papain-ferment-and-bioprotective-b-sf-43-on-ph-and-fatty-acidity-of-meat-products (дата обращения: 17.02.2026).
14. Enhancing Steak Taste, Juiciness, Tenderness, and Acceptability through Bromelain-Enzyme Marination: A Sensory-Focused Approach / F.N. Aziz et al // Journal of Applied Food Technology. – 2025. – № 12(1). – P. 23-29. https://doi.org/10.17728/jaft.26992.
15. Quality Improvement of Goat Meat-Fermented Sausage Using Pineapple and Fig Powders for the Elderly / S.H. Aung et al // Food Science of Animal Resources. – 2025. – № 45(5). – P. 1356-1376.
16. Naveena, B.M. Tenderization of meat using plant proteases: Effect on physico-chemical and textural characteristics / B.M. Naveena, S.K. Mendiratta, A.S.R. Anjaneyulu // Meat Science. – 2020. – № 169. – P. 108214. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2020.108214.
17. Ketnawa S. Application of bromelain in meat tenderization: Characteristics, limitations and industrial perspectives / S. Ketnawa, S. Rawdkuen // Food Chemistry. – 2021. – № 338. – P. 128110. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128110.
18. Impact of beef carcass size on chilling rate, pH decline, display color, and tenderness of top round subprimals / J.M. Lancaster et al // Translational Animal Science. – 2020. – № 4(4). – P. 199. https://doi.org/10.1093/tas/txaa199.
19. Muscle, Ageing and Temperature Influence the Changes in Texture, Cooking Loss and Shrinkage of Cooked Beef / R. Vaskoska et al // Foods. – 2020. – Vol. 14, № 9(9). – P. 1289. https://doi.org/10.3390/foods9091289.
20. Ultrasound in the food industry: Mechanisms and applications for non-invasive texture and quality analysis / N.Y.A. Prempeh et al // Foods. – 2025. – № 14(12). – P. 2057.
21. Ultrasound Technology in Modulating Characteristic Flavors of Meat Products: Mechanisms, Applications, and Future Trends / F. Xi et al // Journal of Future Foods. – 2026.
22. Underlying formation mechanisms of ultrasound-assisted brined porcine meat: The role of physicochemical modification, myofiber fragmentation and histological organization / G. Jin et al // Ultrasonics Sonochemistry. – 2023. – № 94. – P. 106318
23. Power ultrasound in the meat industry (freezing, cooking and fermentation): Mechanisms, advances and challenges / M. Soltani Firouz et al // Ultrasonics Sonochemistry. – 2022. – № 86. – P. 106027. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106027.
24. Study on the effects and mechanisms of ultrasound on the peptide profile and taste of unsmoked bacon using peptidomics and bioinformatics / J. Zhang et al // Food chemistry. – 2023. – № 414. – P. 135764.42.
25. Effects of ultrasonic-assisted marinating on degradation of beef protein and formation of flavor precursors / W. Lin et al // Journal of Food Composition and Analysis. – 2024. – № 133. – P. 106407.
26. Ultrasound as a potential process to tenderize beef: Sensory and technological parameters / E. Peña-Gonzalez et al // Ultrasonics Sonochemistry. – 2019. – № 53. – P. 134-141.
27. Barekat S. Effects of ultrasound on microstructure and enzyme penetration in beef longissimus lumborum muscle / S. Barekat, N. Soltanizadeh // Food and Bioprocess Technology. – 2018. – № 11(3). – P. 680-693.
28. The effect of ultrasound assisted enzymatic hydrolysis on the physicochemical properties and flavor characteristics of protein peptides from Harpodon nehereus / J. LU et al // Food and Machiner. – 2023. – № 39. – P. 7.
29. Ultrasound as a potential process to tenderize beef: Sensory and technological parameters / E. Peña-Gonzalez et al // Ultrasonics Sonochemistry. – 2019. – № 53. – P. 134-141.
30. Aspects of high hydrostatic pressure food processing: Perspectives on technology and food safety. Compr. Rev / K. Aganovic et al // Food Sci. Food Saf. – 2021. – № 20. – P. 3225-3266.
31. High-pressure processing of fish and shellfish products: Safety, quality, and research prospects. Compr. Rev / U. Roobab et al // Food Sci. Food Saf. – 2022. – № 21. – P. 3297-3325.
32. Effect of high-pressure processing and chemical composition on lipid oxidation, aminopeptidase activity and free amino acids of Serrano dry-cured ham / A. Rivas-Cañedo et al // Meat Sci. – 2021. – № 172. – P. 108349
33. High-pressure processing of meat: Molecular impacts and industrial applications / T. Bolumar et al // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. – 2021. – № 20(1). – P. 332-368.

34. Tenderization of yak meat by the combination of papain and high-pressure processing treatments / Y. Ma et al // Food and Bioprocess Technology. – 2019. – № 12(4). – P. 681-693.
35. Bureau of National Statistics of the Agency for Strategic Planning and Reforms of the Republic of Kazakhstan. (n.d.). Agriculture, forestry, hunting and fisheries statistics. Retrieved February 18, 2026, from https://stat.gov.kz/ru/industries/business-statistics/stat-forrest-village-hunt-fish/publications/475806/?sphrase_id=1804006
36. High-pressure processing of fish and shellfish products: Safety, quality, and research prospects / U. Roobab et al // Compr. Rev. Food Sci. Food Saf. – 2022. – № 21. – P. 3297-3325.
37. Effect of different electrical stimulation systems on beef quality and palatability: Constant current compared to constant voltage / P.L.A. Leighton et al // Meat Science. – 2024. – № 216. – P. 109567.
38. Effect of Pre-Slaughter Practises and Early Post-Mortem Interventions on Sheep Meat Tenderness and Its Impact on Microbial Status / C. Álvarez et al // Foods. – 2022. – № 11. – P. 181.
39. Effect of pulsed electric field on calpain activity and proteolysis of venison / Z.F. Bhat et al // Innovative Food Science & Emerging Technologies. – 2019. – № 52. – P. 131-135.
40. Changes in the physicochemical properties of chilled and frozen-thawed lamb cuts subjected to pulsed electric field processing / K. Kantono et al // Food Res. Int. – 2021. – № 141. – P. 110092.
41. Pereira R.N. Food Structure Development/Production Through Flexible Processes: The Use of Electric Fields to Enable Food Manufacturing / R.N. Pereira, A.A.Vicente, J.A. Teixeira // Handb. Food Struct. Dev. – 2019. – № 18. – P. 422.
42. Lipid Extracts Obtained by Supercritical Fluid Extraction and Their Application in Meat Products / B. Šojić et al // Antioxidants. – 2022. – № 11(4). – P. 716. https://doi.org/10.3390/antiox11040716.
43. Nain K.B. Fat Extraction from Food Industry Waste / K.B. Nain// In Food Processing Waste and Utilization; CRC Press: Boca Raton, FL, USA. – 2022. – P. 81-88.
44. Use of high-power ultrasound combined with supercritical fluids for microbial inactivation in dry-cured ham / R.I. Castillo-Zamudio et al // J. Innov. Food Sci. Emerg. Technol. – 2021. – № 67. – P. 102557.
45. Supercritical carbon dioxide combined with high power ultrasound as innovate drying process for chicken breast / G. Morbiato et al // J. Supercrit. Fluids. – 2019. – № 147. – P. 24-32.

М.М. Шарапатова*, К.С. Исаева
Торайғыров университеті,
140000, Павлодар, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ., Ломов к-сі, 64
*e-mail: madina_szd@mail.ru

ЕТ ӨНЕРКӘСІБІНДЕ ФЕРМЕНТАТИВТІК ПРОЦЕССТЕРДІ ИНТЕНСЕФИКАЦИЯЛАУДЫҢ ЗАМАНАУИ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫ

Ферментативтік реакциялар бұлшықетінің етке трансформациялануында және ет өнімдерінің сапа көрсеткіштерінің қалыптасуында шешуші рөл атқарады. Посмортем кезеңінде жүретін гликолиз, протеолиз және липолиз үдерістері эндогенді ферменттер – кальпаиндер, катепсиндер, аминопептидазалар мен липазалар – әсерімен жүзеге асырылып, өнімнің құрылымдық, түс және дәм мен хош иістік сипаттамаларын айқындайды. Ақуыз-липидтік матрикстің қосымша модификациясы стартық культуралармен, сондай-ақ құрылымдық және сенсорлық қасиеттерді реттеу мақсатында қолданылатын өсімдіктекті экзогенді протеазалар арқылы қамтамасыз етіледі. Олардың белсенділігі еркін аминқышқылдарының, пептидтердің және өнімнің өзіндік дәмі мен хош иісін қалыптастыратын ұшқыш қосылыстардың жинақталуына ықпал етеді. Алайда ферментативтік реакциялардың табиғи жылдамдығы және олардың pH, температура, тұз мөлшері мен су белсенділігіне тәуелді күрделі реттелуі басқарылатын интенсификациялау әдістерін қолдануды талап етеді.

Ғылыми шолуда ет өнеркәсібінде ферментативтік үдерістерді жеделдетуге және оңтайландыруға бағытталған инновациялық технологиялар саласындағы заманауи ғылыми жетістіктер жүйеленген. Ультрадыбыстың (US), импульстік (PEF) және орташа электр өрістерінің (MEF), жоғары гидростатикалық қысымның (HHP), сондай-ақ аса критикалық көмірқышқыл газының (SC-CO_2) протеазаларды белсендіру, тіндердің өткізгіштігін арттыру және ферменттік белсенділікті реттеу тұрғысындағы әсері қарастырылады. Ферментативтік емес интенсификациялау әдістерін дәстүрлі ферментация және жетілдіру технологияларымен ықпалдастыру өндірістік циклдің қысқаруына, сапаның тұрақтылығының артуына және функционалдық ет өнімдері ассортиментінің кеңеюіне мүмкіндік беретіні айқындалады. Ұсынылған

тұжырымдар ет өнеркәсібіндегі ферментация және жетілдіру үдерістерін жаңғыртуға арналған ғылыми негізделген бағдарламаларды әзірлеудің теориялық негізін қалыптастырады.

Түйін сөздер: *ферментативтік үдерістер, ет өнеркәсібі, протеолиз, липолиз, интенсификациялау.*

М.М. Шарапатова*, К. Исаева
Торайгыров университет,
140000, Павлодар, Республика Казахстан, г. Павлодар, ул. Ломова, 64
*e-mail: madina_szd@mail.ru

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ФЕРМЕНТАТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ В МЯСНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Ферментативные реакции играют ключевую роль в трансформации мышечной ткани в мясо и формировании показателей качества мясных продуктов. Посмертемные процессы гликолиза, протеолиза и липолиза, опосредованные действием эндогенных ферментов – кальпаинов, катепсинов, аминопептидаз и липаз, определяют текстуру, цвет и вкусо-ароматические характеристики продукции. Дополнительная модификация белково-липидного матрикса обеспечивается ферментами стартовых культур, а также экзогенными протеазами растительного происхождения, применяемыми для регулирования структурных и сенсорных свойств. Их активность способствует накоплению свободных аминокислот, пептидов и летучих соединений, формирующих характерный профиль вкуса и аромата. Однако естественная скорость ферментативных реакций и сложность их контроля, обусловленные влиянием pH, температуры, содержания соли и водной активности, требуют применения методов управляемой интенсификации.

В обзоре обобщены современные достижения в области инновационных технологий, направленных на ускорение и оптимизацию ферментативных процессов в мясной промышленности. Рассматривается влияние ультразвука (US), импульсных (PEF) и умеренных электрических полей (MEF), высокогидростатического давления (HHP) и сверхкритического CO_2 (SC-CO_2) на активацию протеаз, повышение проницаемости тканей и модуляцию ферментативной активности. Подчёркивается, что интеграция неферментативных методов интенсификации с традиционными технологиями ферментации и созревания открывает возможности сокращения производственного цикла, повышения стабильности качества и расширения ассортимента функциональных мясных продуктов. Представленные обобщения формируют теоретическую основу для разработки научно обоснованных программ модернизации процессов ферментации и созревания в мясной промышленности.

Ключевые слова: *ферментативные процессы, мясная промышленность, протеолиз, липолиз, интенсификация.*

Information about the authors

Madina Sharapatova* – corresponding author, doctoral student of the Department of Biotechnology, Toraighyrov University, Pavlodar, Kazakhstan; e-mail: madina_szd@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-1094-8579.

Kuralay Issayeva – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Biotechnology, Toraighyrov University, Pavlodar, Kazakhstan; e-mail: issayevakuralay@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4533-0188.

Авторлар туралы мәліметтер

Мадина Мадениетовна Шарапатова* – «Биотехнологии» кафедрасының докторанты, Павлодар қаласының Торайғыров Университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: madina_szd@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-1094-8579.

Куралай Сметкановна Исаева – техника ғылымдарының кандидаты, «Биотехнология» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Павлодар қаласының Торайғыров Университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: issayevakuralay@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4533-0188.

Сведения об авторах

Мадина Мадениетовна Шарапатова* – докторант кафедры «Биотехнологии», Торайгыров Университет города Павлодар, Республика Казахстан; e-mail: madina_szd@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-1094-8579.

Куралай Сметкановна Исаева – кандидат технических наук, ассоциированный профессор кафедры «Биотехнологии», Торайгыров Университет города Павлодар, Республика Казахстан; e-mail: issayevakuralay@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4533-0188.

Received 30.03.2026
Revised 13.04.2026
Accepted 17.04.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-28

CC BY 4.0
Check for updates

ҒТАХР: 65.63.33

А.К. Мустафаева[1*], Р. Асқар[1], Ш. Сәкен[1], Е.Б. Муталиев[1], Г.Б. Абдилова[2]
[1]Сәкен Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті,
010011, Қазақстан Республикасы, Астана қаласы, Жеңіс даңғылы 62
[2]Шәкәрім университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинка к-сі, 20 А
*e-mail: ayaulym.mustafa@mail.ru

ҰЛТТЫҚ СҮТҚЫШҚЫЛДЫ ӨНІМ ӨНДІРУ ТЕХНОЛОГИЯСЫ

Аңдатпа: *Бұл ғылыми жұмыста түйе сүтінің биохимиялық және технологиялық артықшылықтарын ескере отырып, кептірілген өрік қосылған ұлттық құрт өнімін өндіру технологиясы әзірленді. Зерттеу барысында түйе сүтінің физика-химиялық қасиеттері, оның ашытуға қолайлы табиғи параметрлері және құрт дайындау тиімділігі талданды. Кептірілген өріктің тағамдық және функционалдық қасиеттері анықталады, атап айтқанда табиғи қант, калий, β-каротин және пектиндер құрттың сапалық көрсеткіштерін арттыру үшін қолданылды.*

Зерттеу жұмысы дайын өнімнің химиялық құрамын, органолептикалық белгілерін, ылғалдылығын, қышқылдылығын, дәрумендік құрамын және энергетикалық құндылығын анықтауды қамтиды. 3%, 5%, 7% кептірілген өрік қосылған үлгілер салыстырмалы түрде зерттелді. Олардың ішінен 5% кептірілген өрікті нұсқа дәмдік, құрылымдық және дәрумендік құрам бойынша ең тиімді деп танылды.Таңдап алынған үлгідегі В тобының дәрумендік тобы төмендегідей нәтиже көрсетті: B_1-0,057±0,011, B_2-0,208±0,085, B_3-4,22±0,818, B_5-0,330±0,064, B_6-0,125±0,023.

Ғылыми жұмыс нәтижесінде кептірілген өрік қосылған түйе сүтінен құрт өндірудің ғылыми негізделген технологиялық сұлбасы ұсынылып, өнімнің тағамдық құндылығы мен функционалды қасиеттерін арттыру мүмкіндігі дәлелденді. Бұл технология ұлттық өнімдерді жаңғыртуға және олардың нарықтағы сұранысын кеңейтуге мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: *түйе сүті, сиыр сүті, ұлттық сүтқышқылды өнім, құрт, кептірілген өрік.*

Кіріспе

Тамақ өнімдерін өндіру саласында соңғы жылдары функционалды бағыттағы ұлттық тағамдарды ғылыми тұрғыдан жаңғырту мен олардың тағамдық қасиеттерін арттыру мәселесі өзекті зерттеу нысанына айналып отыр [1]. Бұл үрдіс халықтың табиғи, биологиялық белсенді, қауіпсіз және жоғары құнарлы өнімдерге деген сұранысының артуымен, сондай-ақ дәстүрлі тағамдарды жаңа технологиялық тәсілдер арқылы жетілдіру қажеттілігімен түсіндіріледі. Осы бағытта сүт туынды өнімдерін, әсіресе ұлттық тағамдар қатарын кеңейтуге мүмкіндік беретін технологиялық шешімдерді әзірлеу – қазіргі тағамтану ғылымының маңызды міндеттерінің бірі.

Қазақстанның табиғи – климаттық жағдайы түйе шаруашылығын дамытуға өте қолайлы, әсіресе шөл және шөлейт аймақтарда түйе сүті негізгі ауылшаруашылық шикізаттарының біріне айналған. Елдегі түйе басы санының тұрақты өсуі түйе сүтін өнеркәсіптік өңдеу технологияларын жетілдіруді және оның негізінде ұлттық әрі функционалдық өнімдер ассортиментін арттыруды талап етеді [2].

Түйе сүті – химиялық құрамының ерекшелігімен және биологиялық белсенділігінің жоғарылығымен танылған табиғи өнім. Оның құрамында жеңіл сіңетін ақуыздар, иммундық қасиеті күшті лактопероксидаза жүйесі, темір, С дәрумені және қанықпаған май қышқылдары мол.

©А.К. Мустафаева, Р. Асқар, Ш. Сәкен, Е.Б. Муталиев, Г.Б. Абдилова, 2026

Түйе сүті химиялық құрамы жағынан сиыр сүтінен едәуір ерекшеленеді: онда иммундық жүйені қолдайтын, антиоксиданттық әсерге ие биологиялық белсенді компоненттер, қанықпаған май қышқылдары, минералдар және дәрумендер көп мөлшерде кездеседі. Бета-казеиннің құрылымдық ерекшеліктеріне байланысты түйе сүті аллергиялық реакция туғызу ықтималдығы төмен және ағзаға жеңіл сіңеді.

Ұлттық тағамдардың ішіндегі ерекше орын алатын өнімдердің бірі – құрт. Құрт – қазақтың дәстүрлі ашытылған өнімі, ұзақ сақталатын, ақуызға бай, сүттің табиғи концентраты. Қазіргі тағамтану саласында құрттың дәрумендік құрамын арттыру үшін өсімдік тектес компоненттермен байыту тәсілдері қолданыла бастады [3].

Оның дайындалу технологиясы табиғи ашыту, престеу және кептіру процестеріне негізделген. Ал өнім ұзақ сақталуымен, жоғары қоректік құндылығымен және ерекше дәмдік қасиеттерімен ерекшеленеді. Соңғы жылдары құртты әртүрлі табиғи компоненттермен байыту, оның функционалды қасиеттерін күшейту және тұтынушылық тартымдылығын арттыру бағытында зерттеулер жүргізілуде. Мұндай тәсіл дәстүрлі ұлттық тағамды сақтай отырып, оны қазіргі тағамтану талаптарына сай бейімдеуге мүмкіндік береді.

Осы зерттеуде құртты байытуға арналған өсімдік тектес компонент ретінде кептірілген өрік пайдаланылды. Бұл өсімдік тектес қоспа тағамның минералдық және дәрумендік құндылығын арттырып қана қоймай, дайын өнімнің физиологиялық әсерін күшейтеді, зат алмасуды реттеуге және ас қорыту үдерістерін жақсартуға ықпал етеді.

Кептірілген өрік табиғи қанттарға, калийге, β-каротинге, пектиндерге және антиоксиданттарға бай [4]. Оны құрт өніміне енгізу арқылы өнімнің:

– биологиялық құндылығы,

– энергетикалық деңгейі,

– органолептикалық қасиеттері айтарлықтай жақсарады. Кептірілген өрікті түйе сүтінен дайындалған құртпен біріктіру жаңа органолептикалық үйлесім береді және функционалды тағамдық өнім алу мүмкіндігін кеңейтеді.

Осыған байланысты түйе сүтіне негізделген, кептірілген өрікпен байытылған ұлттық құрт өнімінің өндірістік технологиясын ғылыми тұрғыда әзірлеу – ұлттық тағамдарды жаңғырту, олардың тағамдық құндылығын арттыру және отандық нарыққа жаңа функционалды өнім шығару үшін маңызды әрі өзекті ғылыми-тәжірибелік міндет болып табылады [5].

Май мөлшері 0,6% болатын қалыпқа келтірілген сүт 80-85℃ температурада 10-20 минут пастерленіп, кейін 32-34℃ дейін салқындатылады. Сүтке 5% ұйытқы қосылып, ұйыған кезде қышқылдығы 75-76°Т жеткенше өңделеді. Сүзбе 38-42℃ температурада 20-30 минут ұсталып, сарысу бөлінген соң ылғалдылығы 76-80% деңгейінде 3-5 сағат бойы престеледі. Тұздалған құрт дайындалғанда сүзбені кептірмес бұрын тұз қосылады. Дайын құрт 20-60 г кесектерге пішінделіп, 35-40℃ температурадағы кептіргіш камераларда кептіріледі. Өнімнің май мөлшері 12%-дан кем, ылғалдылығы 17%-дан жоғары, тұзы 2,5%-дан аспауы тиіс, қышқылдығы 400°Т жетпеуі керек. Майлы құрттың сақтау мерзімі 3 айдан, ал майсыз құрттың сақтау мерзімі 9 айдан аспайды [6].

Құрт өнімдері үш түрге бөлінеді:

– тұздалған – сүзбеге тұз қосылып, шар немесе цилиндр пішінде қалыптап кептіріледі;

– қайнатылған – сүзбе 2-3 сағат қайнатылып, содан кейін пішінделіп кептіріледі;

– қайнатылған паста тәріздес – сорпаға қосуға арналған езбе құрт.

Өнімнің тағамдық және дәрумендік қасиеттерін арттыру үшін кептірілген өрік қосылады. Ол роза тұқымдасына жататын көпжылдық өсімдіктердің бірі. Олардың жемістерінде аскорбин қышқылы (С дәрумені), Р, В1, В2, А, К, Е дәрумендері, қанттар, талшықтар, пектиндер, органикалық қышқылдар, флавоноидтар, пигменттер, сондай-ақ темір, марганец, фосфор, магний және кальций тұздары кездеседі [7].

Кептірілген өрік – қазақтың дастарханында ежелден қолданылып келе жатқан табиғи өнім. Ол өзінің жоғары тағамдық құндылығымен, сақтауға ыңғайлылығымен және экологиялық тазалығымен ерекшеленеді. Кептірілген өрік ұлттық тағамдарды байытуға, олардың биологиялық және функционалдық қасиеттерін арттыруға мүмкіндік береді. Бұл өнімді өндіруде өріктің әртүрлі сұрыптары қолданылғанымен, Қазақстанда өсетін, ең көп таралған – сарғышкөк өрік болып табылады.

Сарғышкөк өрік (Prunus domestica var. domestica) – Қазақстанның оңтүстік және оңтүстік-шығыс өңірлерінде өседі. Алматы, Жетісу, Түркістан және Шымкент аймақтарындағы жылы климат, күн сәулесінің молдығы және топырақтың органикалық заттарға бай болуы мұндай өрік сұрыпының ерекше дамуына қолайлы жағдай жасайды. Сарғышкөк өріктің басты артықшылықтарының бірі – оның ірі, шырынды және қант мөлшері жоғары жемістер беруі. Бұл қасиет кептірілген өрік өндіру үшін аса маңызды, өйткені кептіру процесінде жемістің табиғи қанттары карамелденіп, дайын өнімге тән тәтті дәм мен хош иіс береді [8].

Сарғышкөк өрік құрамында 18-22% табиғи қанттар, органикалық қышқылдар, калий, магний, темір секілді минералдар және антиоксиданттық қасиетке ие фенолдық қосылыстар кездеседі. Осы себепті бұл сорттан дайындалған кептірілген өрік адам ағзасына пайдалы, энергия көзі ретінде тиімді, әрі дәстүрлі тағамдардың құндылығын арттыратын өнім болып саналады. Кептірілген жемістің құрылымы тығыз, түсі біркелкі қоңыр немесе алтын түсті болады, бұл сарғышкөк өріктің сапалы технологиялық қасиеттерін айқын көрсетеді.

Қазақстанда сарғышкөк өрігінің кең таралуы оның ауылшаруашылығындағы маңызды рөлін айқындайды. Бұл сұрыптың өнімділігі жоғары, құрғақшылыққа төзімділігі жақсы және күтімді көп қажет етпейді. Мұндай қасиеттері оны фермерлер үшін тиімді дақылға айналдырады. Сонымен қатар, сарғышкөк өріктен алынған кептірілген өрік ішкі нарықта ғана емес, сыртқы нарықта да сұранысқа ие, себебі оның экологиялық таза, табиғи және консервантсыз өндірілетіндігі экспорттық бәсекені күшейтеді.

Қазақстандағы кептірілген өрік өндірісінде сарғышкөк өріктің орны ерекше екені анық. Оның кең таралуы, биологиялық құндылығы, климатқа бейімділігі және жоғары сапалы кептірілген өнім беру қабілеті ұлттық тағамдар өндірісінде де, ауылшаруашылығы экономикасында да маңызды мәнге ие [9].

Зерттеу материалдары мен әдістері

Зерттеу нысандары – түйе сүті, кептірілген өрік және дайын өнім құрт. Тәжірибелік зерттеу жұмыстары «Сүт өнімдерін қайта өңдеуге арналған тәжірибелік өндіріс» цехында жүргізілді.

Зерттеу нысаны ретінде түйе сүті (Түркістан облысы) және кептірілген өрік қолданылды. Түйе сүті 500 мл көлеміндегі зарарсыздандырылған пластмасса бөтелкелерге асептикалық түрде жиналып, 4℃ температурада зертханаға жеткізілді.

Кептірілген өрік құрамында табиғи қанттар, минералдар, пектиндер және антиоксиданттар бар, бұл өнімнің тағамдық және функционалды құндылығын арттыруға мүмкіндік береді.

Зерттеу әдістері:

– сүттің физика-химиялық көрсеткіштері, ылғалдылық пен құрғақ зат мөлшерін анықтау (МЕМСТ 17626-81);

– қышқылдықты анықтау (МЕМСТ 3626-73);

– В тобының дәрумендерін анықтау (МЕМСТ 31483-2012);

– құрт өнімінің энергетикалық құндылығын есептеу;

Органолептикалық бағалау – дәмі, иісі, текстурасы бойынша дегустация, 10 дегустатор қатысқан, дайын өнімнің 4 үлгісі бағаланған [10].

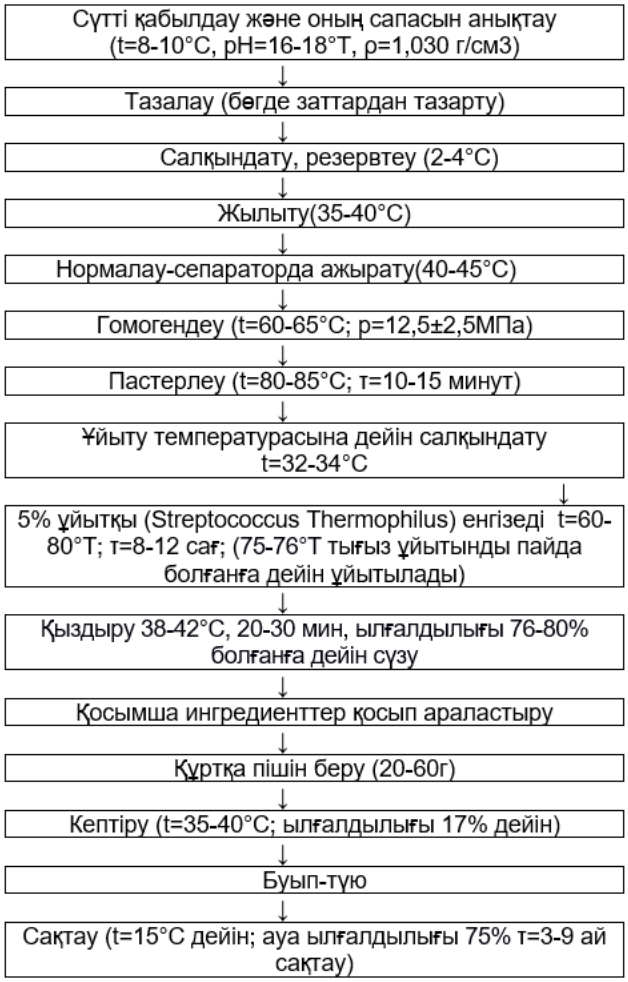
Нәтижелер және оларды талқылау

Зерттеу барысында түйе сүті мен кептірілген өрік негізінде ұлттық сүтқышқылды өнімнің 4 түрлі рецептурасы әзірленіп, технологиялық сұлбасы (1-сурет) дайындалды. Әр рецептурада (1-кесте) кептірілген өрік мөлшері мен пастерлеу параметрлері тәжірибелік түрде таңдалып, өнімнің физика-химиялық, органолептикалық және тағамдық қасиеттері бағаланды.

Кесте 1 – Кептірілген өрік қосылып дайындалған құрттың рецептурасы (100 г), %.

Шикізат атауы	Үлгілер			
	Бақылау үлгісі	№1	№2	№3
Сиыр сүтінен жасалған сүзбе	98	70	46	26
Түйе сүтінен жасалған сүзбе		25	46	65
Кептірілген өрік, %	-	3	5	7
Тұз, г	2	2	2	2
Барлығы, г	100	100	100	100

Жоғарыда 1-кестеде көрсетілген рецептура бойынша түйе сүті негізіндегі құрт өніміне кептірілген өрік қосу арқылы дайындау технологиясы әзірленді. Құрт өнімін дайындау технологиясы 1-суретте көрсетілген.



Сурет 1 – Кептірілген өрік қосылған құрт өндірісінің технологиясының сұлбасы

Майдың массалық үлесі 0,6% болатын қалыпқа келтірілген сүтті 80-85℃ температурада 10-20 минут ұстай отырып пастерленеді және 32-34℃ дейін салқындатылады, 5% мөлшерінде ұйытқы енгізіледі және ұйытқан кезде қышқылдығын 75-76°T дейін жеткізеді. Құрт өнімін дайындау үшін Streptococcus thermophilus GRAS (Generally Regarded As Safe) ұйытқысы қолданылады. Бұл ұйытқысының қауіпсіздігі халықаралық мойындалған және азық-түлік және фармацевтикалық салаларда шексіз пайдалануға, сонымен қатар балалардың өмірінің алғашқы күндерінен бастап пайдалануға мүмкіндік береді. Содан кейін сүзбені 38-42℃-қа дейін жылытып, сарысудың бөлінуін тездету үшін 20-30 минут ұстайды, сарысуды бөліп алып, ылғалдылығы 76-80% сүзбені 3-5 сағат престейді. Егер тұздалған құрт дайындалатын болса, онда сүзбені кептірмес бұрын тұздайды. Содан кейін құртты 20-60 г кесектерге пішіндейді және арнайы кептіру камераларында 35-40℃ температурада кептіреді.

Құртты 15℃-тан жоғары емес температурада және ауаның салыстырмалы аспайды ылғалдылығы 75%-дан аспайтын жағдайда сақтау керек. Құртты сақтау мерзімі құрттың түріне (құрғақ немесе жұмсақ) және сақтау жағдайына тікелей байланысты болады. Жақсы кептірілген және жеткілікті мөлшерде тұздалған құртты сақтау мерзімі 3–9 ай аралығында болады. Кейбір деректер бойынша дәстүрлі әдіспен жасалған, өте қатты құрт сапасын жоғалтпай 2 жылдан 5-6 жылға дейін сақтала береді. Құрт өніміндегі майдың массалық үлесі 12% кем емес, ылғалдылығы 17%, тұз 2,5% аспайды. Төменде өсімдік тектес шикізатпен байытылған құрт өнімінің физика-химиялық көрсеткіштері 2-кестеде көрсетілген.

Кесте 2 – Түйе сүтінің физика-химиялық көрсеткіштері

Көрсеткіштер	Орташа мәндер (түйе сүті)
Қышқылдылығы, °Т	0,14 – 0,18 % (немесе 1,4-1,8 °Т шамасында)
Май, %	10-15%
Құрғақ заттар, %	13,5-14,0%
Құрғақ майсыздандырылған сүт қалдығы, %	9,5 – 10,5 % (май мен суды алып тастағанда қалған)
Ақуыз, %	3,4-4,0%
Тығыздығы, кг/м^3	1,029-1,033 г/см^3

Кептірілген өрік қосылған құрттың органолептикалық көрсеткіштерін бағалау иісін, түсін, консистенциясын, сыртқы түрін анықтай отырып, дәм тату жолымен жүргізілді. 3-кестеде дайын өнімнің дегустациясының нәтижесі, яғни органолептикалық көрсеткіштері көрсетілген.

Кесте 3 – Кептірілген өрік қосылған құрттың органолептикалық көрсеткіштері

Үлгілер	Сыртқы түрі мен консистенциясы	Дәмі мен иісі	Түсі
Сиыр сүтінен жасалған құрт (қоспасыз)	Салмағы 2-60 гр дейін шар тәріздес. Біркелкі емес пішіндерге, ойықтарға және дөңгелек жиектерге рұқсат етіледі. Қатты және құрғақ.	Табиғи сүт дәмі, жеңіл қышқыл иіс	Ашық сүт түсті
Түйе сүтінен жасалған құрт (кептірілген өрік 3 %)	Біртекті, жұмсақ, кептірілген өріктің бөліктері байқалады, пішіні көбіне шар тәріздес, кептірілген өрік қосылғандықтан бетінде аздап ойықтар немесе текстурасында аздап айырмашылықтары пайда болуы мүмкін.	Кептірілген өріктің тәттілігі мен сүт дәмі үйлесімді	Сәл қоңыр реңкті
Түйе сүтінен жасалған құрт (кептірілген өрік 5 %)	Біртекті, қалыңдау, кептірілген өрік бөлігі көп, кептірілген өрік үлесі көбірек болғандықтан, салмағы біркелкі емес болуы мүмкін.	Кептірілген өріктің тәтті дәмі басым, сүт дәмі сақталған	Қоңыр реңкті ашық
Түйе сүтінен жасалған құрт (кептірілген өрік 7 %)	Шар тәріздес, бетінде кептірілген өрік бөлшектері байқалады, қаттыдан сәл жұмсаққа дейінгі консистенция; текстурасы біртектілігі аздап төмендеген.	Кептірілген өріктің тәтті дәмі басым, сүт дәмі сақталған, иісі жағымды.	Қоңыр реңкті, ашық қоңырдан қою қоңырға дейін.

Органолептикалық көрсеткіштер 10 баллдық жүйемен бағаланды. Жоғарғы баллмен (9,8 және 9,78) құрамында 5% кептірілген өрік қосылған құрт бағаланды. Бақылау үлгісі (қоспасыз құрт) және 3% кептірілген өрік қосылған үлгілер дәмі мен иісі бойынша 9,6 және 9,0 балл алды; құрамында 7% кептірілген өрік қосылған құрт – 9,4 және 9,2 баллмен бағаланды.

Органолептикалық көрсеткіштерге байланысты 4 үлгі таңдалды.

Органолептикалық көрсеткіштер мен кептірілген өріктің мөлшеріне байланысты ең қолайлы үлгі таңдалды. Сол үлгіде дәмі мен иісі жағымды, түсі мен консистенциясы тұрақты, тағамдық құндылығы жоғары болып шықты. Сонымен қатар, таңдалған үлгіде май, ақуыз және көмірсу мөлшері жақсы балансқа ие болып, энергетикалық құндылығы да жоғары деңгейде сақталды. Бұл нәтижелер ұлттық сүтқышқылды өнімді өндіруде кептірілген өрікті тиімді пайдалану мүмкіндігін дәлелдейді және өнімнің сапасы мен қоректік қасиеттерін арттыруға мүмкіндік береді. Құрт өнімінің дәмі, иісі және сыртқы түрі дұрыс, бөгде иістер мен дәмдер болмауы керек. Ұлттық бренд ретінде құрт өнімін таныту үшін арнайы қораптарға салынып, әрбір құрттың қаптамасында КО ТР 022/2011 және КО ТР 033/2013 техникалық регламенттеріне сәйкес тұтынушылар үшін ақпараты бар таңбалауды қолдану қамтамасыз етіледі. Төмендегі 4-кестеде бақылау үлгісі және 5 % кептірілген өрік қосылған құрттың химиялық құрамы көрсетілген

Кесте 4 – Құрт өнімінің химиялық құрамы, 100 г

Өнімнің химиялық құрамы	Бақылау үлгісі	5 % кептірілген өрік қосылған үлгі
Ақуыз, г	17,4	17,6
Көмірсу, г	44,4	53,2
Май, г	20,9	15
Энергетикалық құндылығы, ккал	230,6	197,3

5-кестеде МЕМСТ 17626-81 және МЕМСТ 3626-73 әдістері бойынша дайын өнімнің физика-химиялық көрсеткіштері анықталды [11, 12].

Кесте 5 – Құрттың физика-химиялық көрсеткіштері

Көрсеткіштердің атауы	Сиыр сүтінен жасалған құрт (қоспасыз)	Түйе сүтінен жасалған құрт (кептірілген өрік 5 %)
Қышқылдылығы °Т	1,5	1,7
Ылғалдылығы, %	63	60

Бақылау үлгісін және оңтайлы нәтиже көрсеткен 5 % кептірілген өрік қосылып дайындалған құрттың құрамындағы В тобының дәрумендерін анықтау үшін Алматы қаласындағы «Алматы технологиялық университеті» АҚ-ның аккредитациядан өткен «Азық-түлік өнімдерінің сапасын және қауіпсіздігін бағалау» ғылыми-зерттеу зертханасына жіберіліп, нәтижелер алынды, ол төмендегі 6-кестеде көрсетілген.

Кесте 6 – В тобының дәрумендері, мг/100 г

Көрсеткіштердің атауы, өлшем бірліктері В тобының дәрумендері, мг/100 г, оның ішінде	Сиыр сүтінен жасалған құрт (қоспасыз)	Түйе сүтінен жасалған құрт (кептірілген өрік 5 %)	Сынақ әдістерінің НҚ
- B_1	0,050±0,011	0,057±0,011	МЕМСТ 31483-2012
- B_2	0,201±0,0875	0,208±0,087	
- B_3	4,01±0,818	4,22±0,844	
- B_5	0,317±0,064	0,330±0,066	
- B_6	0,117±0,023	0,125±0,025	
- B_c	0,05±0,01	0,055±0,001	

Қорытынды

Жүргізілген зерттеу жұмыстарының нәтижесі бойынша дайын өнімнің сапасын сақтау, сондай-ақ тағамдық құндылығын арттыру үшін өндіріске кептірілген өрік енгізу мүмкіндігі қарастырылды. Кептірілген өрік қосылған құрт өндірісінің технологиясы әзірленді; құрт өнімінің физика-химиялық көрсеткіштері МЕМСТ 17626-81 және МЕМСТ 3626-73 талаптарына сәйкес анықталды. Дайын өнімнің органолептикалық көрсеткіштері бағаланды, тағамдық және энергетикалық құндылығы есептелді. Құрамындағы В тобының дәрумендер тобы анықталды. Зерттеу нәтижелеріне сүйене отырып, ұсынылып отырған кептірілген сарғыш өрік қосылған ұлттық құрт өнімі табиғи, сапалы және жалпыға тұтынылатын өнім болып саналады.

Әдебиеттер тізімі

1. Қазақстан Республикасының агроөнеркәсіптік кешенін дамытудың 202-–2030 жылдарға арналған тұжырымдамасын бекіту туралы. https://baiterek.gov.kz/en/programs/concept-of-development-of-agro-industrial-complex-of-the-republic-of-kazakhstan-for-2021-2030-years. (қарау күні 18.12.2025).
2. Крючкова, В.В. Технология молока и молочных продуктов: учебное пособие / В.В. Крючкова. – Персиановский: Донской государственный аграрный университет, 2018. – 115 С.
3.Ториков, В.Е. Культивируемые и дикорастущие лекарственные растения: монография / В.Е.Ториков, И.И. Мешков. – 2-е изд. – Санкт-Петербург: Лань, 2023. – С. 111-113.
4. Sahingil D. Enrichment of antioxidant activity, phenolic compounds, volatile composition and sensory properties of yogurt withrosehip (Rosa canina L.) fortification / D. Sahingil, A.A. Hayaloglu // International Journal of Gastronomy and Food Science. – 2022. – Vol. 28. – P. 1-3.
5. Vitamin C bioaccessibility of commercially available dietary supplements: Quantity vs efficiency, does it matter? / B. Hatice Tuna et al // Journal of Food Composition and Analysis. – 2023. – Vol. 123. – P. 1-4.
6. Properties of Low-Fat Cheddar Cheese Prepared from Bovine-Camel Milk Blends: Chemical Composition, Microstructure, Rheology and Volatile Compounds / Abdelmoneim H. Ali et al //Journal of Dairy Science. – 2023. – Vol.107(5). – P. 2706-2720. https://doi.org/10.3168/jds.2023-23795.

7. INVITED REVIEW: Camel Milk and Gut Health: Understanding Digestibility and the Impact on Gut Microbiota / Abdelmoneim H. Ali et al // Journal of Dairy Science. – 2023. – P. 2573-2585 https://doi.org/10.3168/jds.2023-23995.
8. Разработка ХАССП-ПЛАНА ДЛЯ творожного десерта с добавлением растительных ингредиентов (боярышник, абрикос, морковь) / Г.Э. Орымбетова и др. // Вестник Алматинского технологического университета. – 2018. – № 1. – С. 42-46. https://www.vestnik-atu.kz/jour/article/view/36/38.
9. Алимарданова М.К. Совершенствование технологии кисломолочных продуктов функционального назначения / М.К. Алимарданова, В.И. Петченко, А.А. Елемесова // Продукты питания: Производство, безопасность, качество. – 2019. – С. 59. https://doi.org/10.55956/LCYR5424.
10. Мустафаева А.К. Разработка технологии производства национального кисломолочного продукта из верблюжьего молока. Механика и технологии / А.К. Мустафаева, Б/ Калемшарив, А. Жандауова / Научный журнал. – 2024. – № 4(86). – С. 9-16. https://doi.org/10.55956/QKOR8581.
11. ГОСТ 17626-81. Казеин технический. Технические условия. – Введ. 01.01.1982. – М.: Стандартинформ, 2008. – 21 с.
12. ГОСТ 3626-73. Молоко и молочные продукты. – Введ. 01.07.1974. – М.: Стандартинформ, 2009. – 15 с.

References

1. Kazakstan Respublikasynyң agroonerkasiptik keshenin damytudyn 2020-2030 zhyldarga arnalgan tuzhyrymdamasyn bekitu turaly. https://baiterek.gov.kz/en/programs/concept-of-development-of-agro-industrial-complex-of-the-republic-of-kazakhstan-for-2021-2030-years. (қарау kүni 18.12.2025). (In Kazakh).
2. Kryuchkova, V.V. Tekhnologiya moloka i molochnykh produktov: uchebnoe posobie / V.V. Kryuchkova. – Persianovskii: Donskoi gosudarstvennyi agrarnyi universitet, 2018. – 115 S. (In Russian).
3. Torikov, V.E. Kul'tiviruemye i dikorastushchie lekarstvennye rasteniya: monografiya / V.E. Torikov, I.I. Meshkov. – 2-e izd. – Sankt-Peterburg: Lan', 2023. – S. 111-113. (In Russian).
4. Sahingil D. Enrichment of antioxidant activity, phenolic compounds, volatile composition and sensory properties of yogurt withrosehip (Rosa canina L.) fortification / D. Sahingil, A.A. Hayaloglu // International Journal of Gastronomy and Food Science. – 2022. – Vol. 28. – P. 1-3. (In English).
5. Vitamin C bioaccessibility of commercially available dietary supplements: Quantity vs efficiency, does it matter? / B. Hatice Tuna et al // Journal of Food Composition and Analysis. – 2023. – Vol. 123. – P. 1-4. (In English).
6. Properties of Low-Fat Cheddar Cheese Prepared from Bovine-Camel Milk Blends: Chemical Composition, Microstructure, Rheology and Volatile Compounds / Abdelmoneim H. Ali et al //Journal of Dairy Science. – 2023. – Vol.107(5). – P. 2706-2720. https://doi.org/10.3168/jds.2023-23795. (In English).
7. INVITED REVIEW: Camel Milk and Gut Health: Understanding Digestibility and the Impact on Gut Microbiota / Abdelmoneim H. Ali et al // Journal of Dairy Science. – 2023. – P. 2573-2585 https://doi.org/10.3168/jds.2023-23995. (In English).
8. Razrabotka KHASSP-PLANA DLYa tvorozhnogo deserta s dobavleniem rastitel'nykh ingredientov (boyaryshnik, abrikos, morkov') / G.Eh. Orymbetova i dr. // Vestnik Almatinskogo tekhnologicheskogo universiteta. – 2018. – № 1. – S. 42-46. https://www.vestnik-atu.kz/jour/article/view/36/38. (In Russian).
9. Alimardanova M.K. Sovershenstvovanie tekhnologii kislomolochnykh produktov funktsional'nogo naznacheniya / M.K. Alimardanova, V.I. Petchenko, A.A. Elemesova // Produkty pitaniya: Proizvodstvo, bezopasnost', kachestvo. – 2019. – S. 59. https://doi.org/10.55956/LCYR5424. (In Russian).
10. Mustafaeva A.K. Razrabotka tekhnologii proizvodstva natsional'nogo kislomolochnogo produkta iz verblyuzh'ego moloka. Mekhanika i tekhnologii / A.K. Mustafaeva, B/ Kalemshariv, A. Zhandauova / Nauchnyi zhurnal. – 2024. – № 4(86). – S. 9-16. https://doi.org/10.55956/QKOR8581. (In Russian).

11. GOST 17626-81. Kazein tekhnicheskii. Tekhnicheskie usloviya. – Vved. 01.01.1982. – M.: Standartinform, 2008. – 21 s. (In Russian).
12. GOST 3626-73. Moloko i molochnye produkty. – Vved. 01.07.1974. – M.: Standartinform, 2009. – 15 s. (In Russian).

A. Mustafaeva[*], R. Askar[1], Sh Saken[1],E. Mutaliev[1], G. Abdilova[2]
S. Seifullin Kazakh Agro Technical Research University,
010011, Republic of Kazakhstan, Astana, Zhenis avenue, 62
[2]Shakarim University,
071412, Republic of Kazakhstan, Semey, 20 A, Glinki str.
[*]e-mail: ayaulym.mustafa@mail.ru

TECHNOLOGY OF PRODUCTION OF NATIONAL FERMENTED MILK PRODUCT

This scientific study, taking into account the biochemical and technological advantages of camel milk, developed a technology for producing national kurt with the addition of dried apricot (kuraga). The research analyzed the physicochemical properties of camel milk, its natural parameters suitable for fermentation, and its efficiency in the production of fermented milk products.

The nutritional and functional properties of kuraga, including natural sugars, potassium, β-carotene, and pectins, were used to improve the quality characteristics of kurt.

The study included determining the chemical composition, organoleptic characteristics, moisture content, acidity, and energy value of the final product. Samples with 3% , 5%, 7% kuraga were comparatively studied, and the 5% kuraga variant was found to be the most effective in terms of taste, structure, and vitamin content. The content of B vitamins in the selected sample showed the following results: B1 – 0.057±0.011, B2 – 0.208±0.085, B3 – 4.22±0.818, B5 – 0.330±0.064, B6 – 0.125±0.023.

As a result, a scientifically justified technological scheme for producing kurt from camel milk with the addition of kuraga was proposed, which increases the nutritional value and functional properties of the product. This technology promotes the modernization of national products and expands their market demand.

Key words: *camel milk, cow's milk, national fermented milk product, kurt, kuraga.*

А.К. Мустафаева[*], Р. Асқар[1], Ш. Сәкен[1], Е.Б. Муталиев[1], Г.Б. Абдилова[2]
Казахский агротехнический исследовательский университет имени Сакена 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

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА НАЦИОНАЛЬНОГО КИСЛОМОЛОЧНОГО ПРОДУКТА

В данной научной работе с учетом биохимических и технологических преимуществ верблюжьего молока разработана технология производства национального курта с добавлением кураги. В ходе исследования анализировались физико-химические свойства верблюжьего молока, его естественные параметры, способствующие заквашиванию, а также эффективность при производстве молочнокислых продуктов.

Пищевые и функциональные свойства кураги, в частности натуральные сахара, калий, β-каротин и пектины, использовались для улучшения качественных характеристик курта.

Работа включала определение химического состава готового продукта, органолептических показателей, влажности, кислотности и энергетической ценности. Были сравнительно исследованы образцы с добавлением 3%, 5%, 7% кураги, из которых вариант с 5% курагой оказался наиболее эффективным по вкусовым, структурным и витаминным показателям. Содержание витаминов группы В выбранном образце показало следующие результаты: В1 – 0,057±0,011, В2 – 0,208±0,085, В3 – 4,22±0,818, В5 – 0,330±0,064, В6 – 0,125±0,023.

В результате работы предложена научно обоснованная технологическая схема производства курта из верблюжьего молока с добавлением кураги, что позволяет повысить пищевую ценность и функциональные свойства продукта. Эта технология способствует обновлению национальных продуктов и расширению их спроса на рынке.

Ключевые слова: *верблюжье молоко, коровье молоко национальный молочнокислый продукт, курт, курага.*

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.

Раушан Асқар – студент, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана, Қазақстан; e-mail: raushan.askar@internet.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-6914-9050.

Шолпан Сәкен – студент, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана, Қазақстан; e-mail: sakensholpan969@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-0308-008X.

Ербол Баратұлы Муталиев – магистрант, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана, Қазақстан; e-mail emutaliev56@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-6223-1077.

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.

Раушан Аскар – студентка, Казахский агротехнический исследовательский университет имени Сакена Сейфуллина», Астана, Казахстан; e-mail: raushan.askar@internet.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-6914-9050.

Шолпан Сәкен – студент, Казахский агротехнический исследовательский университет имени Сакена Сейфуллина», Астана, Казахстан; e-mail: sakensholpan969@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-0308-008X.

Ербол Баратулы Муталиев – магистрант, Казахский агротехнический исследовательский университет имени Сакена Сейфуллина, Астана, Казахстан; e-mail emutaliev56@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-6223-1077.

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.

Raushan Askar – student, Saken Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Kazakhstan; e-mail: raushan.askar@internet.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-6914-9050.

Sholpan Saken – student, Saken Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Kazakhstan; e-mail: e-mail: sakensholpan969@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-0308-008X.

Erbol Mutaliev – master's student, Saken Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Kazakhstan; e-mail emutaliev56@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-6223-1077.

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 30.03.2026
Өңдеуден кейін түсуі 15.04.2026
Жариялауға қабылданды 22.04.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-29

IRSTI: 65.65.03

Sh.Zh. Zhaskairat*, Mohammad Rashedi Ismail Fitry[2,3], A.K. Igenbayev[1] A.K. Mustafaeva[1], A.K. Zhumagalieva[1]

[1]Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin,
010000, Republic of Kazakhstan, Astana, Zhenis Avenue, 62
[2]Department of Food Technology, Faculty of Food Science and Technology,
Universiti Putra Malaysia, 43400 UPM Serdang, Selangor, Malaysia
[3]Halal Products Research Institute, Universiti Putra Malaysia,
43400 UPM Serdang, Selangor, Malaysia
*e-mail: shynarai_92@mail.ru

DEVELOPMENT OF A POLYCOMPONENT FAT EMULSION AND STUDY OF ITS PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES

Summary: *This article focuses on the development of a polycomponent fat emulsion and the investigation of its physicochemical properties. The emulsion exhibited a moderately acidic pH of 5.64 ± 0.12, indicating suitability for food applications and consistent structural stability. The structured lipid matrix, formed by rice bran wax and stabilized with chickpea flour, maintained emulsion integrity during storage at 4 °C. Water activity (aw) was measured at 0.947, reflecting a relatively high level of free moisture typical of oil-in-water food emulsions, emphasizing the need for proper storage conditions to ensure microbiological stability. Rheological analysis revealed shear-thinning behavior, with apparent viscosity decreasing from 83.43 to 29.60 mPa·s as rotational speed increased, demonstrating progressive disruption of internal interactions under stress. Color and oil binding capacity measurements confirmed a visually uniform and stable system. Overall, the emulsion combines improved lipid composition with desirable technological properties and has potential as a structured fat system or partial animal fat replacer in various food products. Further studies will investigate the possibility of using this emulsion as a partial animal fat replacer in cooked sausage products.*

Key words: *polycomponent emulsion; safflower oil; horse fat; rice bran wax; chickpea flour; polyunsaturated fatty acids; fat replacer.*

1 Introduction

Meat and dairy products are widely consumed worldwide due to their palatability, convenience, and affordability. However, these food categories are typically characterized by a high content of saturated fatty acids, excessive intake of which has been associated with an increased risk of cardiovascular diseases, obesity, hypercholesterolemia, and hypertension [1, 2].

A promising strategy to mitigate these health concerns involves the partial or complete replacement of saturated fats with plant-based oils and lipids. Similar to conventional animal fats, vegetables oils contribute significantly to the sensory attributes of food products by influencing color, flavor development during thermal processing, and overall taste. They also enhance mouthfeel and promote satiety [3].

Compared with protein or carbohydrate based fat substitutes, which often fail to fully replicate the functional and sensory properties of fats, plant oils represent a more technologically suitable and organoleptically acceptable alternative [4].

Moreover, plant oils possess a more favorable fatty acid profile, being rich in unsaturated fatty acids, including monounsaturated fatty acids (MUFAs) and polyunsaturated fatty acids (PUFAs). These fatty acids have been linked to reduced low-density lipoprotein cholesterol levels and decreased inflammatory responses associated with cardiovascular diseases [5].

Animal fats play a crucial technological, sensory, and nutritional role in food products. They contribute significantly to texture, flavor intensity, and juiciness, thereby enhancing overall product quality [6].

However, saturated fats are energy-dense components and are recognized as a major contributor to elevated plasma cholesterol levels, which are associated with an increased risk of

©Sh.Zh. Zhaskairat, Mohammad Rashedi Ismail Fitry, A.K. Igenbayev, A.K. Mustafaeva, A.K. Zhumagalieva, 2026

cardiovascular diseases. These conditions pose a significant health threat, particularly for individuals with coronary artery disorders [7].

Amid growing concerns regarding environmental sustainability, animal welfare, and the potential for allergic reactions, the incorporation of alternative plant-based ingredients into food formulations has gained increasing attention and popularity [8].

2 Materials and methods

The study materials included safflower oil and horse abdominal fat as sources rich in polyunsaturated fatty acids, while rice bran wax was used as a structuring agent, and chickpea flour and water served as stabilizing components. Rice bran wax (RBW) was supplied by a certified food-grade manufacturer, while the remaining ingredients were purchased from a local market. The experiments were conducted in the research laboratory of S.Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University. The prepared samples were stored at 4 °C for 24 hours prior to analysis.

The oil content in safflower seeds ranged from 23.08% to 36.51%. Linoleic acid was identified as the predominant fatty acid in safflower oil, accounting for 55.1-77.0% of the total fatty acid composition, with an average value of 70.66% [9].

Horse fat also contains significant polyunsaturated fatty acids (PUFAs), particularly linoleic acid (18:2n-6) and alpha-linolenic acid (18:3n-3), the levels of which may vary depending on the animal's diet and breed [10].

Chickpea flour was incorporated as a natural emulsifier due to its content of proteins and phospholipids. These components absorb at the oil-water interface, forming a protective layer around lipid droplets and thereby preventing phase separation of the emulsion. In addition, chickpea flour contributes to structural stabilization and enhances fat-binding capacity, which is particularly important in systems with a high proportion of animal fat [11].

Rice bran wax (RBW), a by-product of rice milling, is a sustainable, low-cost, and natural gelator composed primarily of long-chain saturated fatty alcohols and esters. Several studies have shown the successful use of rice wax to structure oils such as soy, sunflower, and corn, improving their oxidative stability, mechanical strength, and suitability for use in baked goods, spreads, and meat substitutes [12].

2.1 Emulsion Preparation

The emulsions were prepared using safflower oil and horse abdominal fat structured with rice bran wax (RBW), chickpea flour, and water. The optimal formulation was determined using a mathematical model developed in Minitab 19 software. The visual appearance and structural differences of the emulsions are presented in Figure 1.



Figure 1 – The visual appearance and structural differences of the emulsions

First, horse abdominal fat was melted in a thermostat at 60°C for 30 minutes. Subsequently, rice bran wax, previously melted in a water bath at 75°C for 10 minutes, was blended with safflower oil and added to the melted fat phase. Chickpea flour was dispersed in water and allowed to hydrate for 15 minutes. All components were then combined and homogenized for 15 minutes. The resulting mixture was cooled at room temperature for 30 minutes, followed by storage at 4 °C for 24 hours to allow gel formation. The emulsions were stored in airtight containers to prevent oxidation prior to analysis. All analytical measurements were performed in triplicate for each batch, and the results are presented as mean values ± standard deviation. The visual appearance and structural differences of the emulsions presented in Figure 2.

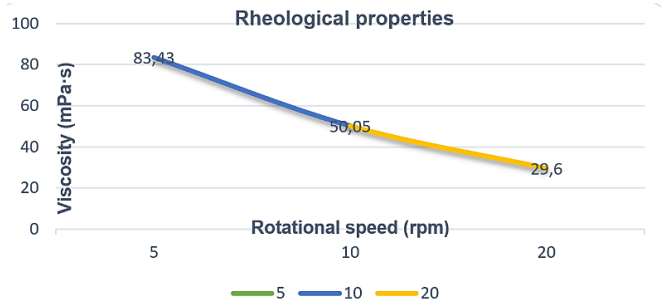


Figure 2 – The rheological indicators of the emulsion

2.2 Texture analysis

The texture profile attributes of the emulsions, firmness and spreadability, were analyzed by a Texture AnalyzerTX-700 (France). Such parameters are crucial to mimic the sensory and mechanical responses of the gels during their manipulation and food processing. For all tests, emulsion samples were prepared using cylindrical molds and equilibrated at room temperature (25°C) for a minimum of 1 h before testing [13]. A cylindrical stainless steel (5 mm diameter) probe was inserted into the gel surface at 1 mm/s to a set depth of 10 mm. The penetrating force was reported as firmness (N), and the spreadability was estimated from the area under the curve or lower resistance during penetration. All results were obtained in triplicate, and values represent mean ± SD. This approach is a model of application in which emulsions are spread or cut and mimics normal texture profile analysis setup used in lipid structuring research.

2.3 Determination of pH acidity

The acidity (pH) of meat was determined by the potentiometer method. To obtain information, the pH tester METTLER TOLEDO (Switzerland) portable conductometer S3 Standard Kit was used. Before analysis, the pH tester is calibrated using a special standard solution mixed with distilled water with PH 4.0 and 7.0. This was done simply by immersing two electrodes in the solution and taking a pointer. The sample was made 3 times, and then the average indicator of the samples was calculated.

2.4 Emulsion Colour

The colour of the emulsions was assessed using a Chroma Meter CR-400 (Konica Minolta, Inc., Tokyo, Japan). The results were express in accordance with the CIELAB system with reference to illuminate D65 and a visual angle of 10◦ . The parameters determined were L* (L* = 0 (black) and L* = 100 (white)), a* (−a* = greenness and +a* = redness), b* (−b* = blueness and +b* = yellowness). The samples were poured into a granular-materials attachment CR-A50 (Konica Minolta, Inc., Tokyo, Japan) and measured in triplicate.

2.5 Oil Binding Capacity (OBC)

Oil binding capacity (OBC) was measured to evaluate the ability of the oleogel network to retain oil under centrifugal force. Approximately 5 g of each oleogel sample was centrifuged at 4000 rpm for 20 min at 25°C. The released oil was decanted and weighed, and OBC was calculated as the percentage of oil retained within the gel matrix. Increased RBW content resulted in a more cohesive crystalline network and higher OBC.

The Oil Binding Capacity was calculated using the formula:

$$\mathrm{OBC} = \frac{\mathrm{Wi} - \mathrm{Wo}}{\mathrm{W1}}$$

Where Wi: initial sample weight, Wo: weight of separated oil.

Analyses were performed in triplicate and the means were calculated. This procedure is a modification of the methods published, ensuring consistency with prior research.

2.6 The water activity (aw)

The water activity (aw) of the developed emulsion was determined using an AQUALAB 4TE water activity analyzer. Prior to analysis, the instrument was calibrated using standard salt solutions according to the manufacturer's instructions. Approximately 2 g of the emulsion sample was placed into a measurement cup and inserted into the instrument chamber.

Measurements were carried out at a constant temperature of 25°C. The instrument sensor measures the equilibrium vapor pressure of water above the sample and automatically calculates the water activity value.

All measurements were performed in triplicate, and the results were expressed as mean value ± standard deviation.

3 Results and Discussion

The rheological properties of the emulsion were evaluated using a structurometer under controlled rotational speeds of 5, 10, and 20 rpm. Apparent viscosity (mPa·s) and torque (%) were recorded for each measurement. All analyses were performed at constant temperature conditions.The rheological indicators of the emulsion presented in Figure 2.

The apparent viscosity of the emulsion decreased from 83.43 to 29.60 mPa·s as the rotational speed increased from 5 to 20 rpm, indicating a shear-thinning behavior. Such rheological characteristics are typical for structured emulsion systems where internal interactions between dispersed droplets weaken under shear stress.

The torque value at 20 rpm (10,5%) was within the recommended measurement range, ensuring the reliability of the obtained data. Lower rotational speeds resulted in borderline torque values, which were considered for trend analysis only. Pang, M. et al. studied the rheological properties of the emulsion developed by the authors as a fat substitute in the manufacture of food products [14, 15].

The studied emulsion exhibited pseudoplastic flow behavior, combining structural stability at rest with improved flowability under processing conditions.

The pH indicators of the emulsion presented in Figure 3.

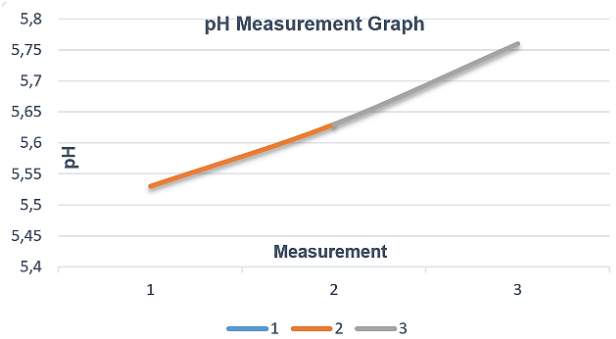


Figure 3 – pH indicators of the emulsion

The pH value of the emulsion was determined in triplicate. The mean pH was 5.64 ± 0.12 at 26.1°C, indicating slight acidity and stability of the emulsion system. Zhang H et al. studied the purpose of this study was to investigate the influence of pH on properties and stability of oil-in-water emulsions using pectin as an emulsifier and zein as an auxiliary emulsifier [16]. The color parameters of the emulsion presented in Figure 4.

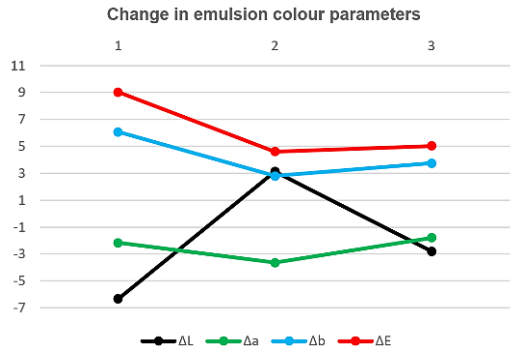


Figure 4 – The color parameters of the emulsion

The color parameters of the emulsion were determined using a colorimetric method. The color characteristics were evaluated in the CIELab color space (L*, a*, b*), and the differences were

expressed as ΔL, Δa, Δb and the total color difference ΔE. The sample was measured three times during the study.

According to the obtained results, during the first measurement the following values were recorded: ΔL = -6.33, Δa = -2.17 and Δb =+6.07. The negative value of ΔL indicates a decrease in lightness, meaning that the emulsion appeared darker compared to the reference. The negative Δa value indicates a slight shift of the color toward the green region. Meanwhile, the positive Δb value indicates the predominance of a yellow hue in the emulsion. In this measurement, the total color difference was ΔE = 9.03, which indicates a noticeable color change in the sample.

During the second measurement, the values ΔL = +3.14, Δa = -3.65 and Δb = +2.82 were obtained. The positive ΔL value indicates an increase in the lightness of the emulsion. At the same time, the negative Δa value suggests the presence or strengthening of a greenish tone. Although the Δb value remained positive, its magnitude decreased compared to the first measurement, indicating a reduction in the yellow hue. The total color difference in this case was ΔE =5.58, which is lower than in the first measurement and indicates a reduced level of color variation.

The third measurement showed the following results: ΔL = -2.81, Δa =-1.79 and Δb =+3.77. In this case, the lightness of the emulsion slightly decreased again, although the change was not significant. The Δa parameter indicates a weak shift toward the green region, while the positive Δb value shows that the yellow hue remained present in the emulsion. The overall colour difference was ΔE = 5.03.

Overall, the obtained results demonstrate that although some variations in colour parameters were observed between measurements, the decrease in ΔE values indicates a relative stabilization of the colour characteristics. This behavior may be associated with a more uniform distribution of components within the emulsion system and formation of a more stable structure. R. Chanamai et al. studied the effect of droplet characteristics on the transmission of light through diluted monodisperse oil-water emulsions in the presence and absence of a dye [17].

The structural stability of the emulsion was evaluated using the centrifugation method. The initial mass of the emulsion sample was 2.86 g and after centrifugation 0.51 g of liquid phase was separated.

The calculated structural stability of the emulsion was 82.2%. This result indicated that the emulsion system possesses relatively good structural stability and that the dispersed phase droplets are sufficiently stabilized within the system. Wijarnprecha K. et al. studied the Structural and rheological properties of oleogels consisting of 0.5–25 wt % rice bran wax (RBX) in rice bran oil (RBO) were explored [18].

According to the literature data, the water activity of food emulsions typically ranges from 0.90 to 0.95. For example, a study published in Food Chemistry reported aw values of 0.904 for butter, 0.914 for margarine, and 0.947 for mayonnaise emulsions [19]. The water activity obtained in the present study (aw=0.947) is consistent with these literature values and indicates a relatively high level of free water within the emulsion system. The water activity of the emulsion presented in Figure 5.



Figure 5 – The water activity of the emulsion

Conclusion

The developed emulsion demonstrated satisfactory physicochemical properties. The pH value (5.64 ± 0.12) indicates a moderately acidic environment suitable for food applications and consistent system stability. The structured lipid matrix formed by rice bran wax and stabilized by chickpea proteins contributed to maintaining emulsion integrity during storage at 4°C.

Rheological analysis confirmed that the system exhibits shear-thinning (pseudoplastic) behavior, with apparent viscosity decreasing from 83.43 to 29.60 mPa·s as rotational speed

increased from 5 to 20 rpm. This behavior reflects the progressive disruption of internal structural interactions under shear stress. The torque value at 20 rpm (10.5%) fell within the recommended measurement range, supporting the reliability of the obtained data.

The water activity (aw) of the developed emulsion was 0.947, indicating the presence of a relatively high level of free moisture in the system. Such values are typical for oil-in-water food emulsions and suggest that proper storage conditions, such as refrigeration and appropriate packaging, are necessary to ensure microbiological stability.

The emulsion colour parameters indicated a uniform and stable appearance of the system, which is an important quality attribute for consumer acceptance and product standardization. The presence of safflower oil and structured lipid components contributed to the formation of a visually homogeneous emulsion matrix.

In addition, the oil binding capacity (OBC) analysis demonstrated the ability of the structured lipid system to effectively retain oil within the matrix. This property is associated with the network formed by rice bran wax and the stabilizing action of chickpea proteins, which prevent oil separation and enhance structural stability.

Overall, the studied emulsion combines improved lipid composition with desirable technological performance. It demonstrates structural stability at rest, adequate acidity parameters, and favorable rheological characteristics for processing. These properties suggest its potential application as a structured fat system or partial animal fat replacer in food products.

References

1. The role of plant oils/lipids as innovative fat replacers in various food products: A review / Kok Jia-Wei et al // Applied Food Research. – 2025. – Vol. 5, Issue 1. https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.101010.
2. Dragoev S.G. Lipid peroxidation in muscle foods: Impact on quality, safety and human health / S.G. Dragoev // Foods. – 2024. – V. 13, № 5. – P. 797. https://doi.org/10.3390/foods13050797.
3. Edible plant oil: Global status, health issues, and perspectives / Y. Zhou et al // Frontiers in Plant Science. – 2020. – № 11. – P. 1315. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01315.
4. Incorporation of different physical forms of fat replacers in the production of low-fat/reduced-fat meat products: Which is more practical? / A.B. Asyrul-Izhar et al // Food Reviews International. – 2023. – № 39(9). – P. 6387-6419. https://doi.org/10.1080/87559129.2022.2108439.
5. Wallis J.G. Molecular approaches reduce saturates and eliminate trans fats in food oils / J.G. Wallis, J.D. Bengtsson, J. Browse // Frontiers in Plant Science. – 2022. – № 13, Article 908608. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.908608.
6. Potential Use of Nonanimal-Based Biopolymers as Gelling/Emulsifying Stabilizing Agents to Reduce the Fat Content in Foods: A Review / Mahsa Rezaee, Mohammed Aider // ACS Food Science & Technology. – 2022. – № 2(5). – P. 751-762. https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.2c00031.
7. Chaves K.F. Potential application of lipid organogels for food industry / K.F. Chaves, D. Barrera-Arellano, A.P.B. Ribeiro, // Food Res. Int. – 2018. – № 105. – P. 863-872. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.12.020.
8. Review on fat replacement using protein-based microparticulated powders or microgels: A textural perspective / B. Kew et al // Trends Food Sci. Technol. – 2020. – № 106. – P. 457-468. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.10.032.
9. Matthaus B. Fatty acid composition and tocopherol profiles of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) seed oils / B. Matthaus, M.M. Özcan, F.Y. Al Juhaimi // Natural Product Research. – 2015. – № 29(2). – P. 193-196. https://doi.org/10.1080/14786419.2014.971316.
10. Fatty Acid Content and Composition of the Yakutian Horses and Their Main Food Source: Living in Extreme Winter Conditions / K.A. Petrov et al // Biomolecules. – 2020. – № 10. – P. 315. https://doi.org/10.3390/biom10020315.
11. Fatty acid composition and genome-wide associations of a chickpea (*Cicer arietinum* L.) diversity panel for biofortification efforts / S. Salaria et al // Sci Rep. – 2023. – № 13. – P. 14002. https://doi.org/10.1038/s41598-023-41274-3.

12. Effect of Vegetable Oil Unsaturation and Minor Polar Components on the Physical Properties of Rice Bran Wax Oleogels / H.S. Hwang et al // Journal of Food Science. – 2025. – Vol. 90, № 1. – P. e17613. https://doi.org/10.1111/1750-3841.17613.
13. . “Food-Grade Oleogels: Trends in Analysis, Characterization, and Applicability / S. Perța-Crișan et al // Gels. – 2023. – Vol. 9, № 5. – P. 386. https://doi.org/10.3390/gels9050386.
14. Physicochemical Properties and Cookie-Making Performance as Fat Replacer of Wax-Based Rice Bran Oil Oleogels / M. Pang et al // Gels. – 2022. – Vol. 9, № 1. – P. 13. https://doi.org/10.3390/gels9010013.
15. Effects on the Physical Properties of Corn Oil Oleogels Structured with Different Ratios of Rice Bran or Carnauba Waxes / J. Jones et al // Journal of the American Oil Chemists Society. – 2022. – № 99. – P. 75.
16. Zhang H. Effect of pH on stability of oil-in-water emulsions stabilized by pectin–zein complexes / H. Zhang, Y. Wang, X. Li // Advanced Materials Research. – 2013. – Vol. 747. – P. 127-130. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.747.127.
17. Chanamai R. Prediction of emulsion color from droplet characteristics: dilute monodisperse oil-in-water emulsions / R. Chanamai, D.J. McClements // Food Hydrocolloids. – 2001. – Vol. 15, Issue 1. – P. 83-91. https://doi.org/10.1016/S0268-005X(00)00055-2.
18. Structure and rheology of oleogels made from rice bran wax and rice bran oil / Khakhanang Wijarnprecha et al // Food Research International. – 2018. – Т. 112. – Н. 199-208. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.06.005.
19. Cimander C. Water activity and chemical composition of some food emulsions / C. Cimander, N.-G. Carlsson, H. Lingnert // Food Chemistry. – 1992. – Vol. 45, № 2. – P. 91-93. https://doi.org/10.1016/0308-8146(92)90015-T.

Ш.Ж. Жасқайрат[*], Mohammad Rashedi Ismail Fitry[2,3], А.К. Игенбаев[1], А.К. Мустафаева[1], А.К. Жумагалиева[1]
[1]Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина,
010000, Республика Казахстан, г. Астана, проспект Женис, 62
[2]Кафедра пищевых технологий, факультет пищевой науки и технологий,
Universiti Putra Malaysia,
43400 UPM Serdang, штат Селангор, Малайзия
[3]Halal Products Research Institute, Universiti Putra Malaysia,
43400 UPM Serdang, штат Селангор, Малайзия
*e-mail: shynarai_92@mail.ru

РАЗРАБОТКА ПОЛИКОМПОНЕНТНОЙ ЖИРОВОЙ ЭМУЛЬСИИ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОИСТВ

В данной статье рассматривается разработка поликомпонентной жировой эмульсии и исследование её физико-химических свойств. Эмульсия имела умеренно кислый pH 5,64 ± 0,12, что свидетельствует о пригодности для пищевого применения и стабильной структурной целостности. Структурированная липидная матрица, сформированная из рисового воска и стабилизированная белками нута, сохраняла целостность эмульсии при хранении при 4 °C. Активность воды (aw) составила 0,947, отражая относительно высокий уровень свободной влаги, типичный для пищевых эмульсий масло-в-воде, что требует соблюдения правильных условий хранения для обеспечения микробиологической стабильности. Реологический анализ показал псевдопластическое поведение: кажущаяся вязкость уменьшалась с 83,43 до 29,60 мПа·с при увеличении скорости вращения, демонстрируя постепенное разрушение внутренних взаимодействий под действием нагрузки. Цвет и способность удерживать масло подтвердили однородность и стабильность системы. В целом, эмульсия сочетает улучшенный липидный состав с желательными технологическими свойствами и может использоваться как структурированная жировая система или частичная замена животного жира в различных пищевых продуктах. В дальнейшем планируется исследовать возможность применения данной эмульсии в качестве частичного заменителя животного жира в варёных колбасных изделиях.

Ключевые слова: *поликомпонентная эмульсия; сафлоровое масло; жир конины; воск рисовых отрубей; нутовая мука; полиненасыщенные жирные кислоты; заменитель жира.*

Ш.Ж. Жасқайрат[1*], Mohammad Rashedi Ismail Fitry[2,3], А.К. Игенбаев[1], А.К. Мустафаева[1], А.К. Жумагалиева[1]

[1]С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті,
010000, ҚазақстанРеспубликасы, Астана қ., Жеңіс даңғылы, 62
[2]Тағам технологиясы кафедрасы, Тағам ғылымы және технологиясы факультеті,
Universiti Putra Malaysia, 43400 UPM Serdang, Селангор штаты, Малайзия
[3]Halal Products Research Institute, Universiti Putra Malaysia,
43400 UPM Serdang, Селангор штаты, Малайзия
*e-mail: shynarai_92@mail.ru

ПОЛИКОМПОНЕНТТІ МАЙ ЭМУЛЬСИЯСЫН ӘЗІРЛЕУ ЖӘНЕ ОНЫҢ ФИЗИКА-ХИМИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ

Бұл мақалада поликомпонентті май эмульсиясын әзірлеу және оның физика-химиялық қасиеттерін зерттеу қарастырылады. Эмульсияның pH мәні 5,64 ± 0,12 болып, тағамдық қолдануға қолайлы және тұрақты құрылымдық қасиеттерін көрсетеді. Күріш балауызы мен ноқат ұнының әсерінен түзілген құрылымдық липидтік матрица 4 °C температурада сақтау кезінде эмульсия тұтастығын сақтады. Су белсенділігі (aw) 0,947 болып, май-судағы эмульсияларға тән салыстырмалы жоғары еркін ылғал деңгейін көрсетті, бұл микробиологиялық тұрақтылық үшін дұрыс сақтау жағдайларын талап етеді. Реологиялық талдау псевдопластикалық ағындық қасиет көрсететіні анықталды: тұтқырлық 83,43-тен 29,60 мПа·с дейін төмендеді, бұл ішкі құрылымдық байланыстардың кернеу әсерінен үзілуін көрсетеді. Эмульсияның түс параметрлері мен май ұстап қалу қабілеті біркелкілік пен тиімділікті растады. Жалпы, эмульсия жақсартылған липидтік құрам мен технологиялық тиімді қасиеттерді біріктіріп, әртүрлі тағам өнімдерінде құрылымдық май немесе жануар майының жартылай алмастырушысы ретінде қолдануға мүмкіндік береді. Алдағы зерттеулерде бұл эмульсияның пісірілген шұжық өнімдерінде жануар майының ішінара алмастырғышы ретінде қолданылу мүмкіндігі зерттеледі.

Түйін сөздер: *поликомпонентті эмульсия; мақсары майы; жылқы майы; күріш балауызы; ноқат ұны; полиқанықпаған май қышқылдары; май алмастырғыш.*

Авторлар туралы мәліметтер

Шынарай Жасқайратқызы Жасқайрат* – С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Инжиниринг және азық-түлік технологиялары институтының 3 курс докторанты, e-mail: shynarai_92@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-2472-4210.

Mohammad Rashedi Ismail Fitry – Тағам технологиясы кафедрасының аға оқытушысы, Тағам ғылымы және технологиясы факультеті, Universiti Putra Malaysia, UPM Serdang, Селангор штаты, Малайзия; e-mail: ismailfitry@upm.edu.my. ORCID: http://orcid.org/0000-0002-2280-5075.

Айдын Каирбекович Игенбаев – PhD, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Инжиниринг және азық-түлік технологиялары институтының қауымдастырылған профессоры; e-mail: aidyn_mamyt@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9903-2912.

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.

Айнажан Кайырболатқызы Жумагалиева – С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Инжиниринг және азық-түлік технологиялары институтының оқытушысы; e-mail: zhumagalievaaa01@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-1063-5161.

Сведения об авторах

Шынарай Жасқайратқызы Жасқайрат* – Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, докторант 3 курса Институт инжиниринга и пищевых технологий; e-mail: shynarai_92@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-2472-4210.

Mohammad Rashedi Ismail Fitry – старший преподаватель Кафедры пищевых технологий, факультет пищевой науки и технологий, Universiti Putra Malaysia, UPM Serdang, штат Селангор, Малайзия; e-mail: ismailfitry@upm.edu.my. ORCID: http://orcid.org/0000-0002-2280-5075.

Айдын Каирбекович Игенбаев – Казахский агротехнический исследовательский университет имени С.Сейфуллина, PhD, асс.профессор Институт инжиниринга и пищевых технологий; e-mail:a.igenbayev@kazatu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9903-2912.

Аяулым Какеновна Мустафаева – кандидат технических наук, ассоциированный профессор кафедры «Технология пищевых и перерабатывающих производств», Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, город Астана, Республика Казахстан; e-mail: ayaulym.mustafa@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9627-7543.

Айнажан Кайырболатқызы Жумагалиева – Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, м.т.н. преподаватель Институт инжиниринга и пищевых технологий; e-mail: zhumagalievaaa01@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-1063-5161.

Information about the authors

Shynaray Zhaskairat* – Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin, doctoral student of the Institute of Engineering and Food Technology; e-mail: shynarai_92@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-2472-4210.

Mohammad Rashedi Ismail Fitry – Senior lector of Department of Food Technology, Faculty of Food Science and Technology, Universiti Putra Malaysia, UPM Serdang, Selangor; e-mail: ismailfitry@upm.edu.my. ORCID: http://orcid.org/0000-0002-2280-5075.

Aidyn Igenbayev – Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin, PhD, associate professor of the Institute of Engineering and Food Technology; e-mail: a.igenbayev@kazatu.edu.kz.ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9903-2912.

Ayaulym Mustafayeva – Candidate of Technical Sciences, Senior lecturer of the Department «Technology of Food and Processing Industries», Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin, Astana city, Republic of Kazakhstan; e-mail: ayaulym.mustafa@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9627-7543.

Ainazhan Zhumagaliyeva – Kazakh Agrotechnical Research University named after S.Seifullin, teacher of the Institute of Engineering and Food Technology; e-mail: zhumagalievaaa01@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-1063-5161.

Received 30.03.2026
Revised 08.04.2026
Accepted 09.04.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-30

BY 4.0
Check for updates

IRSTI: 65.63.33

G.N. Zhakupova, T.Ch. Tultabayeva, A.T. Sagandyk*, A.H. Muldasheva, A.K. Ospanova
Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin,
010000, Kazakhstan, Astana, 62 Zhenis St.
*e-mail: a.sagandyk@kazatu.edu.kz

INVESTIGATION THE TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF THE FERMENTATION PROCESS OF A COMBINED DAIRY MIXTURE USING BUTTERMILK CONCENTRATE

Abstract: *The article presents the results of a study on the technological parameters of the fermentation process of a combined dairy mixture using buttermilk concentrate. The relevance of the research is determined by the growing interest in the utilization of secondary dairy resources with high nutritional and biological value, as well as by the need to develop scientifically grounded technologies to produce functional fermented dairy products. The aim of the study was to evaluate the effectiveness of various starter cultures under different fermentation temperature regimes of a combined dairy mixture. The object of the study was a dairy mixture consisting of skimmed cow's milk, goat's milk, and buttermilk. The influence of starter culture composition and fermentation temperature on physicochemical parameters, acidification dynamics, and curd structure formation was investigated. It was established that the combination of mesophilic and thermophilic lactic acid microorganisms significantly affects fermentation intensity, titratable acidity, and structural stability of the product. The results demonstrated that an optimal fermentation temperature promotes the formation of a homogeneous curd with improved physicochemical and sensory characteristics, whereas deviations from optimal conditions lead to structural defects and deterioration of product quality. The results obtained confirm the feasibility of a comprehensive selection of starter cultures and fermentation temperature regimes in the production of fermented dairy products based on combined dairy mixtures using buttermilk concentrate.*

Key words: *combined dairy mixture; buttermilk concentrate; fermentation; physicochemical properties; fermentation temperature; acidification dynamics.*

©G.N. Zhakupova, T.Ch. Tultabayeva, A.T. Sagandyk, A.H. Muldasheva, A.K. Ospanova, 2026

Introduction

In recent years, the dairy industry has been developing in the direction of creating functional and specialized fermented milk products aimed at increasing nutritional value and expanding the range for various consumer groups.

In the Republic of Kazakhstan, the dairy industry is developing at a steady pace: the production of cow's and goat's milk is increasing every year. In 2024-2025, milk production volumes continued to increase: by the end of 2024, total milk production reached approximately 3.57 million tons, which is 4.4% more than in 2023, with growth provided by both large agricultural enterprises and rural farms. Of note is the 8.1% increase in production at agricultural enterprises to 1.39 million tons of milk [1].

There has been an increase in the number of small and medium-sized enterprises focused on the production of functional and specialized fermented milk products, which creates conditions for diversification of the product range and development of regional production. The processing of secondary milk resources, such as buttermilk, whey, and cream, is also expanding. At the same time, the industry faces problems of seasonal fluctuations in raw materials, insufficient technological equipment of processing enterprises, and limited integration of small producers into large supply chains. In these conditions, the development of scientifically based technologies for fermenting combined milk mixtures is of practical importance, ensuring improved product quality and stability, rational use of resources, and reduced production costs [2, 3].

Attention is paid to alternative types of milk raw materials, including goat milk, which has high digestibility, a balanced fatty acid composition, and reduced allergenicity compared to cow milk. This explains its growing use in the production of therapeutic, preventive, and functional products [4].

At the same time, the technological processing of goat milk is characterized by a number of limitations, including high cost, seasonal variability of physicochemical properties, and instability of the curd structure during fermentation due to low αs1-casein content and specific mineral composition. These characteristics make it difficult to use goat milk on its own in the production of fermented milk products and require the development of combined milk mixtures using affordable and functionally significant components [5].

A promising area is the use of skimmed cow's milk and whey concentrate, which have high protein value and contain phospholipids, lactose, and biologically active substances. Buttermilk, which is produced during the production of butter, is a valuable secondary milk raw material characterized by a high content of whey proteins and containing a unique complex of biologically active substances. It contains approximately 25-40 μg of vitamin A per 100 ml, which helps maintain vision, skin health, and the immune system. Vitamin D is present in an amount of 0.1-0.2 mcg and plays an important role in calcium absorption and bone formation. Vitamin E (0.05-0.1 mg) acts as an antioxidant, protecting cells from damage, and vitamin K (0.5-1 mcg) is involved in blood clotting processes, as well as B_1, B_2, B_6, B_{12}, C, H, choline, etc., as well as minerals and trace elements found in whole milk [6, 7].

These characteristics contribute to the formation of a denser and more homogeneous structure of fermented milk products, as well as improve their organoleptic properties. The use of buttermilk concentrate also allows for an increase in the utilization of dairy industry by-products and a reduction in the cost of finished products [8].

A key stage in the production of fermented milk products based on combined milk mixtures is the fermentation process, which determines the structure, taste, acidity, and microbiological stability of the product. The effectiveness of this process largely depends on the composition and activity of the starter cultures, as well as on the fermentation temperature conditions, which have a direct impact on the rate of acid formation, the growth of lactic acid microorganisms, and the synthesis of metabolites [9, 10].

Despite the existence of studies devoted to individual types of milk raw materials, questions regarding the functioning of starter cultures in combined mixtures based on goat's milk, skimmed cow's milk, and whey concentrate at different temperature regimes remain insufficiently studied. There is a lack of systematic data on the effect of fermentation temperature on acidity formation and curd stability in such systems [11, 12].

The purpose of this study is to analyze the activity of starter cultures depending on the influence of fermentation temperature regimes on a fermented milk product obtained from a

combined milk mixture. The study aims to determine the optimal fermentation parameters that ensure the stability of the product's quality and biological value.

Materials and methods

Experimental studies were carried out on the basis of experimental-production shop for processing milk and dairy products and in the scientific laboratory of NAO KazATIU named after Saken Seifullin. Butter, skim milk and goat's milk were used to prepare the combined milk mixture. Pahta for the study was taken from JSC «Astana - Akennym».

In the work, different fermenting cultures and their efficiency at different temperature regimes were investigated. Заквасочные культуры: Lactobacillus acidophilus, Lactobacillus delbrueckii ssp. bulgaricus, Streptococcus thermophilus, Bifidobacterium lactis [10].

Standard analytical methods were used to assess the quality of the raw mixture and the resulting sour milk product

The following methods were used to determine physico-chemical indicators:

1. Determination of acidity using the phenolphthalein indicator GOST 3624-92 Milk and dairy products. Titrimetric methods for determination of acidity» [13].
2. Definition of protein content GOST 25179-2014 Milk and dairy products. Methods for determination of protein mass» [14].
3. Definition of lactose GOST 34304-2017 Milk and dairy products. Method for determining lactose» [15].
4. Definition pH GOST 32892-2014 Milk and dairy products. Method for measuring active acidity» [16].
5. Determination of density GOST P 54758-2011 Milk and milk processing products. Density method» [17].
6. Fat definition GOST 5867-2023 «Fat definition of milk and dairy products»[18].

Results and Discussion

A milk mixture consisting of low-fat cow's milk, goat's milk and butter was chosen for the studies, which has high nutritional and biological value. Non-fat cow's milk is a source of protein and calcium in low fat. Goat milk improves product digestibility, contains easily digestible fats, vitamins and trace elements, and reduces the risk of allergic reactions. Buttermilk enriches the mixture with phospholipids, lecithin, and milk proteins, and helps normalize digestion. Thus, the selected milk mixture is characterized by a balanced chemical composition and combines the valuable nutritional and functional properties of each component. However, for an objective assessment of its quality and technological suitability, it is necessary to conduct a set of laboratory studies [19].

Laboratory analysis of the pulp plays an important role in controlling the quality and safety of the product, as well as in assessing its nutritional value and processing properties.

The physical-chemical analysis of buttermilk such as titrated acidity, fat content, protein, lactose allows to determine product compliance with established standards and to identify possible deviations affecting taste, shelf life and beneficial properties. Physical and chemical parameters of the pulps are shown in table 1.

Table 1 – Physicochemical Properties of Buttermilk

Name of the Parameter	Buttermilk Parameters	
	Separated Buttermilk	GOST 34354-2017
Titratable Acidity, °T	21	19,0 - 40,0
pH	6,47	-
Fat Content, %	0,78	not less than 0,2
Protein Content, %	3.3	not less than 2,6
Density	1028,83	not less than1027
SNF	8,11	not less than 8,0
Total Solids	8,89	-

The studies conducted show that the quality of the pure tested is within the prescribed limits, which confirms the high quality of the product and its compliance with safety and nutritional standards [20].

To produce dairy products with specified parameters, studies were carried out to optimize the technological parameters of the brewing process of the previously selected combined milk mixture based on skim cow's milk 50%, goat's milk 30% and puree 20%).

To determine the potting capacity, the milk mixture was fermented with different probiotic cultures at different temperatures and with different poaching times. As a result of the studies carried out, the optimal conditions for the milk mixture were determined.

Milk mixture containing skimmed cow's milk 50%/ goat's milk 30%/ curd 20% cooked at temperatures of 35, 37, 40°C. Fermented crops were introduced in the amount of 5%. Milk shelling was carried out under the same conditions.

The following samples were used for research and selection of the optimal snack culture:

1 sample – Yoghurt fermented with a starter culture containing *Lactobacillus acidophilus, Lactobacillus delbrueckii ssp. bulgaricus, Streptococcus thermophilus,* and *Bifidobacterium lactis.*

2 sample – Yoghurt fermented with a starter culture containing *Streptococcus thermophilus, Lactobacillus delbrueckii ssp. bulgaricus, Lactobacillus acidophilus, Bifidobacterium lactis, Lactococcus lactis, Lactobacillus acidophilus, Lactobacillus helveticus, Propionibacterium freudenreichii ssp. Shermanii*.

3 sample – Yoghurt fermented with a starter culture containing *Lactococcus lactis, Lactobacillus acidophilus, Lactobacillus helveticus, Propionibacterium freudenreichii ssp. shermanii, Streptococcus thermophilus, Lactobacillus delbrueckii subsp. Bulgaricus.*

The milk mixture was heated to a boiling point of 32 °C, added fermented cultures and leavened at temperatures: 35°C, 37°C, 40°C, in a thermostatic chamber TCS-1PU. Dynamic change of titrated acidity of samples was conducted quarterly.

The data obtained from the fermentation process at a temperature of 35 °C is shown in Figure 1.

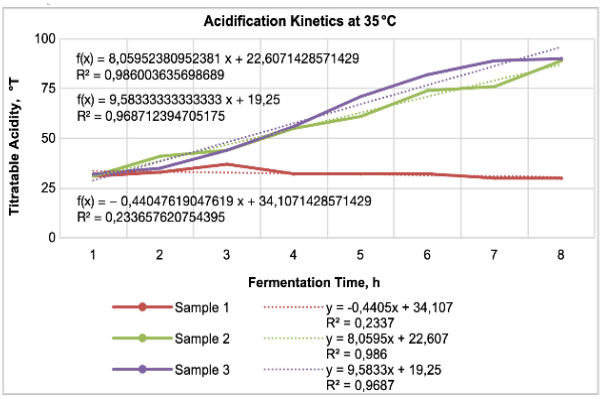


Figure 1 – Acid formation dynamics of samples at 35°C

As the analysis shows, sample 1 had a low accumulation of acidity (up to 37°T after 2 hours), but thickening was already occurring at this stage. Upon further plowing, serum secretion and settling of the clot on the bottom were observed, indicating its fragility and instability. Low acidity combined with low coagulation indicates insufficient fermented activity in the milk mixture. These findings indicate limited technological suitability of the starter culture used in sample 1 for the given raw material formulation, although it may be appropriate for the production of specialized products characterized by mild acidity.

Sample 2 showed a more balanced development of fermentation. By 3-4 o'clock, the acidity reached 55 - 61°T with a reduction in pH to 6.5, and by 6 o'clock a stable clot with sufficient acidity (76°T) formed. By 24 hours, the values reached 89°T at a pH of 5.5, which corresponds to the traditional yogurt parameters. The sensory properties of this sample can be characterized as harmonious, with a moderate acidity and uniform consistency, which makes it suitable for producing yogurts with classic organoleptic characteristics.

Sample 3 showed the highest activity of the fermentation microflora. By 6 o'clock, the acidity was 89°T, indicating rapid and efficient formation of a dense clot. By 24 hours, the acidity had hardly increased (90°T), but the pH dropped significantly to 4.27, indicating deep fermentation. The flavor and texture characteristics of this sample were the highest: the product had a pronounced sour milk

note, dense and homogeneous consistency without signs of serum separation. Sensory tests showed that this option was preferred in taste and structure among all the samples studied.

In general, it can be concluded that the starter culture in sample 1 provides low acidity but forms a weak and unstable curd, whereas sample 2 demonstrates balanced characteristics with a classic taste and consistency, which makes it the most promising option for producing yoghurt based on a mixture of cow's milk, goat's milk, and buttermilk.

Thus, shedding at 35 °C in all samples did not show high organoleptic properties.

The results of the studies on the boiling of samples at 37 °C are described in Figure 2.

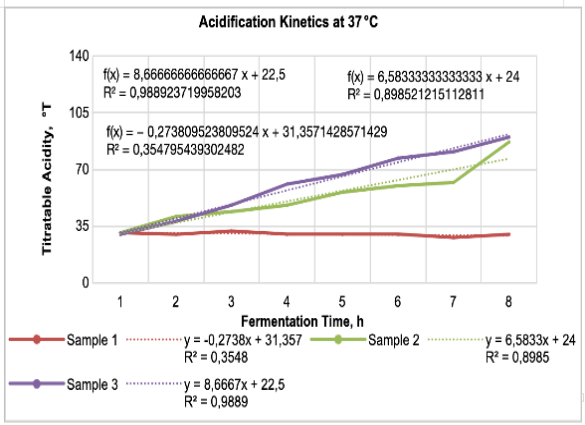


Figure 2 – Dynamics of acid formation of samples at temperature 37°C

The studies show that acid formation in sample 1 at 37°C remained weak. During the first two hours, the acidity remained almost unchanged (31-32 °T) and the pH remained at 6.8. Although the sample formed a clot, its consistency was weak, which was accompanied by serum separation and coagulation. This confirms that the starter culture in sample 1 demonstrates low enzymatic activity in the given milk mixture and does not ensure product stability, even under elevated temperature conditions.

In sample 2 after 1 hour showed an acidity of 41°T at pH 6.1, indicating a more intense development of lactic acid microflora. By 4-6 o'clock the acidity increased to 56-61°T, and the pH dropped to 5.1-5.13, which corresponds to the normal process of coagulation and dense formation. After 24 hours, the acidity reached 87°T at a pH of 4.5, which fully meets the technological requirements for ready-to-use yogurt. The sensory characteristics of this sample can be characterized as balanced, with moderate acidity and homogeneous consistency.

In sample 3 showed the highest activity at 37°C. By 3 hours the acidity was 61°T at pH 5.5, and by 5-6 hours it reached 77-81°T at pH 4.1-3.8, indicating rapid and efficient thickening. After 24 hours, the acidity reached 90°T at pH 4.0, indicating deep acidification. Sensory tests confirmed the high gustatory qualities and thick, homogeneous consistency of this sample, which was recognized as the best among those studied.

These results are due to a combination of factors: combined fermented stock, including thermophilic and mesophilic strains, optimum fermentation temperature and the use of a balanced milk mixture of cow's milk, goat's milk and dross, rich in lactose and milk proteins, which accelerates the growth of lactic acid bacteria and the formation of product structure. In addition, the activity of the strains present in the sourdough ensures the formation of flavor compounds that promote a high sensory evaluation - thick and homogeneous clumps with a pronounced taste.

A similar study was then carried out at 40°C, the results of which are described in Figure 3.

The studies show that acid formation in sample 1 at elevated temperature showed extremely low activity. After 1 hour the pH dropped from 7.6 to 6.5, but the acidity did not increase much (22°T). This indicates the unstable nature of the fermentation: despite some acidification of the medium, a full accumulation of acidity did not occur. Probably at 40°C the culture was heat sensitive and did not provide a stable thickening. This result confirms the low technological suitability of Narine for use in the studied mixture at elevated temperature.

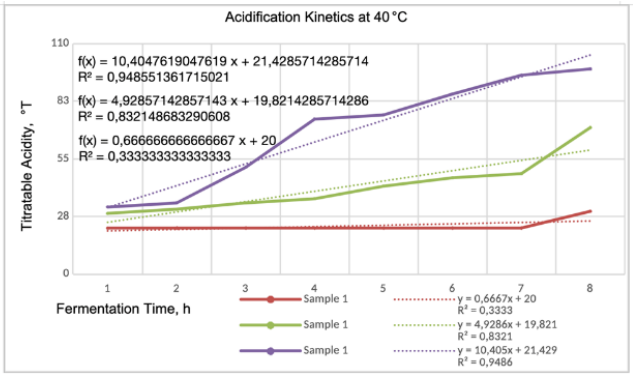


Figure 3 – Acid formation dynamics of samples at 40 ºC

In sample 2 its squashing occurred more actively. By 4-5 o'clock the acidity reached 42-46 °T at a pH down to ~ 6.0, and by 6 o'clock – 48 °T at a pH of 5.7, indicating the formation of a lump. By 24 o'clock, the temperature was 70°T at pH 4.2. These values are slightly lower than those at 35 and 37°C, indicating that the excessive temperature increase has slowed down the activity of the fermenting microflora. The product eventually formed a clot, but had less pronounced acidity and less dense consistency compared to conditions at 37°C.

Sample 3 showed the most intense dynamic: by 3 hours, the acidity reached 74°T at pH 5.6 and by 6 hours it was 92°T at pH 4.2, which corresponds to a finished product with pronounced taste and dense consistency. By 24 o'clock the acidity increased to 98°T at pH 4.02, indicating deep fermentation processes. The sensory characteristics of this variant at 40 °C also remained better: dense consistency, no serum separation, harmonious sour-milk taste. However, such high values of acidity (close to 100°T) can lead to an excessive acid note that requires monitoring the duration of fermentation.

According to the conducted studies, it was found that the highest and most stable results were demonstrated by sample 3. In all temperature regimes, the acid accumulation rate ranges from 8.7 to 10.4°T/h and high determinism values (R2 = 0.95-0.99), indicating that the fermentation is stable and well predicted. This confirms that sample 3 provides fast and stable formation of a dense clot. Sample 2 showed a moderate increase in acidity (4.9-8.0 °T/h), with the best results recorded at 35 °C (R2 = 0.986). At 37 °C, the predictability of the process remained high (R2 0.90), but the speed decreased, and at 40 °C both decreased, indicating a slowdown in activity and a less stable pattern of folding. Sample 1 at all temperatures had a minimum acid accumulation rate (- 0.27 to + 0.67 T/h) and low R2 values (0.23-0.35). This reflects the lack of a natural dynamic and the weak activity of the sieve, which explains the formation of an unstable clot and the secretion of the serum.

Thus, the starter culture in sample 1 proved unsuitable for this milk mixture, as it produced unstable curds at all tested temperatures and was characterized by low acid accumulation. The fermentation culture in sample 2 performed most effectively at 37 °C, ensuring a stable fermentation process with the formation of a homogeneous soft curd and typical organoleptic properties of yoghurt. However, the soft curd formed by sample 2 exhibited less pronounced acidity compared to sample 3, making this probiotic culture less promising. The best results were obtained with sample 3 at 37 °C: it provided the most intensive and stable acidification, forming a dense curd with superior sensory characteristics in taste and consistency, which makes it the most promising candidate for producing yoghurt from the tested milk mixture.

Conclusion

The study showed that the quality of the combined milk mixture depends on both the selection of the fermentation culture and the temperature regime. Different fermentations exhibit different activities: some of them form unstable clumps and low acid accumulation, while others provide a homogeneous structure, stable acidification and high organoleptic indicators. Sample 3 proved to be the most promising culture for the production of fermented milk from the milk mixture under study. It ensures intensive and stable milking at an optimum temperature of 37°C. These values demonstrate the high technological efficiency of the leavened cheese and its suitability for producing a quality sour milk product.

The obtained results allow to optimize the technological process of plating, ensuring quality stability, improvement of texture and taste characteristics of the product, as well as form the basis for further improving the formulations of combined sour milk products.

References

1. Анализ молочного рынка Казахстана: современное состояние и тенденции развития / Г.У. Акимбекова и др. // Журнал сельскохозяйственных и экологических наук. – 2024. – Т. 13, № 2. – С. 45-58.
2. Акимбекова Г.У. Приоритетные направления развития агропромышленного комплекса Казахстана / Г.У. Акимбекова, Г.А. Никитина // Проблемы агрорынка. – 2020. – № 4. – С. 13-23. https://doi.org/10.46666/2020-4-2708-9991.01
3. Соболева Т.В. Развитие малого и среднего молочного производства / Т.В. Соболева, Н.В. Козлова // Пищевая промышленность. – 2022. – № 6. – С. 45-52.
4. Goat Milk: A Review of its Nutritional and Therapeutic Potential in Functional Food Development / M.S. Lad, et al // International Journal of Dairy Technology. – 2023. – Vol. 76. – № 3. – P. 445-460.
5. Белов А.П. Козье молоко как компонент комбинированных кисломолочных продуктов / А.П. Белов, М.С. Иванова // Пищевая наука и технологии. – 2020. – № 3. – С. 88-95.
6. Али А.Х. Современные знания о пахте: состав, применение в пищевой промышленности, питательные свойства и польза для здоровья / А.Х. Али // Международный журнал молочных технологий. – 2019. – Т. 72, № 2. – С. 169-182. https://doi.org/10.1111/1471-0307.12572.
7. Yeragi V.S. Effects of Buttermilk on Health / V.S. Yeragi, A.H. Maske // International Journal of Scientific Research and Management (IJSRM). – 2016. – Vol. 4, № 11. – P. 4936-4940. https://doi.org/10.18535/ijsrm/v4i11.13.
8. Кузнецова И.А. Вторичные молочные ресурсы и их использование в производстве кисломолочных продуктов / И.А. Кузнецова, Л.П. Петрова // Пищевая индустрия. – 2020. – № 7. – С. 36-42.
9. Павлова А.В. Сквашивание комбинированных молочных смесей: закваски и температурные режимы / А.В. Павлова, В.Н. Морозов // Пищевая технология. – 2021. – № 5. – С. 52-60.
10. Sensory and Microbiological Quality of Buttermilk Sold in Organized and Unorganized Sectors / S.K. Reddy et al // International Journal of Scientific Research and Engineering Development. – 2024. – Vol. 7, № 1. – P. 47-55. https://doi.org/10.55041/IJSRED2961.
11. Гришина О.А. Влияние ферментации на органолептические и физико-химические свойства кисломолочных продуктов / О.А. Гришина, А.В. Козлов // Молочные технологии. – 2020. – № 3. – С. 18-25.
12. Сергеева Т.П. Комбинированные молочные смеси: проблемы и перспективы исследований / Т.П. Сергеева, Д.Ю. Иванов // Молочные исследования. – 2022. – № 1. – С. 10-16.
13. ГОСТ 3624-92. Молоко и молочные продукты. Титриметрические методы определения кислотности. Введ. 1994–01–01. – Москва: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации; М.: Изд-во стандартов, сор. 1994. – 15 с.
14. ГОСТ 25179-2014. Молоко и молочные продукты. Методы определения массовой доли белка. – Взамен ГОСТ 25179-90; введ. 2015–07–01. – Москва: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации; М.: Изд-во стандартов, сор. 2015. – 15 с.
15. ГОСТ 34304-2017. Молоко и молочные продукты. Метод определения лактозы и галактозы. – Взамен ГОСТ 34304; введ. 2019–01–01. – Москва: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации; М.: Изд-во стандартов, сор. 2017. – 13 с.
16. ГОСТ 32892-2014. Молоко и молочная продукция. Метод измерения активной кислотности. – Введ. 2016–01–01. – Москва: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации; М.: Изд-во стандартов, сор. 2016. – 14 с.
17. ГОСТ Р 54758-2011. Молоко и продукты переработки молока. Метод определения плотности. – Введ. 2012-04-01. – Москва: Стандартинформ, сор. 2011. – 12 с.
18. ГОСТ 5867-2023. Молоко и продукты переработки молока. Метод определения жирности. – Введ. 2024-01-01. – Москва: Стандартинформ, сор. 2023. – 15 с.

19. Dr. Dhrubo Jyoti Sen. Multifaceted nutritional benefits of buttermilk, milk, yoghurt and lassi / Dr. Dhrubo Jyoti Sen, Dr. Pruthviraj K. Chaudhary. // World Journal of Advanced Research in Healthcare. – 2025. – Vol. 9, № 5. – P. 321-332.
20. ГОСТ 34354-2017. Пахта и напитки на её основе. Технические условия. Текст. Взамен ГОСТ 34354; введён в действие с 1 января 2018 г. – М.: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации; М.: Издательство стандартов, 2018. – 10 с.

References

1. Analiz molochnogo ry`nka Kazaxstana: sovremennoe sostoyanie i tendencii razvitiya / G.U. Akimbekova i dr. // Zhurnal sel`skoxozyajstvenny`x i e`kologicheskix nauk. – 2024. – T. 13, № 2. – S. 45-58. (In Russian).
2. Akimbekova G.U. Prioritetny`e napravleniya razvitiya agropromy`shlennogo kompleksa Kazaxstana / G.U. Akimbekova, G.A. Nikitina // Problemy` agrory`nka. – 2020. – № 4. – S. 13-23. https://doi.org/10.46666/2020-4-2708-9991.01. (In Russian).
3. Soboleva T.V. Razvitie malogo i srednego molochnogo proizvodstva / T.V. Soboleva, N.V. Kozlova // Pishhevaya promy`shlennost`. – 2022. – № 6. – S. 45-52. (In Russian).
4. Goat Milk: A Review of its Nutritional and Therapeutic Potential in Functional Food Development / M.S. Lad, et al // International Journal of Dairy Technology. – 2023. – Vol. 76. – № 3. – P. 445-460. (In English).
5. Belov A.P. Koz`e moloko kak komponent kombinirovanny`x kislomolochny`x produktov / A.P. Belov, M.S. Ivanova // Pishhevaya nauka i texnologii. – 2020. – № 3. – S. 88-95. (In Russian).
6. Ali A.X. Sovremenny`e znaniya o paxte: sostav, primenenie v pishhevoj promy`shlennosti, pitatel`ny`e svojstva i pol`za dlya zdorov`ya / A.X. Ali // Mezhdunarodny`j zhurnal molochny`x texnologij. – 2019. – T. 72, № 2. – S. 169-182. https://doi.org/10.1111/1471-0307.12572. (In Russian).
7. Yeragi V.S. Effects of Buttermilk on Health / V.S. Yeragi, A.H. Maske // International Journal of Scientific Research and Management (IJSRM). – 2016. – Vol. 4, № 11. – P. 4936-4940. https://doi.org/10.18535/ijsrm/v4i11.13. (In English).
8. Kuzneczova I.A. Vtorichny`e molochny`e resursy` i ix ispol`zovanie v proizvodstve kislomolochny`x produktov / I.A. Kuzneczova, L.P. Petrova // Pishhevaya industriya. – 2020. – № 7. – S. 36-42. (In Russian).
9. Pavlova A.V. Skvashivanie kombinirovanny`x molochny`x smesej: zakvaski i temperaturny`e rezhimy` / A.V. Pavlova, V.N. Morozov // Pishhevaya texnologiya. – 2021. – № 5. – S. 52-60. (In Russian).
10. Sensory and Microbiological Quality of Buttermilk Sold in Organized and Unorganized Sectors / S.K. Reddy et al // International Journal of Scientific Research and Engineering Development. – 2024. – Vol. 7, № 1. – P. 47-55. https://doi.org/10.55041/IJSRED2961. (In English).
11. Grishina O.A. Vliyanie fermentacii na organolepticheskie i fiziko-ximicheskie svojstva kislomolochny`x produktov / O.A. Grishina, A.V. Kozlov // Molochny`e texnologii. – 2020. – № 3. – S. 18-25. (In Russian).
12. Sergeeva T.P. Kombinirovanny`e molochny`e smesi: problemy` i perspektivy` issledovanij / T.P. Sergeeva, D.Yu. Ivanov // Molochny`e issledovaniya. – 2022. – № 1. – S. 10-16. (In Russian).
13. GOST 3624-92. Moloko i molochny`e produkty`. Titrimetricheskie metody` opredeleniya kislotnosti. Vved. 1994–01–01. – Moskva: Mezhgos. sovet po standartizacii, metrologii i sertifikacii; M.: Izd-vo standartov, cop. 1994. – 15 s. (In Russian).
14. GOST 25179-2014. Moloko i molochny`e produkty`. Metody` opredeleniya massovoj doli belka. – Vzamen GOST 25179-90; vved. 2015–07–01. – Moskva: Mezhgos. sovet po standartizacii, metrologii i sertifikacii; M.: Izd-vo standartov, cop. 2015. – 15 s. (In Russian).
15. GOST 34304-2017. Moloko i molochny`e produkty`. Metod opredeleniya laktozy` i galaktozy`. – Vzamen GOST 34304; vved. 2019–01–01. – Moskva: Mezhgos. sovet po standartizacii, metrologii i sertifikacii; M.: Izd-vo standartov, cop. 2017. – 13 s. (In Russian).
16. GOST 32892-2014. Moloko i molochnaya produkciya. Metod izmereniya aktivnoj kislotnosti. – Vved. 2016–01–01. – Moskva: Mezhgos. sovet po standartizacii, metrologii i sertifikacii; M.: Izd-vo standartov, cop. 2016. – 14 s. (In Russian).
17. GOST R 54758-2011. Moloko i produkty` pererabotki moloka. Metod opredeleniya plotnosti. – Vved. 2012-04-01. – Moskva: Standartinform, cop. 2011. – 12 s. (In Russian).

18. GOST 5867-2023. Moloko i produkty` pererabotki moloka. Metod opredeleniya zhirnosti. – Vved. 2024-01-01. – Moskva: Standartinform, cop. 2023. – 15 s. (In Russian).
19. Dr. Dhrubo Jyoti Sen. Multifaceted nutritional benefits of buttermilk, milk, yoghurt and lassi / Dr. Dhrubo Jyoti Sen, Dr. Pruthviraj K. Chaudhary. // World Journal of Advanced Research in Healthcare. – 2025. – Vol. 9, № 5. – P. 321-332. (In English).
20. GOST 34354-2017. Paxta i napitki na eyo osnove. Texnicheskie usloviya. Tekst. Vzamen GOST 34354; vvedyon v dejstvie s 1 yanvarya 2018 g. – M.: Mezhgosudarstvenny`j sovet po standartizacii, metrologii i sertifikacii; M.: Izdatel`stvo standartov, 2018. – 10 s. (In Russian).

Acknowledgements

This work was carried out within the framework of IRN BR24892775: «Development of Technology for Comprehensive and Advanced Processing of Agricultural Raw Materials for the Production of Food Products Ensuring High Quality and Safety of the Final Products».

Г.Н. Жакупова, Т.Ч. Тултабаева, А.Т. Сағандық*, А.Х. Мулдашева, А.К. Оспанова
Казахский агротехнический исследовательский университет имени Сакена Сейфуллина,
010000, Казахстан, г. Астана, пр. Жеңіс, 62
*e-mail: a.sagandyk@kazatu.edu.kz

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА СКВАШИВАНИЯ КОМБИНИРОВАННОЙ МОЛОЧНОЙ СМЕСИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНЦЕНТРАТА ПАХТЫ

В статье представлены результаты исследования технологических параметров процесса сквашивания комбинированной молочной смеси с использованием концентрата пахты. Актуальность работы обусловлена перспективностью использования вторичных молочных ресурсов, обладающих высокой пищевой и биологической ценностью, а также необходимостью разработки научно обоснованных технологий производства функциональных кисломолочных продуктов. Целью исследования являлась оценка эффективности различных заквасочных культур при разных температурных режимах ферментации комбинированной молочной смеси. В качестве объекта исследования использовалась молочная смесь, включающая обезжиренное коровье молоко, козье молоко и пахту. В ходе исследований изучено влияние состава заквасочных культур и температурных режимов ферментации на физико-химические показатели, процесс кислотообразования и формирование структуры сгустка. Установлено, что сочетание мезофильных и термофильных молочнокислых микроорганизмов оказывает существенное влияние на интенсивность ферментации, титруемую кислотность и стабильность структуры продукта. Показано, что оптимальный температурный режим способствует формированию однородного сгустка с улучшенными органолептическими и физико-химическими характеристиками, тогда как отклонение от оптимальных параметров приводит к нарушению структуры и ухудшению качества продукта. Полученные результаты подтверждают целесообразность комплексного подбора заквасочных культур и температурных режимов при сквашивании комбинированных молочных смесей с использованием концентрата пахты и могут быть использованы при разработке технологий производства новых кисломолочных продуктов.

Ключевые слова: *комбинированная молочная смесь; концентрат пахты; ферментация; физико-химические свойства; температура ферментации; динамика кислотности.*

Г.Н. Жакупова, Т.Ч. Тултабаева, А.Т. Сағандық*, А.Х. Мулдашева, А.К. Оспанова
С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті,
010000, Қазақстан, Астана қ., Жеңіс көшесі, 62.
*e-mail: a.sagandyk@kazatu.edu.kz

МАЙ СУЫН КОНЦЕНТРАТЫН ПАЙДАЛАНА ОТЫРЫП, ҚҰРАМА СҮТ ҚОСПАСЫН АШЫТУ ПРОЦЕСІНІҢ ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ ПАРАМЕТРЛЕРІН ЗЕРТТЕУ

Мақалада май суын концентратын пайдалана отырып, құрама сүт қоспасын ашыту процесінің технологиялық параметрлерін зерттеу нәтижелері ұсынылған. Жұмыстың өзектілігі жоғары тағамдық және биологиялық құндылыққа ие екінші реттік сүт ресурстарын тиімді пайдалану перспективаларымен, сондай-ақ функционалдық қышқыл сүт өнімдерін өндірудің ғылыми негізделген технологияларын әзірлеу қажеттілігімен негізделеді. Зерттеудің мақсаты құрама сүт қоспасын әртүрлі температуралық режимдерде ферментациялау кезінде әртүрлі

ашытқы дақылдарының тиімділігін бағалау болып табылады. Зерттеу нысаны ретінде майсыз сиыр сүті, ешкі сүті және май суын енгізілген сүт қоспасы қолданылды. Зерттеу барысында ашытқы дақылдарының құрамы мен ферментацияның температуралық режимдерінің физика-химиялық көрсеткіштерге, қышқыл түзілу процесіне және ұйытқы құрылымының қалыптасуына әсері қарастырылды. Мезофильді және термофильді сүтқышқылды микроорганизмдердің үйлесуі ферментация қарқындылығына, титрленетін қышқылдыққа және өнім құрылымының тұрақтылығына елеулі әсер ететіні анықталды. Оңтайлы температуралық режим өнімнің органолептикалық және физика-химиялық сипаттамалары жақсартылған біртекті ұйытқы түзілуіне ықпал ететіні көрсетілді, ал оңтайлы параметрлерден ауытқу құрылымның бұзылуына және өнім сапасының төмендеуіне әкеледі. Алынған нәтижелер айран сарысуы концентратын пайдалана отырып, құрама сүт қоспаларын ашыту кезінде ашытқы дақылдары мен температуралық режимдерді кешенді түрде таңдаудың тиімділігін дәлелдейді және жаңа қышқыл сүт өнімдерін өндіру технологияларын әзірлеуде қолданылуы мүмкін.

Түйін сөздер: *құрама сүт қоспасы; айран сарысуы концентраты; ферментация; физика-химиялық қасиеттер; ферментация температурасы; қышқылдық динамикасы.*

Information about the authors

Tamara Chumanovna Tultabayeva – Doctor of Technical Sciences, Professor, S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Kazakhstan; e-mail: tamaratultabayrva@gmail.com/ ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2483-7406.

Gulmira Nurtaevna Zhakupova – Candidate of Technical Sciences, Professor, Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin, Kazakhstan; e-mail: g.zhakupova@kazatu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7714-4836.

Asem Talgatovna Sagandyk* – PhD, senior lecturer, S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Kazakhstan; e-mail: a.sagandyk@kazatu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5480-933X.

Aknur KhairatovnaM uldasheva – PhD, lecturer, S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Kazakhstan; e-mail: a.muldasheva@kazatu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0116-0260 .

Akmaral Kazbekovna Ospanova – Master's student, Kazakh Agrotechnical Research University named after S.Seifullin, Kazakhstan; e-mail: akmaral.ospanova.02@bk.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-7696-8738.

Авторлар туралы мәліметтер

Тамара Чумановна Тултабаева – техникалық ғылым докторы, профессор, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана, Казахстан; e-mail: tamaratultabayrva@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2483-7406.

Гульмира Нуртаевна Жакупова – техникалық ғылым кандидаты, профессор, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана, Казахстан; e-mail: g.zhakupova@kazatu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7714-4836.

Асем Талғатқызы Сағандық – PhD докторы, аға оқытушысы, С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана, Казахстан; e-mail: a.sagandyk@kazatu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5480-933X.

Ақнұр Хайратқызы Мулдашева – PhD докторы, оқытушысы, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана, Казахстан; e-mail: a.muldasheva@kazatu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0116-0260.

Ақмарал Қазбекқызы Оспанова – магистрант, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана, Қазақстан; e-mail: akmaral.ospanova.02@bk.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-7696-8738.

Сведения об авторах

Тамара Чумановна Тултабаева – доктор технических наук, профессор, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Астана, Казахстан; e-mail: tamaratultabayrva@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2483-7406.

Гульмира Нуртаевна Жакупова – к.т.н., профессор, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Астана, Казахстан; e-mail: g.zhakupova@kazatu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7714-4836.

Асем Талгатовна Сағандық – доктор PhD, старший преподаватель, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Астана, Казахстан; e-mail: a.sagandyk@kazatu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5480-933X.

Акнур Хайратовна Мулдашева – доктор PhD, преподаватель, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Астана, Казахстан; e-mail: a.muldasheva@kazatu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0116-0260.

Акмарал Казбековна Оспанова – магистрант, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Астана, Казахстан; e-mail: akmaral.ospanova.02@bk.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-7696-8738.

Received 30.03.2026
Revised 15.04.2026
Accepted 16.04.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-31

CC BY 4.0
Check for updates

ҒТАХР: 65.59.23

А.С. Камбарова*, А.О. Утегенова[1], А. Асылбекова[1], Ж.М. Атамбаева[1], Ш.А. Абжанова[2].
[1]Шәкәрім университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинки к-сі 20 А
[2]Алматы технолгиялық университеті,
050012, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Алмалы ауданы, Төле би к-сі, 100
*e-mail.ru: kambarova.80@mail.ru

ЖЫЛҚЫ ЕТІН ТҰЗДАУ ӘДІСІН ЖЕТІЛДІРУ

Аңдатпа: *Мақалада жылқы етін тұздау технологиясын жетілдірудің заманауи тәсілдері қарастырылған. Зерттеу жұмысының негізгі мақсаты – жылқы етінің тағамдық және биологиялық құндылығын арттыру, сондай-ақ сақтау мерзімін ұзарту үшін өсімдік негізіндегі тұздық қоспасы мен шоктық мұздату әдісін қолданудың тиімділігін анықтау болып табылады. Тәжірибелік зерттеу барысында тұздық қоспасының құрамына ас тұзы, ламинария, кептірілген шпинат және сарымсақ енгізілді. Бұл компоненттер ет өнімінің минералдық және биологиялық белсенді заттармен байытылуына ықпал етеді.*

Ет үлгілері -45°C температурада 3 сағат бойы шоктық мұздатудан өткізілді, бұл әдіс өнімнің құрылымын сақтауға және микробиологиялық тұрақтылығын арттыруға мүмкіндік берді. Өсімдік текті тұздық қоспасының әртүрлі мөлшерін (5%, 10%, 15%) қолдану арқылы алынған үлгілердің органолептикалық, құрылымдық және сапалық көрсеткіштері кешенді түрде бағаланды. Зерттеу нәтижелері бойынша 10% тұздық қоспасымен тұздалған жылқы еті дәмі, хош иісі және текстурасы жағынан ең оңтайлы үлгі ретінде анықталды.

Ламинария мен шпинатты қолдану өнімнің минералдық құрамын байытып, әсіресе йод тапшылығы жиі кездесетін өңірлер үшін функционалдық маңызын арттырды. Жалпы алғанда, алынған нәтижелер өсімдік негізіндегі тұздық қоспасы мен шоктық мұздату әдісін үйлестіре қолдану жылқы етінің тағамдық құндылығын сақтай отырып, ұзақ мерзімге дейін сапалы күйде сақтауға мүмкіндік беретін тиімді технология екенін көрсетті.

Түйін сөздер: *жылқы еті, тағамдық құндылық, шоктық мұздату, тұздық қоспасы, шпинат, ламинария, сақтау мерзімі.*

Кіріспе

Қазіргі таңда халықты сапалы әрі ұзақ сақталатын тағам өнімдерімен қамтамасыз ету – тамақ өнеркәсібінің маңызды міндеттерінің бірі. Ет өнімдерінің ішінде жылқы еті – ақуызға, темірге және дәрумендерге бай, майлылығы төмен және сіңімділігі жоғары ет түрі ретінде ерекшеленеді. Алайда еттің сақталу мерзімі мен тағамдық құндылығы уақыт өте келе төмендейді. Сондықтан етті өңдеудің тиімді жолдарын іздеу – өзекті мәселе.

Бұл мақалада жылқы етін тұздау процесінде ламинария мен шпинат қосылған тұздық қоспасын пайдалану арқылы оның тағамдық және биологиялық құндылығын арттыру, сондай-ақ шоктық мұздату әдісімен сақтау мерзімін ұзарту мәселелері қарастырылады.

©А.С. Камбарова, А.О. Утегенова, А. Асылбекова, Ж.М. Атамбаева, Ш.А. Абжанова, 2026

Жылқы еті – қазақ халқының дәстүрлі тағамдарының маңызды компоненті болып табылады. Ол жоғары сапалы ақуызға бай, майлылығы төмен және адам ағзасы үшін жеңіл сіңімді болып келеді. Жылқы етінде В тобы дәрумендері, әсіресе В12 дәрумені, фолий қышқылы, темір, цинк және басқа да маңызды микроэлементтер көп кездеседі. Бұл заттар қан түзілуі, жүйке жүйесінің қызметі және энергия алмасуы үшін аса қажет. Жылқы еті қарт адамдар мен темір тапшылығы бар адамдар үшін тамаша тағамдық өнім болып саналады. Сонымен қатар, жылқы еті жүрек-қан тамыр жүйесіне пайдалы әсер етеді, себебі оның құрамында қанықпаған май қышқылдары (Омега-3) болады.

Шпинат – тағамдық және биологиялық белсенді заттарға өте бай көкөніс. Оның құрамында А, С, К және В тобының дәрумендерімен қатар, темір, кальций, магний, калий, фосфор және марганец секілді минералдар бар. Бұл элементтер сүйек, қан айналымы және бұлшықет жүйесінің жұмысын жақсартады. Шпинат құрамындағы антиоксиданттар – бета-каротин, лютеин және зеаксантин – ағзадағы бос радикалдармен күресіп, қартаю процесін баяулатады. Сонымен қатар, шпинат қан қысымын төмендетуге ықпал ететін табиғи нитраттарға да бай.

Ламинария (теңіз балдыры) – табиғи түрде йодқа бай өнімдердің бірі. Ол қалқанша безінің дұрыс жұмыс істеуі үшін маңызды микроэлемент – йодтың негізгі табиғи көзі болып табылады. Сонымен қатар, ламинария құрамында А, С, D, Е және В тобы дәрумендері, сондай-ақ темір, кальций, магний, фосфор, калий сияқты минералдар кездеседі. Бұл элементтер иммундық жүйені нығайтуға, сүйек тіндерін қалыптастыруға және зат алмасуды реттеуге көмектеседі. Ламинарияның құрамындағы талшықтар ас қорытуды жақсартып, ішек микрофлорасының тепе-теңдігін сақтауға ықпал етеді.

Шоктық мұздату кезінде антиоксиданттар, дәрумендер және басқа да тағамдық құндылықтар сақталады, өйткені мұздату кезінде ұсақ мұз кристалдары өнімнің клеткаларына кіреді және оларды бұзбайды. Ол арқылы өнімдердің сақтау мерзімі ұзарады, өнім сапасы жоғары деңгейде сақталады. Бұл әдіс өнімдердің дәрумендері мен минералдарын ұзақ уақыт бойы жоғалтпауға мүмкіндік береді.

Зерттеу тақырыбының өзектілігі: Абай ауданы мен оның айналасындағы аймақтарда экологиялық жағдайдың толық емес болуы, сондай-ақ халықтың рациондық тамақтануында йод және басқа маңызды микроэлементтердің жетіспеушілігі жиі кездеседі. Бұл жағдай тұрғындардың денсаулыққа және тамақтық құндылыққа қатысты мәселелерін тудырады. Сонымен қатар, өңірде ет өнімдерін ұзақ сақтау және олардың тағамдық құндылығын сақтау әдістері жеткілікті деңгейде зерттелмеген.

Жылқы еті – жоғары тағамдық және биологиялық құндылығы бар өнім, ол ақуызға бай және микроэлементтерді жеткілікті мөлшерде қамтиды. Дегенмен, оның ұзақ мерзімді сақтауында және дәмдік сапасын сақтау кезінде арнайы технологиялар қолданылуы қажет. Өсімдік негізіндегі тұздық қоспасы және шоктық мұздату әдісі сияқты заманауи технологиялар ет өнімдерінің қоректік құндылығын сақтап қана қоймай, ұзақ мерзімге дейін қауіпсіз сақтауына мүмкіндік береді.

Осыған байланысты жылқы етін тұздау технологиясын жетілдіру, оның құрамына өсімдік текті қоспаларды енгізу және шоктық мұздату әдісін қолдану – өңірлік жағдайларда тағамдық құндылықты арттыруға, йод жетіспеушілігін төмендетуге және халықты сапалы, қоректік ет өнімдерімен қамтамасыз етуге бағытталған өзекті зерттеу болып табылады. Жұмыстың жаңалығы: ет өнімдеріне өсімдік шикізаттарын қосу арқылы олардың тағамдық құндылығын арттыру мен сақтау мерзімін ұзарту.

Қазіргі жағдайда тамақтану мәселесі бірқатар себептерге байланысты бірінші орынға шықты, атап айтсақ: экологиялық ортаның бұзылуы, ағзаға экологиялық таза шикізаттардан алынған өнімдердің жеткіліксіз түсуі, жастардың жылдам дайындалатын тағамдарға әуестігі, дұрыс тамақтанбау, сапасы төмен азықтар және т.б.

Жобаның мақсаты:

Етті тұздай отырып, өсімдік шикізаттары негізінде оның тағамдық құндылығын арттыру және сақтау мерзімін ұзарту.

Қойылған мақсатқа сәйкес жұмыстың негізгі міндеттері анықталды

1. Өсімдік шикізаттары (шпинат, ламинария) және шокты мұздату әдісі бойынша ғылыми мақалалар мен зерттеулерді қарастырып, олардың адам ағзасына тигізетін пайдалы қасиеттерін анықтау және ықтимал көздерін бағалау;

2. Өсімдік негізіндегі ет тұздығының рецептурасы құрастыру;
3. Тұздған еттің тағамдық құндылығын зерттеу;
4. Алынған нәтижелерді талдап, өсімдік шикізаттарының және шокты мұздатқыштың еттің тағамдық құндылығына, құрылымына және сақтау мерзіміне әсерін қорытындылау.

Жұмыстың зерттеу объектісі – ламинария, шпинат, шокты мұздатқыш.

Бұл жобаның негізі – ет өнімдерінің тағамдық құндылығын арттыру және сақтау мерзімін ұзарту үшін жаңа әдістерді зерттеу мен енгізу. Адам ағзасы үшін маңызды болып табылатын белоктар, майлар, дәрумендер мен минералдар ет өнімдерінде кеңінен кездеседі. Алайда, еттің ұзақ уақыт сақталуы мен тағамдық қасиеттерінің жоғалуы мәселесі бүгінгі күні әлі де өзекті болып отыр. Осыған орай, ет өнімдерінің сақтау мерзімін ұзарту және олардың тағамдық құндылығын арттыру мақсатында тиімді әдістерді іздеу қажет.

Зерттеу материалдары

Зерттеу нысаны ретінде салқындатылған жылқы еті (сан еті бөлігі), тағамдық ас тұзы, кептірілген ламинария ұнтағы, кептірілген шпинат ұнтағы және сарымсақ пайдаланылды. Барлық өсімдік шикізаттары алдын ала жуылып, дегидраторда 45-50°С температурада кептіріліп, ұнтақ күйіне дейін майдаланды (сурет 1).



Сурет 1 – Шпинатты кептіру және ұсақтау процесі

Тұздық қоспасын дайындау. Өсімдік негізіндегі тұздық қоспасы келесі қатынаста дайындалды: ас тұзы – 75%, ламинария – 10%, шпинат – 10%, сарымсақ – 5%. Компоненттер біркелкі араластырылып, герметикалық ыдыста сақталды.

Етті өңдеу. Алынған тұздықпен, біздің жобада таңдалынып алынған жылқы етін жақсылап тұздадық. Әрбір ет кесегін тұздықпен біркелкі жағып шықтық. 4 үлгідегі 250 г жылқы етіне 25 г дайын тұздықты жақсылап жағып шығып, 1 тәулік бөлме температурасында қойдық, бұл уақыт ішінде тұздық етке толық сіңіп, оның дәмін және тағамдық құндылығын жақсартады.Тұздық сіңген етті тағамдық құндылығын сақтау және сақтау мерзімін ұлғайту мақсатында шокты мұздатқышта -200 С температурада 3 сағат уақыт ішінде қатырдық. Қатырып дайын болған үлгілерді мұздатқышта 0-4°С температурада 5 күн сақтадық.Тұздықтың әсері: Тұздық құрамындағы тұз, ламинария, шпинат және сарымсақ еттің сақтау мерзімін ұзартады, сонымен қатар оның микробиологиялық тұрақтылығын арттырады.

Тұздалған және шокты мұздатқышта қатырылған еттің сақтау мерзімі жалпы алғанда, сақтау мерзімі айтарлықтай ұзарады. Мұнда басты роль атқаратын факторлар – еттің түрі, тұздықтың құрамы, сақтау температурасы және мұздату әдісі.

Шокты мұздатқышта қатырылған тұздалған еттің сақтау мерзімі:

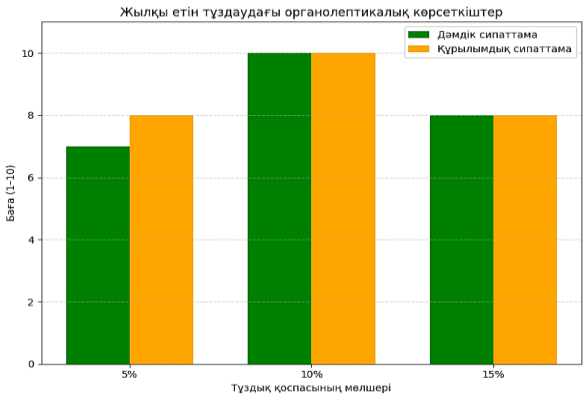
Шокты мұздату әдісі арқылы қатырылған ет, оның құрамындағы су молекулалары баяу қатып, бұл еттің құрылымын сақтауға көмектеседі. Мұндай жағдайда еттің сапасы жақсы сақталады. Шокты мұздатқышта сақталған тұздалған еттің сақтау мерзімі 6 айдан 1 жылға дейін болады. Тұздың қосылуы еттің микробиологиялық қауіпсіздігін арттырады және сақтау мерзімін ұзартуға көмектеседі. Мұздатқыштың температурасын -18°C немесе одан төмен деңгейде сақтау керек. Бұл температура еттің тез бұзылуына жол бермейді және тұздықтың құрамындағы компоненттер еттің сапасын сақтауына көмектеседі.

Бағалау әдістері. Органолептикалық бағалау әдісімен үш түрлі үлгі зерттелді: 5%, 10% және 15% өсімдік қоспасымен тұздалған ет. Еттің түсі, дәмі, иісі және құрылымы зерттелді. Сонымен қатар, сақтау кезінде еттің физико-химиялық қасиеттері де қарастырылды.

5% қоспамен тұздалған тұздық – жеңіл жасыл түсті және жеңіл иіс бар, сәл тұзды дәм мен сұйық құрылымды. 10% қоспамен тұздалған тұздық – қанық жасыл түсті, айқын көкөніс және теңіз иістері сезіліп тұр, дәмі қанық, тұтқырлығы орташа. 15% қоспамен тұздалған тұздық – қою жасыл түсті, өте айқын өсімдік және теңіз иістері бар, өте қанық дәм және тұтқырлығы жоғары, қалың құрылым. Органолептикалық көрсеткіштеріне сүйене отырып оңтайлы көрсеткішті 2-ші үлгіні таңдап алдық. 10% қоспамен тұздалған тұздықта ламинария мен шпинаттың хош иістері айқын және олар бір-бірімен жақсы үйлеседі. Бұл тұздықтың табиғи және баланстанған иісін қамтамасыз етеді. Ал 15% қоспада иіс өте күшті болып, басым болады, бұл тұтынушының талғамына сәйкес келмеуі мүмкін. 10% қоспа тұздықтың иісін үйлестіре отырып, басқа да компоненттермен жақсы үйлеседі. 10% қоспамен тұздалған тұздықтың түсі қанық жасыл, бірақ әлі де табиғи және көзге жағымды. 10% қоспамен тұздалған тұздық – бұл дәм мен хош иіс жағынан ең жақсы үйлесімге ие үлгі, оның табиғи көкөніс және теңіз дәмі мен иісі теңдестірілген және қанық, бірақ тым күшті емес.

Нәтижелер мен талқылау

Органолептикалық бағалау нәтижелері. 10% тұздық қоспасымен тұздалған ет дәмдік және құрылымдық сипаттамалары бойынша оңтайлы үлгі ретінде анықталды. 5% үлгіде өсімдік хош иісі әлсіз байқалса, 15% үлгідегі хош иіс пен дәм тым қанық болып, табиғилықтан алыстады (сурет 2).



Сурет 2 – Тұздалған жылқы етінің органолептикалық көрсеткіштері

Диаграммада тұздық қоспасының әртүрлі мөлшерін (5%, 10%, 15%) қолдану кезінде паштет немесе тұздалған еттің органолептикалық көрсеткіштері көрсетілген. Дәмдік сипаттама (жасыл бағандар) – 10% тұздық қоспасы ең жоғары баға (10 балл) алды, бұл үлгі дәмдік теңгерімі бойынша оңтайлы екенін дәлелдейді. Құрылымдық сипаттама (сарғыш бағандар) – 10% үлгі құрылымдық сапа бойынша да ең жақсы нәтиже көрсетті.

5% тұздық қоспасымен тұздалған етте өсімдік хош иісі әлсіз байқалды, бұл дәмдік әсерді төмендетеді. 15% үлгіде хош иіс пен дәм тым қанық болып, өнімнің табиғилығынан аздап алыстайды.

Зерттеу нәтижелері 10% тұздық қоспасын қолдану паштет немесе тұздалған еттің органолептикалық сапасы үшін оңтайлы екенін көрсетеді. Бұл көрсеткіштер технологиялық процесті стандарттау және өнімнің дәмдік-сапалық қасиеттерін сақтау кезінде негіз болып табылады.

Шоктық мұздатудың әсері. Мұздатылған еттің құрылымы сақталып, су және қоректік заттар жоғалмады. Жібітілгеннен кейінгі органолептикалық көрсеткіштер бойынша ет өзінің сапасын жоғалтпаған.Сонымен қатар, мұздату кезінде еттің шырындары мен ылғалдылығы сақталып, еттің жұмсақтығы мен шырындылығы жоғары болады. Бұл әдіс еттің сақтау мерзімін 6 айдан 1 жылға дейін арттыруға мүмкіндік береді.

1-кестеде тұздық қоспасының мөлшеріне байланысты жылқы етінің физика-химиялық көрсеткіштері көрсетілген.

Кесте 1 – Тұздық қоспасының мөлшеріне байланысты жылқы етінің физика-химиялық көрсеткіштері

Үлгі	Ылғалдылық	pH	Ақуыз%	Май%	Күл%
Бақылау	72,4 ± 0,3	5,78 ± 0,02	18,6 ± 0,2	5,9 ± 0,1	1,1 ± 0,03
5%	71,8 ± 0,4	5,80 ± 0,03	18,9 ± 0,3	5,8 ± 0,2	1,4 ± 0,05
10%	70,9 ± 0,3	5,82 ± 0,02	19,8 ± 0,2	5,7 ± 0,1	1,9 ± 0,04
15%	70,2 ± 0,5	5,85 ± 0,04	19,6 ± 0,3	5,6 ± 0,2	2,3 ± 0,06

Кестеде көрсетілген деректер әрбір үлгінің орташа мәндерін және стандартты ауытқуларын көрсетеді. 5%, 10% және 15% тұздық қоспалары қосылған үлгілердің ылғалдылығы, pH, ақуыз, май және күл мөлшері бағаланған. Нәтижелерге қарағанда, 10% тұздық қоспасымен тұздалған үлгіде ақуыз және майдың массалық үлесі, сондай-ақ күл көрсеткіші оңтайлы үйлесім көрсетіп, еттің тағамдық құндылығы мен сапасын сақтауға мүмкіндік береді. 5% үлгідегі тұздық құрамындағы өсімдік компоненттері аз болғандықтан дәмдік және құрылымдық сипаттамалар әлсіз байқалды, ал 15% үлгідегі қоспада өсімдік компоненттерінің жоғары мөлшері ылғалдылықты төмендетіп, дәмдік қанықтылықты арттырды.

Зерттеу барысында тұздық қоспалары қосылған жылқы етінің шоктық мұздатудан кейінгі сақтау мерзімінде микробиологиялық көрсеткіштері анықталды. Микроорганизмдер бойынша бақылау жұмыстары жүргізілді: жалпы микроорганизмдер саны, лактобактериялар, саңырауқұлақтар және көгерулер. Нәтижелер көрсеткендей, 10% тұздық қоспасы қосылған үлгілерде микробиологиялық көрсеткіштер бақылау үлгісіне қарағанда төмен болып, өнімнің ұзақ мерзімге сапалы сақталуын қамтамасыз ететіні анықталды. 5% үлгіде микроорганизмдердің өсуі орташа деңгейде, ал 15% үлгіде өсімдік компоненттерінің жоғары мөлшері кейбір микроорганизмдердің өсуін аздап тежегенімен, дәмдік және органолептикалық сипаттамаларға әсерін тигізуі мүмкін. Сақтау кезіндегі микробиологиялық көрсеткіштер келесі 2-ші кестеде көрсетілген:

Кесте 2 – Сақтау кезіндегі микробиологиялық көрсеткіштер

Көрсеткіштер	Бақылау үлгісі	10% өсімдік қоспасы қосылған үлгі
МАФАнМ (мезофильді аэробты және факультативті анаэробты микроағзалар саны), КТБ/г ×10³	1,2 ± 0,1 (0 тәулік) 3,8 ± 0,2 (3 тәулік) 7,5 ± 0,3 (5 тәулік)	1,1 ± 0,1 (0 тәулік) 2,1 ± 0,1 (3 тәулік) 3,2 ± 0,2 (5 тәулік)
ІТТБ (колиформды бактериялар), КТБ/г	0 тәулікте – анықталмады 3 тәулікте – іздері анықталды 5 тәулікте – анықталды	Сақтау мерзімі барысында анықталмады
Ашытқылар мен зеңдер, КТБ/г	0,3 ± 0,02 (0 тәулік) 0,8 ± 0,05 (3 тәулік) 1,6 ± 0,07 (5 тәулік)	0,2 ± 0,01 (0 тәулік) 0,4 ± 0,02 (3 тәулік) 0,6 ± 0,03 (5 тәулік)

Кестеде бақылау үлгісі мен 10% өсімдік қоспасы қосылған өнімнің сақтау барысында микробиологиялық көрсеткіштері көрсетілген. Нәтижелер МАФАнМ (мезофильді аэробты және факультативті анаэробты микроағзалар саны), ІТТБ (колиформды бактериялар) және ашытқылар мен зеңдер бойынша салыстырылған. Көрсеткіштерден 10% өсімдік қоспасы қосылған үлгінің микробиологиялық тұрғыдан тұрақтылығы бақылау үлгісіне қарағанда жоғары екені байқалады.

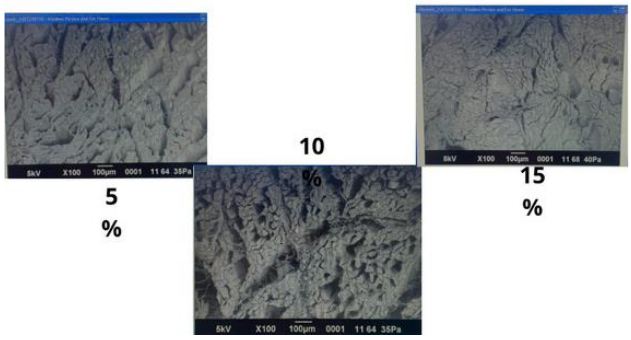
Кесте 3 – Өнімдегі йодтың массалық үлесі

Үлгі	Йод, мг/100 г
Бақылау	0,02 ± 0,01
5%	1,8 ± 0,1
10%	3,6 ± 0,2
15%	5,4 ± 0,3

Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, өсімдік қоспасының мөлшері артқан сайын өнімдегі йодтың массалық үлесі де біртіндеп жоғарылай түскенін байқауға болады (кесте 3). Бақылау үлгісімен салыстырғанда 5%, 10% және 15% қоспасы бар үлгілерде йод мөлшерінің айтарлықтай өсуі байқалып, бұл өнімнің йодпен тиімді байытылғанын көрсетеді. Алайда 15% қоспа енгізілген үлгіде йод мөлшері жоғары болғанымен, органолептикалық көрсеткіштерінің (дәмі, иісі, құрылымы) нашарлауы байқалды. Сондықтан өнімнің тағамдық құндылығы мен тұтынушылық қасиеттерін ескере отырып, 10% қоспасы бар үлгі йод мөлшері жеткілікті және органолептикалық сапасы жоғары оңтайлы нұсқа ретінде таңдалды.

Тағамдық құндылық. Ламинария құрамындағы йод және шпинаттағы дәрумендер етті биологиялық белсенді заттармен байытып, оны функционалды тағамға айналдыруға мүмкіндік береді. Бұл әсіресе йод тапшылығы жиі кездесетін аймақтар үшін өзекті. Шпинат құрамында көптеген дәрумендер (әсіресе С дәрумені мен темір) мен антиоксиданттар бар, олар еттің тағамдық құндылығын арттырады. Шпинаттың құрамындағы хлорофилл мен басқа да биологиялық белсенді заттар еттің дәмін байытып, оның құрылымын жақсартады. Мұздату кезінде шпинат етке қосымша текстура мен түсті өзгерістер енгізуі мүмкін, бірақ шокты мұздату әдісі олардың құрылымын сақтауға көмектеседі.

Ламинария (теңіз балдыры) құрамында йод, дәрумендер мен минералды заттар бар, олар еттің тағамдық құндылығын арттырады. Ламинарияның талшықты құрылымы еттің тұздалу процесінде оны жеңілдетіп, жұмсартады. Сонымен қатар, ол еттің дәмін жақсартып, микробиологиялық қасиеттерін жақсартады. Құрамы байытылған тұздықпен тұздалған еттерді Семей қаласының Шәкәрім университетінің «Радиоэкологиялық зерттеулер» ғылыми орталығында микроқұрлымына зерттеу жұмыстарын жүргіздік. Зерттеу барысы келесі суреттерде көрсетілген (сурет 3).



Сурет 3 – Көпкомпонентті тұздық қосылған жылқы етінің микроқұрылымы

Суреттерде тұздық қоспасының әртүрлі мөлшері (5%, 10%, 15%) қолданылған кезде ет талшықтарының микроқұрылымы көрсетілген. 10% үлгідегі ет талшықтары біркелкі және жұмсақ, өсімдік компоненттері жақсы енген, бұл дәмдік және құрылымдық қасиеттерді оңтайлы етеді. 5% үлгідегі өсімдік әсері әлсіз, ал 15% үлгіде хош иіс пен дәм қанық болып, табиғилықтан аздап алыстайды.

Қорытынды

Зерттеу барысында тұздалған еттің тағамдық және биологиялық құндылығын арттыру мақсатында арнайы тұздық қоспалары әзірленді. Бұл тұздық құрамында 75% тұз, 10% ламинария (йодпен байыту мақсатында), 10% кептірілген шпинат (тағамдық құндылықты арттыру мақсатында) және 5% сарымсақ бар.

Тұздалған ет шокты мұздатқышта -45°С температурада 3 сағат бойы қатырылып, кейіннен 5 күн өткен соң жібітіліп пісірілді. Бұл процесс еттің сапасын сақтау үшін өте тиімді болып шықты, себебі шокты мұздату әдісі еттің құрылымын бұзбай, оның дәмі мен тағамдық құндылығын сақтауға мүмкіндік береді. Еттің органолептикалық көрсеткіштері бойынша

зерттеу жүргізіліп, 10% шпинат пен ламинария қосылған тұздалған ет ең жақсы нәтижелерді көрсетті.

Нәтижесінде, шокты мұздату технологиясын қолдану арқылы тұздалған еттің сапасын жоғалтпай сақтауға болады, ол ұзақ сақтау мерзімімен ерекшеленеді. Бұл технологияны тамақ өнеркәсібінде, әскери және гуманитарлық көмек, мейрамхана бизнесі, диеталық тағамдар өндірісі және экспорт саласында қолдануға болады.

Зерттеу нәтижелері бойынша тұздық қоспаларының тағамдық құндылығын арттыру және еттің сапасын сақтау мақсатында әзірленген технологияның үлкен потенциалы бар екені анықталды.

Бұл жұмыс болашақта ет өнімдерін сақтау және өңдеу саласында тиімді шешімдер ұсынуға мүмкіндік береді.

Әдебиеттер тізімі

1. Tengrinews.kz. Новости и статьи [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://kaz.tengrinews.kz/. (дата обращения: 24.04.2026).
2. Власова, Н.А. Технология мясных продуктов / Н.А. Власова, О.И. Ковальчук. – М.: Пищевая промышленность, 2012. – 512 с.
3. Тимербаев, М. С. Современные технологии и новые способы переработки мяса / М.С. Тимербаев. – Алматы: Гылым, 2018. – 384 с.
4. Журавлев В.М. Мясные продукты и их переработка / В.М. Журавлев. – М.: ГЕОС, 2017. – 320 с.
5. Гоголев, Ю.И. Продукты переработки мяса и их технология / Ю.И. Гоголев, В.И. Шатохина. – СПб.: Лань, 2015. – 400 с.
6. Голубева, Е.И. Технология хранения продуктов питания / Е.И. Голубева. – Киев: Вища школа, 2019. – 350 с.
7. Jafari, S.M. Influence of drying methods on the retention of biologically active compounds in seaweeds / S.M. Jafari, M. Ghasemi // Food Research International. – 2017. – Vol. 99. – P. 392-399. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.06.012.
8. Koutsou S. Influence of salt and seaweed addition on the quality and preservation of meat products / S. Koutsou, S. Vavouraki // Journal of Food Science and Technology. – 2018. – Vol. 55, № 7. – P. 2650-2660. https://doi.org/10.1007/s13197-018-3204-7.
9. Zito P. The role of functional ingredients in meat products and their impact on food quality and preservation / P. Zito, S. Djemel // Meat Science. – 2021. – Vol. 174. – Art. 108413. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2020.108413.
10. O'Neill R. Processing and preservation of meat: The effect of freezing and drying technologies on the texture and quality of meat / R. O'Neill, M. Haug // International Journal of Food Science and Technology. – 2014. – Vol. 49, № 3. – P. 658-663. https://doi.org/10.1111/ijfs.12345.
11. Сейдахметова, А.М. Шокты мұздату әдістері және олардың азық-түліктің сапасына әсері / А.М. Сейдахметова, Р.А. Сейдахметов // Қазақ тамақтану және ауыл шаруашылығы ғылыми журналы. – 2020. – № 3. – Б. 34-40.
12. Кәрімов, Т.Т. Азық-түлік өнімдерін сақтау және өңдеу технологиясы / Т.Т. Кәрімов. – Алматы: Қазақ университеті, 2014. – 300 с.

References

1. Tengrinews.kz. Novosti i stat`i [E`lektronny`j resurs]. – Rezhim dostupa: https://kaz.tengrinews.kz/. (data obrashheniya: 24.04.2026). (In Russian).
2. Vlasova, N.A. Texnologiya myasny`x produktov / N.A. Vlasova, O.I. Koval`chuk. – M.: Pishhevaya promy`shlennost`, 2012. – 512 s. (In Russian).
3. Timerbaev, M. S. Sovremenny`e texnologii i novy`e sposoby` pererabotki myasa / M.S. Timerbaev. – Almaty`: Gy`ly`m, 2018. – 384 s. (In Russian).
4. Zhuravlev V.M. Myasny`e produkty` i ix pererabotka / V.M. Zhuravlev. – M.: GEOS, 2017. – 320 s. (In Russian).
5. Gogolev, Yu.I. Produkty` pererabotki myasa i ix texnologiya / Yu.I. Gogolev, V.I. Shatoxina. – SPb.: Lan`, 2015. – 400 s. (In Russian).

6. Golubeva, E.I. Texnologiya xraneniya produktov pitaniya / E.I. Golubeva. – Kiev: Vishha shkola, 2019. – 350 s. (In Russian).
7. Jafari, S.M. Influence of drying methods on the retention of biologically active compounds in seaweeds / S.M. Jafari, M. Ghasemi // Food Research International. – 2017. – Vol. 99. – P. 392-399. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.06.012. (In English).
8. Koutsou S. Influence of salt and seaweed addition on the quality and preservation of meat products / S. Koutsou, S. Vavouraki // Journal of Food Science and Technology. – 2018. – Vol. 55, № 7. – P. 2650-2660. https://doi.org/10.1007/s13197-018-3204-7. (In English).
9. Zito P. The role of functional ingredients in meat products and their impact on food quality and preservation / P. Zito, S. Djemel // Meat Science. – 2021. – Vol. 174. – Art. 108413. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2020.108413. (In English).
10. O'Neill R. Processing and preservation of meat: The effect of freezing and drying technologies on the texture and quality of meat / R. O'Neill, M. Haug // International Journal of Food Science and Technology. – 2014. – Vol. 49, № 3. – P. 658-663. https://doi.org/10.1111/ijfs.12345. (In English).
11. Sejdaxmetova, A.M. Shokty muzdatu adisteri zhane olardyn azyk-tyliktin sapasyna aseri / A.M. Sejdaxmetova, R.A. Sejdaxmetov // Kazak tamaktanu zhane auyl sharuashylygy gylymi zhurnaly. – 2020. – № 3. – B. 34-40. (In Kazakh).
12. Karimov, T.T. Azyk-tulik onimderin saktau zhane ondeu texnologiyasy / T.T. Karimov. – Almaty: Kazak universiteti, 2014. – 300 s. (In Kazakh).

А.С. Камбарова*, А.О. Утегенова[1], А. Асылбекова[1], Ш.А. Абжанова[2], Ж.М. Атамбаева[1]
[1]Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20А
[2]Алматинский технологический университет,
050012, Республика Казахстан, г. Алматы, Алмалинский район, ул. Толе би, 100
*e-mail: kambarova.80@mail.ru

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА ЗАСОЛКИ КОНИНЫ

В статье рассмотрены пути совершенствования технологии посола конины с целью повышения её пищевой и биологической ценности. В ходе исследования применялась растительная посолочная композиция в сочетании с методом шоковой заморозки. В состав посолочной смеси входили поваренная соль, ламинария, сушёный шпинат и чеснок, что позволило обогатить продукт биологически активными веществами и минеральными компонентами. Подготовленные образцы конины подвергались шоковой заморозке при температуре -45°С в течение 3 часов, что способствовало сохранению структуры мышечной ткани и снижению потерь питательных веществ.

Для оценки влияния растительной добавки были использованы различные концентрации посолочной смеси – 5%, 10% и 15%. Полученные образцы анализировали по органолептическим, структурно-механическим и качественным показателям. Результаты исследований показали, что конина, обработанная 10% посолочной смесью, характеризуется наиболее сбалансированными показателями вкуса, аромата и консистенции. Использование ламинарии и шпината способствовало увеличению содержания минеральных веществ, в частности йода, что повышает функциональную ценность продукта, особенно для регионов с йододефицитом. Проведённые исследования подтверждают эффективность применения растительной посолочной композиции и шоковой заморозки как перспективного направления в технологии переработки конины, обеспечивающего сохранение качества и увеличение сроков хранения продукта.

Ключевые слова: *конина, пищевая ценность, шоковая заморозка, посолочная смесь, шпинат, ламинария, срок хранения.*

A.S. Kambarova*, A.O. Utegenova[1], A. Asylbekova[1], Sh.A. Abzhanova[2], Zh.M. Atambaeva[1]
[1]Shakarim University,
071412, Republic of Kazakhstan, Semey, 20A Glinka St.
[2]Almaty University of Technology,
050012, Republic of Kazakhstan, Almaty, Almalinsky District, 100 Tole Bi St.
*e-mail: kambarova.80@mail.ru

IMPROVEMENT OF THE HORSE MEAT SALTING METHOD

The article examines approaches to improving the salting technology of horse meat in order to enhance its nutritional and biological value. In the course of the study, a plant-based salting composition was applied in combination with the shock freezing method. The salting mixture included sodium chloride, laminaria, dried spinach, and garlic, which made it possible to enrich the product with biologically active substances and mineral components. The prepared horse meat samples were subjected to shock freezing at a temperature of -45°C for 3 hours, contributing to the preservation of muscle tissue structure and reduction of nutrient losses.

To assess the effect of the plant-based additive, different concentrations of the salting mixture – 5%, 10%, and 15% – were used. The resulting samples were analyzed based on organoleptic, structural-mechanical, and quality indicators. The research results showed that horse meat treated with a 10% salting mixture exhibited the most balanced characteristics in terms of taste, aroma, and texture. The use of laminaria and spinach contributed to an increase in mineral content, particularly iodine, thereby enhancing the functional value of the product, especially for regions with iodine deficiency. The conducted studies confirm the effectiveness of using a plant-based salting composition combined with shock freezing as a promising approach in horse meat processing technology, ensuring quality preservation and extended shelf life.

Key words: *horse meat, nutritional value, shock freezing, salting mixture, spinach, laminaria, shelf life.*

Авторлар туралы мәліметтер

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.

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.

Аяжан Асылбекова – «Тамақ техологиясы кафедрасының» 6В072700 – «Азық-түлік өнімдерінің технолоиясы» білімберу бағдарламасының 3-курс студенті. Қазақстан; e-mail: ayazhan.018@icloud.com.

Шолпан Аманкелдыкызы Абжанова – т.ғ. к., ассоц. профессор., Алматы технологиялық университеті, «Қолданбалы биотехнология» кафедрасының меңгерушісі, Қазақстан; e-mail: sholpan-ab@mail.ru. ORCID https://orcid.org/0000-0003-3209-6855.

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.

Сведения об авторах

Арай Сагинбековна Камбарова * – PhD, и.о. доцента кафедры «Технология пищевых продуктов», Шәкәрім университет, Казахстан; e-mail: kambarova@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4289-3818.

Асия Оразбековна Утегенова – PhD, и.о. доцента кафедры «Технология пищевых продуктов», Шәкәрім университет, г. Семей, Казахстан; e-mail: asia_aksu@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3378-6815.

Аяжан Асылбекова – студентка 3 курса образовательной программы 6В072700 «Технология пищевых продуктов», кафедра «Технология пищевых продуктов», Казахстан; e-mail: ayazhan.018@icloud.com.

Шолпан Аманкельдыкызы Абжанова – к.т.н., доцент, Алматинский технологический университет, заведующая кафедрой «Прикладная биотехнология», Казахстан; e-mail: sholpan-ab@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3209-6855.

Жибек Манаповна Атамбаева – старший преподаватель кафедры «Технология пищевых продуктов», Шәкәрім университет, г. Семей, Казахстан; e-mail: zh.atambayeva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7899-870X.

Information about the authors

Aray Saginbekovna Kambarova* – PhD, Acting Associate Professor, Department of Food Technology, Shakarim University, Semey, Kazakhstan; e-mail: kambarova@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4289-3818.

Asiya Orazbekovna Utegenova – PhD, Acting Associate Professor, Department of Food Technology, Shakarim University, Semey, Kazakhstan; e-mail: asia_aksu@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3378-6815.

Ayazhan Asylbekova – 3rd-year student of the educational program 6B072700 «Food Product Technology», Department of Food Technology, Kazakhstan; e-mail: ayazhan.018@icloud.com.

Sholpan Amankeldykzy Abzhanova – PhD, Associate Professor, Almaty Technological University, Head of the Department of Applied Biotechnology, Kazakhstan; e-mail: sholpan-ab@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3209-6855.

Zhibek Manapovna Atambayeva – Senior Lecturer, Department of Food Technology, Shakarim University, Semey, Kazakhstan; e-mail: zh.atambayeva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7899-870X.

Редакцияға енуі 26.01.2026
Өңдеуден кейін түсуі 05.03.2026
Жариялауға қабылданды 10.04.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-32

МРНТИ: 65.59.29

А.О. Майжанова*, К.Ж. Амирханов, Ш.К. Жакупбекова, А.М. Байкадамова, Н.Р. Муслимова
Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А
*e-mail: fquekm2710@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЦЕПТУРЫ И ОПТИМАЛЬНОГО СОСТАВА МЯСОРАСТИТЕЛЬНЫХ ПАШТЕТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛЬНЯНОЙ И КОНОПЛЯНОЙ МУКИ

Аннотация: *В статье представлены результаты комплексных исследований по разработке рецептуры мясорастительных паштетов с использованием растительного сырья – льняной и конопляной муки. Объектом исследования являлись паштеты, изготовленные на основе мяса индейки и утки с добавлением растительных компонентов в количестве 4-10% в соотношении 1:1. В работе применялись стандартные физико-химические, функционально-технологические и органолептические методы анализа, позволяющие всесторонне оценить качество готового продукта. Установлено, что введение растительного сырья оказывает существенное влияние на химический состав паштетов: содержание белка увеличивается до 19,8%, возрастает доля минеральных веществ и углеводов, при одновременном снижении массовой доли влаги. Показано, что добавление льняной и конопляной муки положительно влияет на функционально-технологические свойства продукта: влагоудерживающая способность увеличивается до 82%, улучшаются структурно-механические характеристики фарша, а снижение активности воды способствует повышению микробиологической стабильности и увеличению сроков хранения. Результаты органолептической оценки показали, что оптимальной является дозировка растительного сырья на уровне 6% (льняная мука – 3%, конопляная мука – 3%), при которой достигается наилучшее сочетание вкуса, запаха, цвета и консистенции. Увеличение дозировки до 8–10% приводит к ухудшению органолептических показателей, в частности появлению горечи и изменению текстуры продукта. Научная новизна работы заключается в обосновании рационального сочетания мясного и растительного сырья с учетом их комплексного влияния на показатели качества паштетов. Практическая значимость исследования состоит в возможности применения разработанной рецептуры при производстве функциональных мясных продуктов с повышенной пищевой и биологической ценностью, соответствующих современным требованиям здорового питания.*

Ключевые слова: *мясорастительные паштеты; растительное сырьё; льняная мука; конопляная мука; функциональные продукты; пищевая и биологическая ценность.*

Введение

Современная пищевая промышленность ориентируется на производство функциональных продуктов с повышенной пищевой и биологической ценностью, способствующих формированию здорового рациона и удовлетворению потребностей организма в полноценном белке, жирных кислотах и микроэлементах. Особое внимание уделяется разработке комбинированных мясорастительных продуктов, в которых

©А.О. Майжанова, К.Ж. Амирханов, Ш.К. Жакупбекова, А.М. Байкадамова, Н.Р. Муслимова, 2026

рационально сочетаются животное и растительное сырьё. Такое сочетание позволяет не только оптимизировать аминокислотный состав и жирнокислотный профиль, но и повысить пищевую ценность конечного продукта, снизить себестоимость и расширить функциональные свойства [1] .

Паштеты как гомогенизированные продукты с мажущейся консистенцией являются перспективной группой продуктов для промышленного производства. Их высокая усвояемость, мягкая текстура и возможность обогащения биологически активными компонентами делают паштеты удобным объектом для инновационных разработок. Введение растительных ингредиентов, таких как льняная и конопляная мука, позволяет обогатить продукт полноценным растительным белком, полиненасыщенными жирными кислотами, пищевыми волокнами, витаминами и минералами, что способствует улучшению нутритивных характеристик и функциональных свойств [2-4].

На сегодняшний день в научной литературе отмечается ограниченное количество работ, посвящённых комплексной оценке влияния растительных компонентов на физико-химические, технологические и органолептические свойства мясорастительных паштетов. Существующие исследования в основном сосредоточены на отдельных аспектах – либо на химическом составе, либо на органолептике, без комплексного анализа функционально-технологических показателей, таких как влагоудерживающая способность, активность воды и структурно-механические свойства фарша [5-7].

Целью настоящей работы является разработка рецептуры мясорастительных паштетов с добавлением льняной и конопляной муки и определение оптимального состава, обеспечивающего максимальное сочетание пищевой ценности, функционально-технологических характеристик и органолептических свойств. Реализация данной цели позволит создать продукт, отвечающий современным требованиям здорового питания и функционального назначения.

Условия и методы исследования

Исследования проводились на базе лаборатории технологии мясных продуктов НАО «Шәкәрім университет» (г. Семей, Республика Казахстан).

В качестве основного мясного сырья использовали охлаждённое мясо индейки и утки, соответствующее требованиям ГОСТ 31479-2012 и ГОСТ 31480-2012.

Для растительных компонентов применяли льняную муку и конопляную муку пищевого назначения, изготовленные по ТУ 9110-001-12345678-2019 и обладающие высоким содержанием белка (до 32%) и пищевых волокон (около 8-10%).

Для оценки качества применялись следующие методы:

– физико-химические показатели – массовая доля влаги (ГОСТ 33319-2015), белка (по Кьельдалю, ГОСТ 25011-2017), жира (экстракционный метод, ГОСТ 23042-2015), зольность;

– Функционально-технологические показатели определяли следующим образом: влагосвязывающую способность – методом прессования; активность воды – методом равновесной влажности; структурно-механические свойства – предельное напряжение сдвига с помощью пенетрометрического метода; pH – pH-метром в водной суспензии.

– органолептическая оценка – по 5-балльной шкале в соответствии с ГОСТ 9959-2015, включающая анализ внешнего вида, вкуса, запаха, цвета и консистенции.

Все эксперименты проводились в трёхкратной повторности, статистическая обработка данных осуществлялась методами вариационного анализа с использованием пакета Statistica 10.0 и Microsoft Excel 2016. Различия между средними значениями считались статистически значимыми при уровне вероятности $p \leq 0,05$.

Результаты исследований и их обсуждение

В таблице 1 отражен состав контрольного и экспериментальных образцов мясорастительного паштета, разработанных в рамках настоящего исследования. Контрольный образец был изготовлен по рецептуре Л.Е. Мартемьяновой (патент RU №2632172) и включал мясо индейки (50%), печень птицы (12%), сердце (10%), жир (4%), кожу (3%), фасоль (10%), лук (6%) и сливки 10%-ные (5%), а также воду для гидратации (4%) и бульон (20%). Для вкусового улучшения применялись тмин (0,2%), куркума (0,2%), черный перец (0,1%) и хлорид натрия (1,4%) [8].

Таблица 1 – Рецептура контрольного и опытных образцов мясорастительного паштета

Наименование сырья и материалов	Содержание, %				
	контрольный образец	опытные образцы			
		№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Основное сырье					
Мясо индейки	50	30	30	30	30
Мясо утки	-	20	20	20	20
Печень птицы	12	12	12	12	12
Сердце птицы	10	10	10	10	10
Жир птицы	4	4	4	4	4
Кожа птицы	3	3	3	3	3
Фасоль	10	-	-	-	-
Кабачок	-	6	4	2	-
Льняная мука	-	2	3	4	5
Конопляная мука	-	2	3	4	5
Лук репчатый	6	6	6	6	6
Сливки 10%-ные	5	-	-	-	-
Вода для гидратации	4	9	9	9	9
Бульон	20	20	20	20	20
Всего	124	124	124	124	124
Выход	100	100	100	100	100
вкусовые добавки на 100 кг сырья					
Тмин	0,2	-	-	-	-
Орех мускатный	-	0,2	0,2	0,2	0,2
Куркума	0,2	-	-	-	-
Паприка	-	0,2	0,2	0,2	0,2
Перец черный молотый	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Хлорид натрия	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
Всего	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9

Экспериментальные образцы отличались от контрольного введением мясного сырья утки и растительных компонентов – кабачка, льняной и конопляной муки. В частности, мясо индейки было снижено до 30%, мясо утки введено в количестве 20%, а фасоль и сливки исключены. Кабачок использовался в диапазоне 2-6% в зависимости от образца. Льняная и конопляная мука вводились в пропорции 1:1 с общей концентрацией 4-10%, что позволяло обогатить продукт растительным белком, жирами и углеводами.

Все образцы включали стандартные специи – мускатный орех (0,2%), паприку (0,2%) и черный молотый перец (0,1%), а также соль (1,4%). Общая масса сырья превышала 100% за счет суммарного включения жидких компонентов, при этом выход готового продукта был стандартизирован на уровне 100%.

Таким образом, разработка рецептуры экспериментальных образцов была направлена на создание мясорастительного паштета с улучшенными питательными и функционально-технологическими характеристиками за счет рационального сочетания мясного и растительного сырья, что обеспечивало как высокую пищевую ценность, так и оптимальные органолептические свойства.

Далее нами было исследовано влияние растительного сырья на физико-химические показатели мясорастительного паштета. В таблице 2 приведены результаты исследования химического состава мясорастительных паштетов.

Таблица 2 – Химический состав мясорастительных паштетов

№	Показатели, в %	Контрольный образец	Опытные образцы с добавлением льняной и конопляной муки (соотношение 1:1)			
			4%	6%	8%	10%
1.	Влага	72,4	69,5	68,6	67,2	66,7
2.	Белок	16,73	18,3	18,5	19,5	19,8
3.	Жир	9,48	5,9	6,1	6,3	6,3
4.	Зола	1,2	2,2	2,3	2,4	2,5
5.	Углевод	0,19	4,1	4,5	4,6	4,7

Введение в рецептуру мясорастительных паштетов растительных компонентов на основе льняной и конопляной муки привело к достоверным изменениям химического состава (табл. 2).

Массовая доля влаги демонстрирует тенденцию к снижению по мере увеличения дозировки растительного сырья – с 72,4 % в контрольном образце до 66,7 % при содержании 10 % добавок. Вероятно, данное явление обусловлено высокой гидрофильностью полисахаридов и белков растительного происхождения, способных связывать свободную влагу и формировать более плотную пространственную структуру фарша.

Содержание белка последовательно возрастало от 16,73 % до 19,8 %. Данный факт указывает на синергетический эффект взаимодействия животного и растительного белков, приводящий к увеличению общей концентрации протеина и улучшению его аминокислотного профиля. Известно, что льняная и конопляная мука характеризуются значительным содержанием полноценного белка (до 32-35 %), что в совокупности с белками мяса птицы обеспечивает повышение биологической ценности готового продукта.

Одновременно отмечено уменьшение доли жира с 9,48 % в контрольной рецептуре до 6,1-6,3 % в опытных образцах. Данный факт объясняется частичной заменой жиросодержащего сырья растительными компонентами, не обладающими выраженным липидным профилем, а также улучшением влагоудерживающих характеристик фарша, что снижало диффузионные потери жира при термической обработке.

Показатель зольности возрос с 1,2 % до 2,5 %, что свидетельствует об обогащении продукта минеральными элементами – кальцием, магнием, железом и фосфором, характерными для растительных ингредиентов. Данное обстоятельство рассматривается как дополнительный фактор повышения физиологической полноценности паштетов.

Увеличение доли углеводов с 0,19 % до 4,7 % связано с присутствием пищевых волокон и низкомолекулярных углеводов, входящих в состав растительных добавок. Эти соединения обладают выраженными влаго- и жиросвязывающими свойствами, положительно влияющими на текстуру и стабильность продукта, а также выполняют функциональную роль как пребиотические компоненты рациона.

В целом, включение растительных ингредиентов на основе льняной и конопляной муки способствовало увеличению содержания белка, золы и углеводов при одновременном снижении влаги и жира. Комплексное изменение этих показателей указывает на формирование продукта с повышенной пищевой плотностью, улучшенной структурной стабильностью и высокой биологической ценностью.

С учётом совокупности физико-химических и сенсорных характеристик установлено, что оптимальной дозировкой растительного сырья является 6 % (льняная – 3 %, конопляная – 3 %), обеспечивающая рациональное соотношение показателей пищевой ценности и органолептического качества.

Введение растительных компонентов в рецептуру мясорастительных паштетов оказало существенное влияние на их функционально-технологические характеристики (табл. 3).

Таблица 3 – Функционально-технологические показатели мясорастительных паштетов

Образец	Влагосвязывающая способность (ВСС, %)	Предельное напряжение сдвига (ПНС)	Активность воды (aw)	pH
Контроль	72	60	0.97	6.5
4%	75	65	0.96	6.4
6%	78	70	0.95	6.3
8%	80	68	0.94	6.2
10%	82	66	0.93	6.1

Анализ данных показывает, что использование растительного сырья способствует активному изменению физико-химического состояния дисперсной системы паштета.

Влагосвязывающая способность (ВСС) возрастает с 72 % (контроль) до 82 % (10 % растительных добавок), что обусловлено присутствием в составе льняной и конопляной муки гидрофильных белков, полисахаридов и пищевых волокон, способных формировать

устойчивые к термическому воздействию белково-углеводные гели. Повышение ВСС свидетельствует об усилении сорбционно-гидратационного потенциала системы и способствует уменьшению потерь влаги при тепловой обработке и хранении. Оптимальное значение ВСС наблюдалось при добавлении 6 % растительного сырья, обеспечивая пластичную консистенцию и сочность готового продукта.

Предельное напряжение сдвига (ПНС) характеризует механическую прочность и устойчивость структуры фарша. Оно увеличивалось от 60 Па (контроль) до 70 Па (6 % растительных компонентов), что свидетельствует о более плотной и однородной структуре системы вследствие формирования дополнительных белково-полисахаридных связей. При дальнейшем росте дозировки растительного сырья наблюдалось незначительное снижение ПНС до 66 Па, вероятно вызванное избыточным содержанием клетчатки, нарушающей целостность белковой сетки и повышающей хрупкость структуры.

Активность воды (aw) последовательно уменьшалась с 0,97 до 0,93 ед. по мере увеличения доли растительных добавок, что указывает на снижение количества свободной влаги и повышение микробиологической стабильности продукта. Это особенно важно для консервированных изделий, где снижение aw является одним из ключевых факторов безопасности и долговечности.

Показатель pH снижался в интервале 6,5 → 6,1, что связано с присутствием в растительном сырье органических кислот и фенольных соединений. Снижение pH в комбинации с уменьшением активности воды создаёт благоприятные условия для замедления микробиологических процессов и увеличения срока хранения.

Таким образом, добавление растительных компонентов способствует улучшению коллоидно-структурных свойств мясорастительных паштетов. Повышение влагосвязывающей способности и предельного напряжения сдвига при умеренном снижении aw и pH свидетельствует об укреплении пространственной структуры, повышении термостабильности и микробиологической устойчивости системы. Наиболее рациональным признано использование 6 % растительного сырья (льняная – 3 %, конопляная – 3 %), что обеспечивает оптимальные технологические и сенсорные характеристики готового изделия.

При формировании спроса на продукт, решающую роль играют органолептические показатели. Для более полного отражения влияния введения растительного сырья в рецептуру мясорастительного сырья нами были исследованы органолептические показатели контрольного и опытных образцов мясорастительных паштетов (рис. 1).

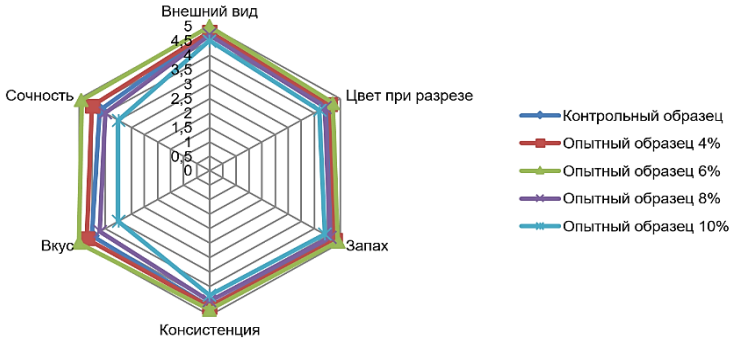


Рисунок 1 – Результаты органолептической оценки контрольного и опытных образцов

Органолептическая оценка включала анализ внешнего вида, цвета, запаха, вкуса и консистенции по пятибалльной шкале в соответствии с требованиями ГОСТ 9959-2015.

По совокупности баллов наивысшую оценку получил опытный образец № 2, содержащий 6 % растительных добавок (льняная мука – 3 %, конопляная мука – 3 %). Продукт характеризовался однородной пастообразной консистенцией, чистым мясным вкусом с лёгкими орехово-зерновыми нотами, приятным ароматом и равномерно окрашенной поверхностью.

Увеличение содержания растительных компонентов до 8-10 % вызывало снижение потребительских характеристик: дегустаторы отмечали появление посторонней горечи, неравномерность окраски и уплотнение структуры. Вероятно, это связано с избыточным содержанием фенольных соединений и хлорофиллов конопляной муки, способных оказывать

горьковатое послевкусие, а также с уменьшением доли мясного сырья, формирующего характерный вкус и аромат продукта.

Таким образом, по критерию органолептической приемлемости оптимальной признана рецептура с 6 % растительного сырья. Именно в этом варианте достигается гармоничное сочетание вкуса, аромата, цвета и текстуры, обеспечивающее высокую потребительскую привлекательность при одновременном повышении пищевой и биологической ценности паштета [9, 10].

Заключение

Проведённые исследования показали, что частичная замена мясного сырья растительными компонентами (льняной и конопляной мукой) позволяет целенаправленно регулировать химический состав и функционально-технологические свойства мясорастительных паштетов.

Установлено, что с увеличением доли растительного сырья повышается содержание белка, золы и углеводов при одновременном снижении массовой доли влаги и жира. Одновременно наблюдается усиление влагосвязывающей способности и рост предельного напряжения сдвига, что свидетельствует о формировании более устойчивой и гомогенной структуры фарша. Снижение активности воды и показателя pH способствует повышению микробиологической стабильности готового продукта.

Оптимальной признана дозировка растительных ингредиентов на уровне 6 % (3 % льняной + 3 % конопляной муки), при которой обеспечивается наиболее рациональное соотношение пищевой, технологической и органолептической характеристик.

Таким образом, полученные данные подтверждают возможность использования растительных белково-углеводных компонентов при разработке функциональных мясорастительных консервов и паштетов, обладающих повышенной биологической ценностью и улучшенными структурно-текстурными свойствами. Результаты исследований могут быть использованы при модернизации технологий переработки мяса птицы, создании продукции здорового питания и расширении ассортимента комбинированных продуктов нового поколения.

Список литературы

1. Hemp flour as a functional ingredient for the partial replacement of nitrites in a minced meat model: effect on nutrient composition and antioxidant profile / G. Papatzimos et al // Applied Sciences. – 2024. – № 14(9). – P. 3925. https://doi.org/10.3390/app14093925.
2. Effect of flax and hemp flour on the nutritional value of turkey-duck meat pate / A. Maizhanova et al // Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences. – 2024. – № 18. – P. 874-886. https://doi.org/10.5219/1977.
3. Characteristics of low-fat meat emulsion systems with pork fat replaced by vegetable oils and rice bran fiber / Y.S. Choi et al // Meat Science. – 2009. – Vol 82, № 2. – P. 266-271. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2009.01.019.
4. The effect of the addition of hemp seeds, amaranth, and golden flaxseed on the nutritional value, physical, sensory characteristics, and safety of poultry pâté / A. Augustyńska-Prejsnar et al // Appl. Sci. – 2022. – № 12(10). – P. 5289; https://doi.org/10.3390/app12105289.
5. Айрапетян А.А. Влияние льняной муки на потребительские свойства фаршевых систем / А.А. Айрапетян, В.И. Манжесов, И.А. Глотова // Международный научно-исследовательский журнал. – 2022. – № 6(120). https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.120.6.098.
6. Вайтанис М.А. Использование конопляной муки в технологии мясных рубленых полуфабрикатов / М.А. Вайтанис, З.Р. Ходырева // Вестник КрасГАУ. – 2021. – № 1. – С. 126-133. https://doi.org/10.36718/1819-4036-2021-1-126-133.
7. Момчилова М.М. Физико-химические и текстурные исследования мясных паштетов, изготовленных с добавлением пребиотиков и муки из сушеных томатов / М.М. Момчилова, Г.И. Живанович // Здоровье человека, теория и методика физической культуры и спорта. – 2020. – Т. 2, № 18. – С. 55-61. https://doi.org/10.14258/zosh(2020)2.7.
8. Мартемьянова Л.Е. Мясорастительные паштеты функциональной направленности / Л.Е. Мартемьянова, А.В. Ясаков // Международный научно-исследовательский журнал. – 2013. – № 7(14). – С. 138-139.

9. Increasing meat product functionality by the addition of milled flaxseed (Linum usitatissimum) / M. Zając et al // Journal of the Science of Food and Agriculture. – 2017. – № 97(9). – P. 2865-2874. https://doi.org/10.1002/jsfa.8116.
10. Troy D.J. Consumer perception and the role of science in the meat industry / D.J. Troy, J.P. Kerry // Meat Science. – 2010. – № 86(1). – P. 214-226. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2010.05.009.

References

1. Hemp flour as a functional ingredient for the partial replacement of nitrites in a minced meat model: effect on nutrient composition and antioxidant profile / G. Papatzimos et al // Applied Sciences. – 2024. – № 14(9). – R. 3925. https://doi.org/10.3390/app14093925. (In English).
2. Effect of flax and hemp flour on the nutritional value of turkey-duck meat pate / A. Maizhanova et al // Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences. – 2024. – № 18. – R. 874-886. https://doi.org/10.5219/1977. (In English).
3. Characteristics of low-fat meat emulsion systems with pork fat replaced by vegetable oils and rice bran fiber / Y.S. Choi et al // Meat Science. – 2009. – Vol 82, № 2. – R. 266-271. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2009.01.019. (In English).
4. The effect of the addition of hemp seeds, amaranth, and golden flaxseed on the nutritional value, physical, sensory characteristics, and safety of poultry pâté / A. Augustyńska-Prejsnar et al // Appl. Sci. – 2022. – № 12(10). – R. 5289; https://doi.org/10.3390/app12105289. (In English).
5. Airapetyan A.A. VLIYANIE L'NYANOI MUKI NA POTREBITEL'SKIE SVOISTVA FARSHEVYKh SISTEM / A.A. Airapetyan, V.I. Manzhesov, I.A. Glotova // Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal. – 2022. – № 6(120). https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.120.6.098. (In Russian).
6. Vaitanis M.A. Ispol'zovanie konoplyanoi muki v tekhnologii myasnykh rublenykh polufabrikatov / M.A. Vaitanis, Z.R. Khodyreva // Vestnik KrasGAU. – 2021. – № 1. – S. 126-133. https://doi.org/10.36718/1819-4036-2021-1-126-133. (In Russian).
7. Momchilova M.M. Fiziko-khimicheskie i teksturnye issledovaniya myasnykh pashtetov, izgotovlennykh s dobavleniem prebiotikov i muki iz sushenykh tomatov / M.M. Momchilova, G.I. Zhivanovich // Zdorov'e cheloveka, teoriya i metodika fizicheskoi kul'tury i sporta. – 2020. – T. 2, № 18. – S. 55-61. https://doi.org/10.14258/zosh(2020)2.7. (In Russian).
8. Martem'yanova L.E. Myasorastitel'nye pashtety funktsional'noi napravlennosti / L.E. Martem'yanova, A.V. Yasakov // Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal. – 2013. – № 7(14). – S. 138-139. (In Russian).
9. Increasing meat product functionality by the addition of milled flaxseed (Linum usitatissimum) / M. Zając et al // Journal of the Science of Food and Agriculture. – 2017. – № 97(9). – R. 2865-2874. https://doi.org/10.1002/jsfa.8116. (In English).
10. Troy D.J. Consumer perception and the role of science in the meat industry / D.J. Troy, J.P. Kerry // Meat Science. – 2010. – № 86(1). – R. 214-226. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2010.05.009. (In English).

А.О. Майжанова*, Қ.Ж. Амирханов, Ш.Қ. Жакупбекова, А.М. Байкадамова, Н.Р. Муслимова
Шәкәрім университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинки көшесі, 20 А
*e-mail: fquekm2710@mail.ru

ЗЫҒЫР ЖӘНЕ ҚАРАСОРА ҰНЫН ҚОЛДАНА ОТЫРЫП, ЕТ-ӨСІМДІК ПАШТЕТТЕРІНІҢ РЕЦЕПТУРАСЫН ЖӘНЕ ОҢТАЙЛЫ ҚҰРАМЫН ЗЕРТТЕУ

Мақалада өсімдік шикізатын – зығыр және қарасора ұнын пайдалана отырып, ет-өсімдік паштеттерінің рецептурасын әзірлеуге арналған кешенді зерттеулердің нәтижелері ұсынылған. Зерттеу объектісі ретінде күркетауық пен үйрек етінен дайындалған паштеттер алынды, оған өсімдік компоненттері 4-10% аралығында, 1:1 қатынасында қосылды. Жұмыста стандартты физико-химиялық, функционалды-технологиялық және органолептикалық талдау әдістері қолданылып, дайын өнімнің сапасы жан-жақты бағаланды. Өсімдік шикізатын енгізу паштеттердің химиялық құрамына елеулі әсер ететіні анықталды: ақуыз мөлшері 19,8%-ға дейін артты, минералдық заттар мен көмірсулардың үлесі көбейді, ал ылғал мөлшері төмендеді. Зығыр және қарасора ұнын қосу өнімнің функционалды-технологиялық қасиеттеріне оң әсер еткені көрсетілді:

ылғалды ұстап қалу қабілеті 82%-ға дейін өсті, фарштың құрылымдық-механикалық сипаттамалары жақсарды, ал судың активтілігінің төмендеуі микробиологиялық тұрақтылықты арттырып, сақтау мерзімін ұзартады. Органолептикалық бағалау нәтижелері бойынша, өсімдік шикізатының оптималды мөлшері 6% (зығыр ұны – 3%, қарасора ұны – 3%) болып, дәм, иіс, түс және консистенцияның ең жақсы үйлесімі қамтамасыз етіледі. 8-10% мөлшерге арттыру органолептикалық көрсеткіштердің нашарлауына, әсіресе ащылықтың пайда болуына және өнімнің текстурасының өзгеруіне әкеледі. Жұмыстың ғылыми жаңалығы – паштеттердің сапалық көрсеткіштеріне кешенді әсерді ескере отырып, ет және өсімдік шикізатын рационалды үйлестіруді негіздеу. Зерттеудің практикалық маңызы – әзірленген рецептураны биологиялық құндылығы жоғары, заманауи сау тамақтану талаптарына сай функционалды ет өнімдерін өндіруде қолдануға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: *ет-өсімдік паштеттері; өсімдік тектес шикізат; зығыр ұны; қарасора ұны; функционалды өнімдер; тағамдық және биологиялық құндылық.*

A.O. Maizhanova*, K.Zh. Amirkhanov, Sh.K. Zhakupbekova, A.M. Baykadamova, N.R. Muslimova
Shakarim University,
071412, Republic of Kazakhstan, Semey, 20A Glinki St.
*e-mail: fquekm2710@mail.ru

STUDY OF FORMULATION AND OPTIMAL COMPOSITION OF MEAT-PLANT PÂTÉS USING FLAX AND HEMP FLOUR

The article presents the results of comprehensive studies on the development of formulations for meat-plant pâtés using plant ingredients – flax and hemp flour (зығыр және қарасора ұны). The object of the study was pâtés made from turkey and duck meat with the addition of plant components in the amount of 4-10% in a 1:1 ratio. Standard physicochemical, functional-technological, and organoleptic methods were applied to comprehensively assess the quality of the final product. It was found that the inclusion of plant ingredients significantly affects the chemical composition of pâtés: protein content increased up to 19.8%, the share of minerals and carbohydrates increased, while moisture content decreased. The addition of flax and hemp flour positively influenced the functional-technological properties of the product: water-holding capacity increased up to 82%, structural-mechanical characteristics of the mince improved, and reduced water activity contributed to enhanced microbiological stability and prolonged shelf life. Organoleptic evaluation results indicated that the optimal dosage of plant ingredients is 6% (flax flour – 3%, hemp flour – 3%), ensuring the best combination of taste, aroma, color, and consistency. Increasing the dosage to 8-10% led to a deterioration of organoleptic properties, in particular the appearance of bitterness and changes in product texture. The scientific novelty of the study lies in the rationale for the rational combination of meat and plant ingredients, considering their complex influence on pâté quality indicators. The practical significance of the study is the possibility of applying the developed formulation in the production of functional meat products with enhanced nutritional and biological value, meeting modern healthy nutrition requirements.

Key words: *meat-plant pâtés; plant raw materials; flaxseed flour; hemp flour; functional products; nutritional and biological value.*

Сведения об авторах

Айгуль Омарбековна Майжанова – докторант кафедры «Пищевая технология», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: fquekm2710@mail.ru. ORCID:https://orcid.org/0000-0002-4845-9465.

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.

Шугыла Кадыровна Жакупбекова – постдокторант кафедры «Пищевая технология», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: siyanie__88@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7558-9871.

Асемгуль Мадениетовна Байкадамова – PhD, руководитель центра организации научных исследований, Шәкәрім университет; e-mail: a.baikadamova@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0062-6997.

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.

Авторлар туралы мәліметтер

Айгуль Омарбековна Майжанова – «Тамақ технологиясы» кафедрасының докторанты, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail:fquekm2710@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4845-9465.

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.

Шугыла Кадыровна Жакупбекова – «Тамақ технологиясы» кафедрасының постдокторанты, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: siyanie__88@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7558-9871.

Асемгуль Маденietовна Байкадамова – PhD, Ғылыми зерттеулерді ұйымдастыру орталығының жетекшісі, Шәкәрім университеті; e-mail: a.baikadamova@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0062-6997.

Назерке Рахифовна Муслимова – техника ғылымдарының магистрі, «Тамақ технологиясы» кафедрасының докторанты, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: muslimova.n.r@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2536-0590.

Information about the authors

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.

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.

Shugyla Kadyrovna – postdoctoral fellow of the Department of «Food Technology», National Academy of Sciences of Kazakhstan, Republic of Kazakhstan; e-mail: siyanie__88@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7558-9871.

Asemgul Baikadamova – PhD, Head of the Research Organization Center, Shakarim University; e-mail: a.baikadamova@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0062-6997.

Nazereke Muslimova – Master of Technical Sciences, Doctoral Student at the Department of Food Technologies, Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: muslimova.n.r@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2536-0590.

Поступила в редакцию 30.03.2026
Поступила после доработки 23.04.2026
Принята к публикации 29.04.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-33

ҒТАХР: 65.65.03

CC BY 4.0
Check for updates

А.Н. Нургазезова[1], А.К. Игенбаев[2], Ж. Қалибекқызы[1], Г.Н. Нұрымхан[1], Х.М. Нугманова[1*]

[1]Шәкәрім университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинка көшесі, 20 А,
[2]С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті,
010011, Қазақстан Республикасы, Астана қ., Жеңіс даңғылы, 62,
*e-mail: togalak87@mail.ru.

ЖЫЛҚЫ МАЙЫНЫҢ ФИЗИКА-ХИМИЯЛЫҚ КӨРСЕТКІШТЕРІ ЖӘНЕ МАЙ ҚЫШҚЫЛДЫҚ ҚАСИЕТТЕРІНІҢ ТАҒАМДЫҚ ҚҰНДЫЛЫҚ ТҰРҒЫСЫНАН БАҒАЛАНУЫ

Аңдатпа: *Жануар тектес майлардың тағамдық және биологиялық құндылығы олардың анатомиялық орналасуына, физика-химиялық қасиеттеріне және май қышқылдық құрамына тікелей байланысты. Қазіргі таңда функционалдық тағам өнімдерін әзірлеуде жоғары биологиялық белсенділігі бар табиғи липидтік шикізаттарды тиімді пайдалану маңызды ғылыми бағыттардың бірі болып табылады. Осы тұрғыдан алғанда жылқы майы дәстүрлі тағамдық ресурс ретінде ғана емес, сонымен қатар перспективалы функционалдық ингредиент ретінде ғылыми қызығушылық тудырады.*

©А.Н. Нургазезова, А.К. Игенбаев, Ж. Қалибекқызы, Г.Н. Нұрымхан, Х.М. Нугманова, 2026

Осы мақалада жылқының іш майы, ішкі май (қазы) және теріасты майының (жая) физика-химиялық және май қышқылдық қасиеттері салыстырмалы түрде зерттелді. Зерттеу барысында қышқылдық, пероксидтік және йод сандары, ылғал мен ұшқыш заттардың массалық үлесі, сондай-ақ негізгі май қышқылдарының құрамы анықталды. Эксперименттік нәтижелер май үлгілері арасында тотығуға төзімділік пен қанықпаған май қышқылдарының үлесі және сапалық көрсеткіштер бойынша елеулі айырмашылықтар бар екенін көрсетті. Әсіресе теріасты майында қанықпаған май қышқылдарының мөлшері жоғары екені анықталып, оның тағамдық және биологиялық тұрғыдан құндылығы жоғары екендігі дәлелденді.

Алынған деректер жылқы майының әртүрлі анатомиялық түрлерін тағам өнімдерінде мақсатты түрде қолдану мүмкіндігін негіздейді. Сонымен қатар зерттеу нәтижелері жылқы майын функционалдық, дәстүрлі және құрама тағам өнімдерінің рецептураларын әзірлеуде тиімді пайдалану үшін ғылыми алғышарттарды қалыптастырады және отандық тағам өнеркәсібінде жоғары сапалы май өнімдері ассортиментін кеңейтуге негіз болады.

Түйін сөздер: *жылқы майы, май қышқылдары, тағамдық құндылық, биологиялық белсенділік, экологиялық таза өнім.*

Кіріспе

Қазіргі таңда тамақтану ғылымында тағамдық майлардың сапасы мен биологиялық құндылығын арттыру мәселесі ерекше мәнге ие. Бұл тұрғыда жануар майларының майқышқылдық құрамы мен биологиялық белсенді компоненттерінің арақатынасы адам денсаулығына тікелей әсер ететін негізгі фактор ретінде қарастырылады [1].

Жылқы шаруашылығы қазақ халқының дәстүрлі мал шаруашылығы жүйесінде маңызды орын алады және жылқы малы ежелден-ақ тағамдық мақсатта кеңінен пайдаланылып, қазы, қарта, жал, жая, қымыз сияқты ұлттық тағам өнімдерін өндірудің негізгі шикізат көзі болып табылады [2].

Соңғы жылдары Қазақстан Республикасының агроөнеркәсіптік кешен құрылымында жылқы шаруашылығы жылдан-жылға тұрақты өсім көрсетіп келеді. Ресми деректерге сәйкес, 2023 жылға қарай елдегі жылқы саны шамамен 4,0 млн басқа жетіп, 2024-2025 жылдары бұл көрсеткіш 4,2-4,4 млн-нан асып, осы саланың қарқынды даму динамикасын айқындады [3]. Жылқы басының көбеюі ауыл шаруашылығының ілеспе салаларының дамуына, азық-түлік және экологиялық қауіпсіздіктің артуына, сондай-ақ ауылдық аумақтардың экономикалық әлеуетінің нығаюына ықпал етеді. Осыған байланысты жылқы шаруашылығы өнімдерінің құндылығы мен сапалық көрсеткіштеріне әсер ететін негізгі факторларды кешенді түрде зерттеу маңызды ғылыми бағыт болып саналады.

Орталық Азия халықтарының дәстүрлі тағам рационында жылқы етінен бөлек, оның майы да ежелден қолданылып келгенімен, кешенді салыстырмалы зерттеу жұмыстары жеткілікті деңгейде жүргізілмеген. Соңғы ғылыми деректер жылқы майының басқа жануар майларымен салыстырғанда қанықпаған май қышқылдарына бай екенін көрсетеді [4].

Осы орайда біз жылқының іш майы, ішкі (қазы) және теріасты (жая) майларының май қышқылдық қасиеттеріне кешенді салыстырмалы зерттеу жүргізуді жөн көрдік.

Ғылыми деректерге сәйкес, жылқы майында линол (C18:2) және α-линолен (C18:3) қышқылдарының елеулі мөлшерде болуы оның антиатерогендік және метаболизмді реттеуші қасиеттерін негіздейді [5, 6]. Бұл май қышқылдары адам ағзасында синтезделмейтін болғандықтан, олардың тағам арқылы түсуі аса маңызды екенін айқындайды. Сонымен қатар, жылқы өнімдерінің өзіне тән ерекшеліктеріне байланысты, жылқы майы да экологиялық таза өнім ретінде сипатталады. Жылқыға гормоналды препараттар мен антибиотиктердің сирек қолданылуы алынатын майдың қауіпсіздігі мен табиғилығын арттырады [7].

Осы факторлар жылқы майын функционалды және профилактикалық тағам өнімдерін әзірлеуде перспективалы шикізат ретінде қарастыруға мүмкіндік береді [8].

Биологиялық тұрғыдан алғанда, жылқы майындағы қанықпаған май қышқылдары липидтік алмасуды реттеуге, қабыну процестерін төмендетуге және жүрек-қан тамыр жүйесінің қызметін жақсартуға ықпал етеді [9].

Жылқы майының физикалық қасиеттеріне балқу температурасының салыстырмалы түрде төмен болуы, оның қанықпаған май қышқылдарына бай болуымен түсіндіріледі [10]. Аталған қасиет жылқы майын технологиялық өңдеу барысында және оны тағам өнімдерінің құрамына енгізу кезінде тиімді шикізат ретінде қолдануға мүмкіндік береді.

Химиялық көрсеткіштер тұрғысынан алғанда, жылқы майының қышқылдық және пероксидтік сандарының төмен болуы оның сапасының жоғары екенін және тотығу процесіне салыстырмалы түрде төзімді екенін көрсетеді [11].

Жылқы майының сақтау тұрақтылығы оның табиғи антиоксиданттар құрамымен және майқышқылдық профилімен байланысты. Ғылыми жұмыстарда төмен температурада және жарықтан қорғалған жағдайда сақталған жылқы майының тотығу қарқындылығы айтарлықтай баяулайтыны көрсетілген [12].

Бұл қасиет жылқы майын ұзақ сақталатын тағам өнімдерінде қолдану мүмкіндігін арттырады және оның технологиялық құндылығын жоғарлатады.

Біздің жұмысымыздың мақсаты - жылқыдан алынған іш майы, ішкі (қазы) және теріасты (жая) майларының физика-химиялық және майқышқылдық қасиеттерін салыстырмалы түрде зерттеу арқылы олардың тағамдық және биологиялық құндылығын бағалау, сондай-ақ әртүрлі анатомиялық май түрлерін тағам өнімдерінде мақсатты түрде қолдану мүмкіндіктерін ғылыми негіздеу. Зерттеудің негізгі міндеттері: жылқының іш майы, ішкі (қазы) және теріасты (жая) майларының майқышқылдық құрамын талдау және оны салыстырмалы бағалау, әртүрлі анатомиялық май түрлерінің тотығуға төзімділігін бағалау және алынған нәтижелер негізінде жылқы майының тағамдық және биологиялық артықшылықтарын айқындау.

Зерттеу шарттары мен әдістері

Зерттеу нысаны ретінде жылқыдан алынған жануар тектес майлардың үш анатомиялық түрі алынды: Іш майы (ішкі ағзалар маңындағы майлар), ішкі май (қазы) және теріасты майы (жая). Зерттеу үлгілері өндірістік өңдеуден өтпеген бастапқы шикізат күйінде талдауға алынды.

Физика-химиялық көрсеткіштер (қышқыл саны, пероксидтік саны, йод саны, ылғал және ұшқыш заттардың массалық үлесі) стандартталған титриметриялық және йодометриялық әдістермен анықталды. Майқышқылдық құрам газды хроматография әдісімен МЕСТ 30418-96 талаптарына сәйкес зерттелді.

Эксперименттік зерттеулер аккредиттелген «Еркін Талғам» ЖШС сынақ зертханасында және «Алматы технологиялық университеті» АҚ-ның тағам өнімдерінің сапасы мен қауіпсіздігін бағалау жөніндегі ғылыми-зерттеу зертханасында жүргізілді. Барлық өлшеулер температурасы 21-23 °С және ауаның салыстырмалы ылғалдылығы 64-72 % жағдайында кемінде үш қайталымда орындалды. Нәтижелер орташа мән ± стандартты ауытқу түрінде статистикалық өңделді.

Жылқы майының майқышқылдық құрамындағы айырмашылықтарды нақты бағалау мақсатында зерттелген үлгілердің салыстырмалы нәтижелері 1-кестеде келтірілген.

1-кестеде жылқының іш майы, ішкі майы (қазы) және теріасты майының (жая) май қышқылдық құрамының салыстырмалы көрсеткіштері берілген. Зерттеу нәтижелері жылқы майының әртүрлі анатомиялық түрлері арасында май қышқылдарының сандық және сапалық құрамы бойынша айырмашылықтар бар екенін көрсетті.

Қаныққан май қышқылдарының ішінде пальмитин (С16:0) және стеарин (С18:0) қышқылдарының үлесі барлық үлгілерде басым екені анықталды. Пальмитин қышқылының мөлшері іш майында 24,726 %, ішкі майда (қазы) 26,359 %, ал теріасты майында (жая) 25,817 % құрады. Ал стеарин қышқылының үлесі тиісінше 7,402 %, 6,624 % және 5,257 % деңгейінде анықталды. Сонымен қатар теріасты майында миристин қышқылының мөлшері 3,024 % болып, іш майындағы 2,371 % және ішкі майдағы 2,840 % көрсеткіштерінен салыстырмалы түрде жоғары екені байқалды.

Моноқанықпаған май қышқылдарының ішінде олеин қышқылы (С18:1) негізгі үлесті құрады. Оның мөлшері іш майында 38,856 %, ішкі майда (қазы) 37,592 %, ал теріасты майында 37,478 % деңгейінде анықталды. Сонымен қатар теріасты майында пальмитолеин қышқылының мөлшері 7,842 % болып, іш майындағы 4,803 % және ішкі майдағы 5,362 % көрсеткіштерінен айтарлықтай жоғары екені байқалды. Теріасты майында пальмитолеин және олеин қышқылдарының жоғары болуы оның биологиялық құндылығын арттыратынын көрсетеді.

Полиқанықпаған май қышқылдары бойынша линол (С18:2) қышқылының мөлшері іш майында 15,753 %, ішкі майда 16,061 %, ал теріасты майында 15,753 % деңгейінде анықталды. Линолен қышқылының (С18:3) мөлшері тиісінше 1,571 %, 1,583 % және 1,512 % құрады. Сонымен қатар аз мөлшерде эйкозадиен қышқылы (С20:2) 0,608-0,562 % аралығында анықталды. Бұл май қышқылдарының болуы жылқы майының тағамдық және физиологиялық

маңызын сипаттайды, себебі олар адам ағзасы үшін алмастырылмайтын май қышқылдары болып табылады.

Кесте 1 – Жылқының іш майы, теріасты (жая), ішкі майының (қазы) май қышқылдарының салыстырмалы құрамы

№	Көрсеткіштердің атауы, өлшем бірліктері	Сынақ әдістеріне арналған НҚ белгіленуі	Іш майы	Ішкі май (қазы)	Теріасты майы (жая)
Қаныққан май қышқылдары					
1.	С 15:0 пентадекан, %	МЕСТ 30418-96	0,182	0,204	0,259
2.	С 12:0 лаурин, %	МЕСТ 30418-96	0,118	0,136	0,120
3.	С 16:0 пальмитин, %	МЕСТ 30418-96	24,726	26,359	25,817
4.	С 17:0 маргарин, %	МЕСТ 30418-96	0,441	0,395	0,394
5.	С 14:0 миристин, %	МЕСТ 30418-96	2,371	2,840	3,024
6.	С 18:0 стеарин, %	МЕСТ 30418-96	7,402	6,624	5,257
7.	С 20:0 арахин, %	МЕСТ 30418-96	0,101	-	0,502
8.	С 21:0 генейкозан, %	МЕСТ 30418-96	1,591	1,149	0,831
9.	С 22:0 беген, %	МЕСТ 30418-96	0,235	-	-
10.	С 23:0 трикозан, %	МЕСТ 30418-96	0,160	-	-
11.	С 24:0 лигноцерин, %	МЕСТ 30418-96	-	-	-
Моноқаныққпаған май қышқылдары					
1.	С 14:1 (cis-9) миристолеин, %	МЕСТ 30418-96	0,176	0,189	0,350
2.	С 15:1 (cis-10) пентадецен, %	МЕСТ 30418-96	0,050	0,048	-
3.	С 16:1 (cis-9) пальмитолеин, %	МЕСТ 30418-96	4,803	5,362	7,842
4.	С 17:1 (cis-10) маргаринолеин, %	МЕСТ 30418-96	0,461	0,468	0,596
5.	С 18:1 (cis-9) олеин, %	МЕСТ 30418-96	38,856	37,592	37,478
6.	С 20:1 (cis-11) эйкозен, %	МЕСТ 30418-96	0,185	0,397	0,107
Полиқаныққпаған май қышқылдары					
1.	С 18:2n6c линол, %	МЕСТ 30418-96	15,753	16,061	15,753
2.	С 18:3n3 линолен, %	МЕСТ 30418-96	1,571	1,583	1,512
3.	С20:2 эйкозадиен, %	МЕСТ 30418-96	0,608	0,593	0,562
4.	С 20:5n3 эйкозапентаен, %	МЕСТ 30418-96	0,209	-	0,178
5.	С 22: 6n3 докозагексаен, %	МЕСТ 30418-96	-	-	0,168

** – Кестеде келтірілген көрсеткіштер аккредиттелген сынақ зертханасының сынақ хаттамалары негізінде алынған (хаттама №1510К, №1511К, №1512К)*

2-кестеде жылқының іш майы, ішкі майы (қазы) және теріасты майының (жая) физика-химиялық және дәрумендік көрсеткіштері берілген. Кестеде ұсынылған мәліметтер зерттелген май үлгілерінің сапалық, технологиялық және тағамдық құндылық көрсеткіштерін кешенді түрде бағалауға мүмкіндік береді.

Зерттеу нәтижелері бойынша барлық май үлгілерінде қышқылдық саны салыстырмалы түрде төмен деңгейде болды: іш майында 2,03±0,02 мгКОН/г, ішкі майда 2,22±0,03 мгКОН/г, ал теріасты майында 2,72±0,05 мгКОН/г. Бұл көрсеткіштер майдың бастапқы сапасының жоғары екенін көрсетеді.

Пероксидтік саны іш майында 10,08±0,09 ммоль/кг, ішкі майда 11,69±0,08 ммоль/кг, ал теріасты майында 17,51±0,05 ммоль/кг болды. Бұл нәтижелер майдың тотығу тұрақтылығының жеткілікті деңгейде екенін және сақтау барысында сапалық көрсеткіштерінің жақсы сақталатынын дәлелдейді.

Йод саны бойынша теріасты майында ең жоғары мән байқалды – 91 г/100 г, ал іш майында бұл көрсеткіш 75 г/100 г, ішкі майда 63 г/100 г болды. Бұл теріасты майында қаныққпаған май қышқылдарының үлесі жоғары екенін көрсетеді және өз кезегінде теріасты майының тағамдық және физиологиялық құндылығын арттырады.

Ылғал мен ұшпа заттардың массалық үлесі іш майында 12,06±0,06 %, теріасты майында 14,29±0,08 %, ал ішкі майда 21,74±0,05 % болды, бұл ішкі майдың құрылымдық ерекшеліктерімен байланысты.

Кесте 2 – Жылқының іш майы, теріасты майы(жая) және ішкі майының (қазы) физика-химиялық, дәрумендік көрсеткіштері

№	Көрсеткіштердің атауы, өлшем бірліктері	Сынақ әдістеріне арналған НҚ белгіленуі	Іш майы	Ішкі май (қазы)	Теріасты майы (жая)
Физика-химиялық көрсеткіштері					
1	Қышқылдық саны, мгКОН/г	МЕСТ Р 50457-92	2,03±0,02	2,22±0,03	2,72±0,05
2	Пероксидтік саны, ммоль/кг	МЕСТ Р 51487-99	10,08±0,09	11,69±0,08	17,51±0,05
3	Йод саны, г/100 г	МЕСТ ISO 3961-2020	75	63	91
4	Ылғал мен ұшпа заттардың массалық үлесі, %	МЕСТ ISO 662-2019	12,06±0,06	21,74±0,05	14,29±0,08
5	Титрленетін қышқылдық, %	Титриметриялық әдіс	0,017	0,086	0,016
6	Сабындану саны, мгКОН/г	МЕСТ 5478-2014	165,95±0,08	18,73±0,05	76,49±0,05
7	Сабынданбайтын заттар, %	МЕСТ 5479-64	16,12±0,24	28,33±0,43	19,11±0,29
8	Майда еритін антиоксиданттар, мг/г	МЕСТ Р 54037-2010	0,24±0,003	0,11±0,002	0,31±0,005
9	Тұтқырлық, ПА*с	МЕСТ 7163-84	-	-	-
10	Сыну бұрышы (20 °С температурада)	МЕСТ 18995.2-2022	-	-	-
11	Фосфорқұрамды заттар, %	МЕСТ 31753-2012	0,073±0,001	0,091±0,001	0,101±0,002
12	Түстілік саны, мг I_2/100 см³	МЕСТ 5477-2015	-	-	-
13	Майсыз қоспалар, %	МЕСТ 5481-2014	2,10±0,02	3,25±0,005	4,80±0,05
Дәрумендер					
14	Е, мг/100г	МЕСТ 30417-2018	3,15	2,08	4,26

** – Кестеде келтірілген көрсеткіштер аккредиттелген сынақ зертханасының сынақ хаттамалары негізінде алынған (хаттама №1440, №1442, №1443).*

Сабындану саны іш майында 165,95±0,08 мгКОН/г, ішкі майда 18,73±0,05 мгКОН/г, ал теріасты майында 76,49±0,05 мгКОН/г деңгейінде анықталды. Сабынданбайтын заттардың мөлшері тиісінше 16,12±0,24 %, 28,33±0,43 % және 19,11±0,29 % болды. Сабындану саны мен сабынданбайтын заттардың мөлшері май үлгілерінің технологиялық өңдеуге жарамдылығын сипаттайды

Майда еритін антиоксиданттардың мөлшері іш майында 0,24±0,003 мг/г, ішкі майда 0,11±0,002 мг/г, ал теріасты майында 0,31±0,005 мг/г болды. Сонымен қатар Е дәруменінің мөлшері теріасты майында 4,26 мг/100 г болып, іш майындағы 3,15 мг/100 г және ішкі майдағы 2,08 мг/100 г көрсеткіштерінен жоғары екені анықталды. Майда еритін антиоксиданттардың болуы майдың тотығуға төзімділігін арттырып, сақтау тұрақтылығын қамтамасыз етеді. Е дәруменінің теріасты майында көп мөлшері анықталып, оның биологиялық белсенділігінің жоғары екенін көрсетеді.

Алынған нәтижелер негізінде, 2-кестеде көрсетілген физика-химиялық және дәрумендік көрсеткіштер жылқы майының әртүрлі анатомиялық түрлері жоғары тағамдық және технологиялық құндылыққа ие екенін және оларды тағам өнімдері өндірісінде тиімді қолдануға болатынын ғылыми тұрғыдан негіздейді.

Зерттеу нәтижелері

Жүргізілген зерттеулер нәтижесінде жылқы майының физика-химиялық, майқышқылдық және дәрумендік көрсеткіштері анықталып, оның тағамдық құндылығы мен сапалық ерекшеліктері кешенді түрде бағаланды. Алынған нәтижелер зерттелген жылқы майының әртүрлі анатомиялық түрлері арасында сапалық және сандық көрсеткіштер бойынша айырмашылықтар бар екенін көрсетті.

Сынақ хаттамаларының деректері бойынша барлық зерттелген май үлгілерінде қышқылдық саны 2,03-2,72 мгКОН/г, ал пероксидтік саны 10,08-17,51 ммоль/кг аралығында болды. Бұл көрсеткіштер майдың бастапқы сапасының жоғары екенін және гидролитикалық әрі тотығу процестерінің айқын дамымағанын көрсетеді. Мұндай нәтижелер зерттелген май үлгілерінің жаңа алынған табиғи өнім екенін және олардың технологиялық өңдеуге жарамдылығын дәлелдейді.

Сонымен қатар зерттеу нәтижелері жылқы майының құрамында қанықпаған май қышқылдарының айтарлықтай үлесі бар екенін көрсетті. Моноқанықпаған май қышқылдарының ішінде олеин қышқылының мөлшері 37,478-38,856 % аралығында анықталды, ал пальмитолеин қышқылы 4,803-7,842 % деңгейінде болды. Полиқанықпаған май

қышқылдары ішінде линол қышқылы 15,753-16,061 %, ал линолен қышқылы 1,512-1,583 % аралығында анықталды. Бұл көрсеткіштер майдың биологиялық белсенділігін арттырып, оның тағамдық және физиологиялық құндылығын сипаттайды.

Әсіресе теріасты майында пальмитолеин қышқылының 7,842 % және йод санының 91 г/100 г деңгейінде болуы оның құрамында қанықпаған май қышқылдарының жоғары екенін көрсетеді. Сонымен қатар бұл үлгіде Е дәруменінің мөлшері 4,26 мг/100 г болып, іш майындағы 3,15 мг/100 г және ішкі майдағы 2,08 мг/100 г көрсеткіштерінен жоғары екені анықталды. Әсіресе теріасты майында моноқанықпаған және полиқанықпаған май қышқылдарының жоғары болуы оның функционалдық тағам өнімдерін өндіруде тиімді қолданылу мүмкіндігін көрсетеді.

Алынған нәтижелер жылқы майының физика-химиялық тұрақтылығы мен майқышқылдық құрамының үйлесімділігі оның тағам өнеркәсібінде табиғи және құнды липидтік шикізат ретінде қолданылу перспективаларын айқындайды (1, 2-кесте).

Ғылыми нәтижелерді талқылау

Алынған нәтижелер жылқы майының әртүрлі анатомиялық түрлері арасында майқышқылдық және физика-химиялық көрсеткіштер бойынша елеулі айырмашылықтар бар екенін көрсетті. Теріасты майында қанықпаған май қышқылдарының үлесінің жоғары болуы оның биологиялық құндылығын арттырып, функционалдық тағам өнімдерін өндіруде тиімді қолдануға мүмкіндік береді. Қанықпаған май қышқылдарының басым болуы липидтік алмасуды реттеуге және тағам өнімдерінің физиологиялық құндылығын арттыруға оң әсер етеді.

Іш майы мен ішкі май (қазы) үлгілерінде қышқылдық және пероксидтік көрсеткіштердің төмен болуы олардың тотығу тұрақтылығының жоғары екенін және сақтау барысында сапалық қасиеттерінің жақсы сақталатынын дәлелдейді. Бұл көрсеткіштер зерттелген май үлгілерінің технологиялық өңдеуге жарамдылығын және тағамдық мақсатта қолдану тиімділігін айқындайды.

Алынған нәтижелер отандық және шетелдік зерттеушілердің ғылыми деректерімен сәйкес келеді және жылқы майының жоғары тағамдық, биологиялық әрі технологиялық әлеуетін растайды. Жылқы майының майқышқылдық құрамы мен физика-химиялық тұрақтылығы оны функционалдық, профилактикалық және дәстүрлі тағам өнімдерінің рецептураларына енгізу бағытында қолданудың әлдеқайда пайдалы екендігін айқындайды.

Жалпы алғанда зерттеу нәтижелері жылқы майының әртүрлі анатомиялық түрлерін тағам өнеркәсібінде мақсатты және тиімді пайдалану мүмкіндігін көрсетіп, жоғары сапалы табиғи липидтік шикізат ретінде оның перспективалылығын дәлелдейді.

Қорытынды

Жүргізілген зерттеулер нәтижесінде жылқының іш майы, ішкі және теріасты майларының физика-химиялық және майқышқылдық қасиеттері кешенді түрде салыстырмалы бағаланды. Зерттеу нәтижелері жылқы майының қанықпаған май қышқылдарына бай, тотығуға салыстырмалы түрде төзімді және жоғары тағамдық-биологиялық құндылыққа ие табиғи липидтік шикізат екенін көрсетті.

Теріасты майында моноқанықпаған және полиқанықпаған май қышқылдарының үлесінің жоғары болуы оның функционалдық тағам өнімдерін өндіруде қолдану тиімділігі жоғары екендігін, ал іш май мен ішкі май үлгілерінің физика-химиялық тұрақтылығы олардың технологиялық өңдеуге жарамдылығын көрсетеді және сақтау кезінде сапалық көрсеткіштерінің тұрақтылығын қамтамасыз етеді.

Зерттеу барысында жылқы майының әртүрлі анатомиялық түрлерін тағам өнімдерінің рецептураларын әзірлеуде мақсатты қолдану мүмкіндігі ғылыми тұрғыдан негізделіп, олардың тағамдық, биологиялық және технологиялық артықшылықтары айқындалды.

Алынған нәтижелер жылқы майын функционалдық, профилактикалық және дәстүрлі тағам өнімдерін өндіруде тиімді пайдалану бағыттарын айқындап, отандық тағам өнеркәсібінде жоғары сапалы тағам өнімдерінің ассортиментін кеңейтуге ғылыми негіз бола алады.

Әдебиеттер тізімі

1. Prates J.A.M. The role of meat lipids in nutrition and health / J.A.M. Prates // Nutrients. – 2025. – Vol. 17. – № 2. – P. 350.

2. Kazakh cuisine // Wikipedia: The Free Encyclopedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Kazakh_cuisine (data obrashcheniya: 03.03.2026).
3. Animal husbandry and livestock numbers in the Republic of Kazakhstan by January 1, 2025 // stat.gov.kz. https://stat.gov.kz/ru/industries/business-statistics/stat-forrest-village-hunt-fish/publications/343750/ (data obrashcheniya: 03.03.2026).
4. Fatty acid composition of muscle and subcutaneous fat in horses / L.R. Beldarrain et al // Animals. – 2021. – Vol. 11. – № 5. – Art. 1421.
5. Horse-meat for human consumption — Current research and future opportunities / X. Belaunzaran et al // Meat Science. – 2015. – Vol. 108. – P. 74-81.
6. Calder P.C. Omega-3 fatty acids and inflammatory processes / P.C. Calder // Nutrients. – 2010. – Vol. 2. – № 3. – P. 355-374.
7. Effect of different production systems on meat quality of horses / P. De Palo et al // Animals. – 2017. – Vol. 7. – № 5. – Art. 38.
8. Functional foods: product development and health benefits / D. Granato et al // Trends in Food Science & Technology. – 2020. – Vol. 102. – P. 74-88.
9. Schwingshackl L. Dietary fatty acids and cardiovascular disease risk: a systematic review / L. Schwingshackl, G. Hoffmann // BMJ. – 2018. – Vol. 360. – k2139.
10. Possibility of using internal fat of young Yakut horse: fatty acid composition and melting point of horse fat / N. Slobodchikova et al // Biotech-Asia. – 2015. – Vol. 12. – № 2. – P. 101-108. https://www.biotech-asia.org/vol12no2/possibility-of-using-internal-fat-of-young-yakut-horse/ (data obrashcheniya: 03.03.2026).
11. Shahidi F. Lipid oxidation and improving oxidative stability / F. Shahidi, Y. Zhong // Chemical Society Reviews. – 2015. – Vol. 44. – P. 3212-3231.
12. The influence of natural antioxidants on the quality and storage capacity of semi-finished horse meat products / N. Abilmazhinova et al // Potravinarstvo. – 2024. – Vol. 18. – P. 755-775. https://potravinarstvo.com/journal1/index.php/potravinarstvo/article/view/1997/2453 (data obrashcheniya: 03.03.2026).

Қаржыландыру туралы ақпарат:

Жүргізілген зерттеу жұмыстары және мақаланы жариялау Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі қаржыландыратын AP26196803 «Дәстүрлі емес жануар және өсімдік шикізатынан алынған жаңа тағам өнімдерінің қасиеттері мен тағамдық құндылығын зерттеу» гранттық жобасы аясында орындалды.

А.Н. Нургазезова[1], А.К. Игенбаев[2], Ж. Қалибекқызы[1], Г.Н. Нұрымхан[1], Х.М. Нугманова[1*]
[1]Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А,
[2]Казахский Агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина,
010011, Республика Казахстан, г. Астана, пр. Женис, 62,
*e-mail: togalak87@mail.ru.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНСКОГО ЖИРА И ОЦЕНКА ЕГО ЖИРНОКИСЛОТНОГО СОСТАВА В АСПЕКТЕ ПИЩЕВОЙ ЦЕННОСТИ

Аннотация: *Пищевая и биологическая ценность животных жиров напрямую зависит от их анатомического расположения, физико-химических свойств и жирнокислотного состава. В настоящее время при разработке функциональных пищевых продуктов эффективное использование природного липидного сырья с высокой биологической активностью является одним из важных научных направлений. В этом контексте конский жир вызывает научный интерес не только как традиционный пищевой ресурс, но и как перспективный функциональный ингредиент.*

В данной статье сравнительно исследованы физико-химические и жирнокислотные свойства внутреннего жира, висцерального жира (казы) и подкожного жира (жая) лошади. В ходе исследования были определены кислотное, пероксидное и йодное числа, массовая доля влаги и летучих веществ, а также состав основных жирных кислот. Экспериментальные результаты показали наличие существенных различий между образцами жира по устойчивости к окислению, доле ненасыщенных жирных кислот и качественным показателям. В частности, установлено, что в подкожном жире содержание ненасыщенных жирных кислот выше, что подтверждает его высокую пищевую и биологическую ценность.

Полученные данные обосновывают возможность целенаправленного использования различных анатомических видов конского жира в пищевых продуктах. Кроме того, результаты исследования формируют научные предпосылки для эффективного применения конского жира при разработке рецептур функциональных, традиционных и комбинированных пищевых продуктов и служат основой для расширения ассортимента высококачественной жировой продукции в отечественной пищевой промышленности.

Ключевые слова: *конский жир, жирные кислоты, пищевая ценность, биологическая активность, экологически чистый продукт.*

A.N. Nurgazezova[1], A.K. Igenbayev[2], Zh. Kalibekkyzy[1], G.N. Nurymkhan[1],
Kh.M. Nugmanova[1*]
[1]Shakarim University,
071412, Republic of Kazakhstan, Semey, 20A Glinka Street.,
[2]Kazakh Agrarian research university named after S. Seifullin,
010011, Republic of Kazakhstan, Astana city Zhenis avenue, 62,
*e-mail: togalak87@mail.ru.

ASSESSMENT OF THE PHYSICOCHEMICAL PARAMETERS AND FATTY ACID CHARACTERISTICS OF HORSE FAT FROM THE PERSPECTIVE OF NUTRITIONAL VALUE

Abstract: *The nutritional and biological value of animal fats directly depends on their anatomical location, physicochemical properties, and fatty acid composition. Currently, in the development of functional food products, the effective use of natural lipid raw materials with high biological activity is one of the important scientific directions. In this context, horse fat attracts scientific interest not only as a traditional food resource but also as a promising functional ingredient.*

In this study, the physicochemical and fatty acid properties of horse internal fat, visceral fat (kazy), and subcutaneous fat (zhaya) were comparatively investigated. During the research, the acid value, peroxide value, and iodine value, the mass fraction of moisture and volatile substances, as well as the composition of the main fatty acids were determined. The experimental results revealed significant differences among the fat samples in terms of oxidative stability, the proportion of unsaturated fatty acids, and quality indicators. In particular, it was established that the subcutaneous fat contains a higher level of unsaturated fatty acids, which confirms its high nutritional and biological value.

The obtained data substantiate the possibility of the targeted use of different anatomical types of horse fat in food products. In addition, the research findings establish scientific prerequisites for the effective application of horse fat in the development of formulations for functional, traditional, and composite food products and provide a basis for expanding the range of high-quality fat-based products in the domestic food industry.

Key words: *horse fat, fatty acids, nutritional value, biological activity, environmentally friendly product.*

Авторлар туралы мәліметтер

Алмагул Нургазезовна Нургазезова – техника ғылымдарының кандидаты, «Тамақ технологиясы» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Шәкәрім университеті, Семей қ. Қазақстан Республикасы; e-mail: almanya1975@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3419-247X.

Айдын Каирбекович Игенбаев* – PhD, Инженеринг және азық-түлік технологиялары институтының қауымдастырылған профессоры, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық университеті, Астана қ. Қазақстан Республикасы; e-mail: aidyn_mamyt@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9903-2912.

Жанар Қалибекқызы – биология ғылымдарының кандидаты, ғылым жөніндегі проректор, Шәкәрім университеті, Семей қ. Қазақстан Республикасы; e-mail: zhanar_moldabaeva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6384-0646.

Гүлнұр Несіптайқызы Нұрымхан – техника ғылымдарының кандидаты, «Тамақ технологиясы» кафедрасының меңгерушісі; «Шәкәрім университеті» КеАҚ, Семей қ. Қазақстан Республикасы; e-mail: gulnu-n@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0955-352.

Халида Муратбековна Нугманова – «Тамақ технологиясы» кафедрасының докторанты, Шәкәрім университеті, Семей қ. Қазақстан Республикасы; e-mail: togalak87@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-4378-8055.

Сведения об авторах

Алмагул Нургазезовна Нургазезова – кандидат технических наук, ассоциированный профессор кафедры «Пищевая технология», Шәкәрім университет, г. Семей, Республика Казахстан; e-mail: almanya1975@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3419-247X.

Айдын Каирбекович Игенбаев – PhD, Ассоциированный профессор Института инженерии и пищевых технологий, Казахский Агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, Республика Казахстан; e-mail: aidyn_mamyt@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9903-2912.

Жанар Калибеккызы – кандидат биологических наук, проректор по науке, Шәкәрім университет, г.Семей, Республика Казахстан; e-mail: zhanar_moldabaeva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6384-0646.

Гулнур Несиптаевна Нурымхан – кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Пищевая технология», Шәкәрім университет, г. Семей, Республика Казахстан; e-mail: gulnu-n@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0955-352.

Халида Муратбековна Нугманова – докторант кафедры «Пищевая технология», Шәкәрім университет, г. Семей; Республика Казахстан; e-mail: togalak87@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-4378-8055.

Information about the authors

Almagul Nurgazezova – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Food Technology; Shakarim University, Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: almanya1975@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3419-247X.

Aidyn Igenbayev – PhD ,Associate Professor, Institute of Engineering and Food Technologies, Kazakh Agrarian research University named after S. Seifullin, Astana, Republic of Kazakhstan; e-mail: aidyn_mamyt@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9903-2912.

Zhanar Kalibekkyzy – Candidate of Biological Sciences, Vice- Rector for Science, Shakarim University, Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: zhanar_moldabaeva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6384-0646.

Gulnur Nurymkhan – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Food Technology; Shakarim University, Republic of Kazakhstan, Semey; e-mail: gulnu-n@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0955-352.

Khalida Nugmanova – doctoral student of the Department of Food Technology, Shakarim University, Republic of Kazakhstan, Semey; e-mail: togalak87@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-4378-8055.

Редакцияға енуі 30.03.2026
Өңдеуден кейін түсуі 08.04.2026
Жариялауға қабылданды 12.04.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-34

МРНТИ: 65.63.03

A.T. Tautayeva[1], M.Zh. Kizatova[2], S.T. Azimova[3]*, F.A. Makhmudov[3], A.O. Utegenova[4]
[1]International Engineering Technological University,
050060, Kazakhstan, Almaty, 89/21 Al-Farabi avenue
[2]National Medical University named after S.D. Asfendiyarov,
Republic of Kazakhstan, Almaty, st. Tole Bi 94
[3]Almaty University of Technology,
Republic of Kazakhstan, Almaty, Tole bi st., 100
4Shakarim University,
071412, Republic of Kazakhstan, Semey, 20 A Glinka Street
*e-mail: sanaazimova@mail.ru

ANALYSIS OF BIOACTIVE COMPOUNDS IN PLANT EXTRACTS BASED ON GC-MS DATA

Abstract: *This study presents a comparative analysis of organic compounds in extracts obtained from cherry (Prunus cerasus), stevia (Stevia rebaudiana), and soybean (Glycine max). The chemical composition of the extracts was characterized using gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS), allowing identification of the main constituents and determination of their relative abundances. In the cherry extract, furan derivatives were found to be predominant, with 5-hydroxymethylfurfural being the major component. The soybean extract contained significant amounts of sugar derivatives and phenolic compounds, which are known*

©A.T. Tautayeva, M.Zh. Kizatova, S.T. Azimova, F.A. Makhmudov, A.O. Utegenova, 2026

for their antioxidant activity. Analysis of the stevia extract revealed the presence of polyols and phenolic compounds, including hydroquinone. The detected furan derivatives, phenolic compounds, and polyols may contribute to the antioxidant and anti-inflammatory properties of the extracts. Overall, the findings suggest that these plant materials are promising sources of naturally occurring bioactive compounds, which could be further utilized in the development of functional foods, dietary supplements, or nutraceutical applications.

Key words: *bioactive substances; plant extracts; antioxidant activity; anti-inflammatory properties; phenolic compounds; organic compounds; gas chromatography-mass spectrometry.*

Introduction. The prevention and progression of many diseases are closely linked to nutrition, as dietary patterns and bioactive components of food have a significant impact on human health [1].

One of the most effective approaches to improving public health and preventing chronic diseases is a balanced and specialized diet with defined functional properties that support a healthy lifestyle [2].

An increasing number of people suffer from degenerative-dystrophic joint diseases, among which osteoarthritis is one of the most common. Approximately 10-12% of the world's population live with this diagnosis, and according to some data, this figure may reach up to 20%.

In recent years, there has been growing interest in the study of natural biologically active compounds possessing antioxidant and anti-inflammatory properties. Chronic inflammation plays a key role in the development of many diseases, including cardiovascular, metabolic, and neurodegenerative disorders. The investigation of natural compounds that can alleviate inflammation and oxidative stress constitutes a key area of study in current biochemistry, pharmacology, and food technology research [3].

Plant raw materials are a rich source of phenolic compounds, organic acids, furan derivatives, and various secondary metabolites with diverse biological activities. Numerous studies have shown that phenolic compounds are capable of inhibiting free radical formation, suppressing the synthesis of pro-inflammatory cytokines, and regulating signaling pathways associated with inflammatory responses. Due to these properties, plant polyphenols are considered promising natural anti-inflammatory agents [4, 5].

Particular attention is given to such plants as sour cherry (*Prunus cerasus*), stevia (*Stevia rebaudiana*), and soybean (*Glycine max*), which contain a wide range of biologically active compounds. Cherry fruits are rich in phenolic substances and furan derivatives with antioxidant properties. Stevia is known as a source of natural glycosides and other metabolites with potential antioxidant activity, whereas soybeans contain various phenolic compounds, fatty acids, and aromatic components that may exhibit biological activity and participate in the regulation of inflammatory processes [6, 7].

Gas chromatography coupled with mass spectrometry (GC-MS) is widely used to study the chemical composition of plant extracts. This method enables accurate identification and quantification of organic compounds in complex natural mixtures due to its high sensitivity and selectivity. The use of GC-MS makes it possible to detect various classes of compounds, including phenolics, furan derivatives, and sugars, which may determine the biological properties of plant extracts [8, 9].

Despite the large number of studies devoted to individual types of plant materials, the comparative analysis of organic compounds in different plant extracts remains insufficiently explored. Exploring the primary constituents of plant materials and assessing their biological activity can expand their potential use in functional food and dietary supplement formulation [10].

Notably, compounds formed during carbohydrate processing, including 5-hydroxymethylfurfural (5-HMF), have been reported to possess biological activities such as anti-inflammatory effects. It has been established that this compound can inhibit MAPK and NF-κB signaling pathways, which play a crucial role in the development of inflammatory responses. This confirms the relevance of studying plant extracts to identify compounds with potential anti-inflammatory activity [11].

The aim of this study is to perform a comparative analysis of organic compounds in cherry, stevia, and soybean extracts using gas chromatography-mass spectrometry, as well as to evaluate their potential biological activity.

The main component of cherry extract was identified as 5-hydroxymethylfurfural (60.78%). This compound is widely found in carbohydrate-processing products and exhibits biological activity. Studies indicate that 5-hydroxymethylfurfural demonstrates antioxidant and anti-inflammatory properties by reducing the expression of pro-inflammatory enzymes such as iNOS and COX-2 and inhibiting MAPK and NF-κB signaling pathways [11-13].

Phenolic compounds, including phenol derivatives, were detected in soybean extract. Phenolic compounds are well-known natural antioxidants and are capable of inhibiting the formation of pro-inflammatory mediators such as nitric oxide (NO) and prostaglandins. Due to these properties, phenolic compounds exhibit pronounced anti-inflammatory activity [14-16].

In the stevia extract, the phenolic compound hydroquinone (6.09%) was identified, belonging to the group of aromatic diphenols. Compounds of this group exhibit strong antioxidant properties due to their ability to neutralize free radicals, which plays an important role in suppressing inflammatory processes [17, 18].

Thus, the results of the gas chromatographic analysis revealed the presence of compounds with potential antioxidant and anti-inflammatory activity. The presence of furan derivatives, phenolic compounds, and polyols may contribute to the reduction of oxidative stress and suppression of inflammatory mediators, making the studied plants promising sources of natural biologically active substances [19].

Materials and Methods. The objects of the study were extracts of cherry, stevia, and soybean. Analysis of organic compounds in plant extracts was performed using gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) (Agilent 7890A/5975C). A 1.0 μL aliquot of each sample was injected at an injector temperature of 280 °C in splitless mode. Separation was achieved on a DB-5ms capillary column (30 m × 0.25 mm × 0.25 μm) with helium as the carrier gas at a constant flow rate of 1 mL/min. The oven temperature was programmed from 40 °C to 250 °C at 10 °C/min and held at 250 °C for 10 min, resulting in a total analysis time of 31 min.

Detection was carried out in full scan mode (m/z 34-650). Instrument control, data acquisition, and processing were performed using Agilent MSD ChemStation software (version 1701EA). Retention times, peak areas, and mass spectral data were analyzed, and compound identification was performed by comparison with the Wiley 11th edition and NIST'02 libraries (>550,000 spectra). The results are presented in Figures 1-3 and Table 1.

Results of the Study

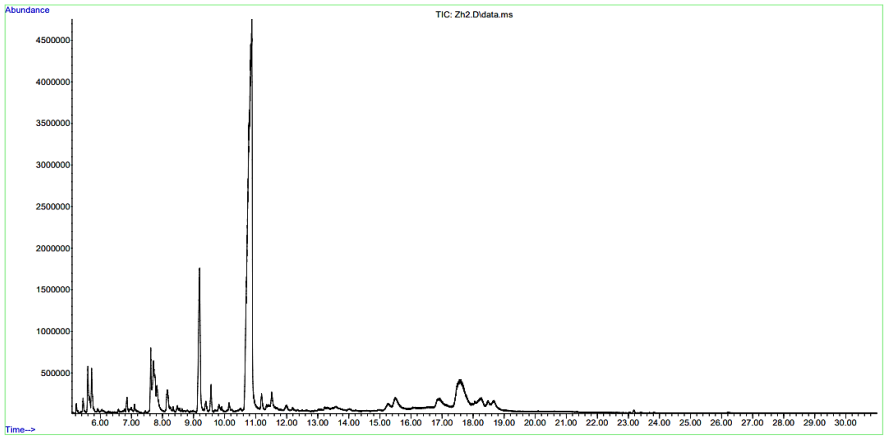


Figure 1 – Gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) chromatogram showing the composition of cherry extract

Based on the findings from gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) (Figure 1), 17 organic compounds were identified in the cherry extract with a mass spectral match probability ranging from 65% to 90%. The chromatogram is characterized by a pronounced dominant peak at a retention time of 10.87 min.

The major compounds identified in the cherry extract were 5-hydroxymethylfurfural (60.78%), 4H-pyran-4-one, 2,3-dihydro-3,5-dihydroxy-6-methyl (9.51%), and 1,4-anhydro-D-galactitol (8.52%). The predominance of 5-hydroxymethylfurfural suggests that dehydration of hexoses and thermal

transformations of carbohydrates occurred during extraction. This compound is known to possess antioxidant properties and is commonly present in products derived from plant materials.

Additionally, furan derivatives including 2-furanecarboxaldehyde and methyl-2-furoate were detected, indicating the presence of carbohydrate structures and their thermal transformation products in the extract.

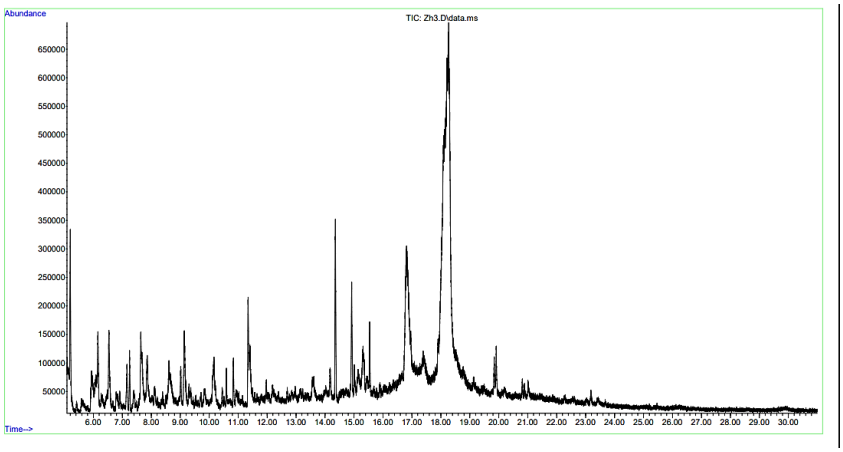


Figure 2 – Gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) chromatogram illustrating the composition of soybean extract

GC-MS analysis of the soybean extract revealed the presence of 19 organic compounds. The predominant constituents were 3-O-methyl-D-glucose (54.19%), ethyl-α-D-glucopyranoside (16.96%), 2,6-dimethoxyphenol (3.76%), and 9,12,15-octadecatrienoic acid, ethyl ester (1.65%).

The high content of sugar derivatives indicates the presence of glycosidic structures in the extract (Figure 2). The detection of the ethyl ester of linolenic acid suggests the presence of unsaturated fatty acids characteristic of soybeans.

In addition, pyrazine compounds, including trimethylpyrazine and dimethylpyrazine, were identified in the extract. The presence of these compounds may explain the characteristic aromatic profile of soybeans and their processed products.

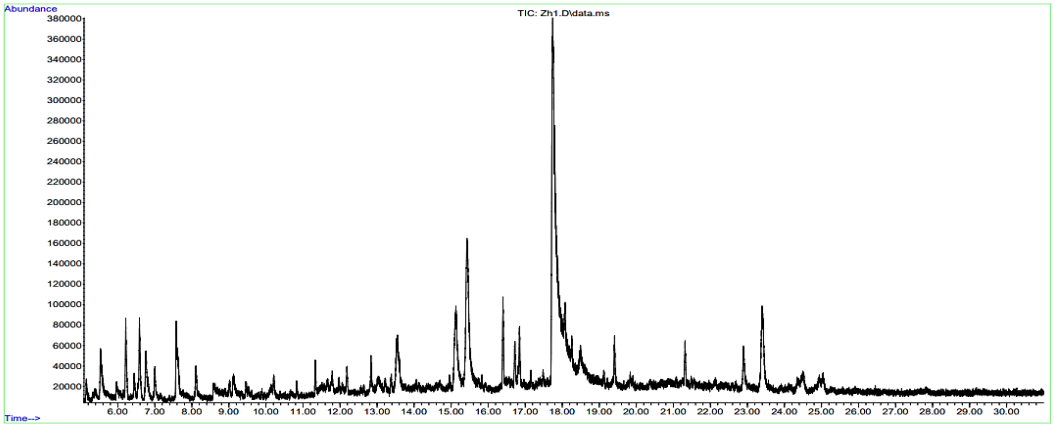


Figure 3 – Gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) chromatogram illustrating the composition of stevia extract

According to the results of gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) analysis, 13 organic compounds were identified in the stevia extract (Figure 3).

The most significant components include:

- 1,2,3,5-Cyclohexanetetrol - 52,74%;
- β-D-Glucopyranose, 1,6-anhydro - 15,67%;
- Hydroquinone - 6,09%;
- 2,5-Dimethylfuran-3,4-dione - 5,08%.

The predominance of polyol compounds and sugar derivatives is associated with the nature of stevia as a source of sweet glycosides. The presence of hydroquinone and other phenolic compounds may indicate the potential antioxidant activity of the studied plant.

Table 1 – Comparative Analysis of the Main Components of Cherry, Soybean, and Stevia Extracts

Parameter	Cherry	Soybean	Stevia
Dominant Class	Furan Compounds, Anthocyanins	Sugar Derivatives and Pyrazines	Polyols and Sugars
Major Component	5-HMF (60,78 %)	3-O-Methyl-D-glucose (54,19 %)	Cyclohexanetetrol (52,74 %)
Presence of Fatty Acids	Minor	Detected	Virtually Absent
Pharmacological Activity	Antioxidant, Anti-inflammatory	Antioxidant, Metabolic, Cardioprotective	Hypoglycemic, Antioxidant

Thus, cherry is characterized by a high content of sugar dehydration products. Soybeans contain aromatic nitrogen-containing compounds and fatty acids, while stevia is rich in polyol structures and glycosidic derivatives.

Conclusion. As a result of the conducted study, an analysis of organic compounds in extracts of cherry (*Prunus cerasus*), stevia (*Stevia rebaudiana*), and soybean (*Glycine max*) was performed using gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). The main components of the studied extracts were identified, and their relative contents were determined.

It was established that furan derivatives predominate in the cherry extract, among which 5-hydroxymethylfurfural was identified as a major compound. In the soybean extract, sugar derivatives and phenolic compounds were detected, whereas the stevia extract contained polyol and phenolic compounds, including hydroquinone.

The obtained results indicate the presence of biologically active compounds in the studied plant extracts, possessing potential antioxidant and anti-inflammatory properties. The conducted research confirms the prospects of using these plants as sources of natural biologically active substances.

Список литературы

1. Felson D.T. Treatment and Prevention Methods, Symptoms / D.T. Felson, B. Zhang, Joint Pain // A Series of Known Vice Books – 2005. – № 7(1). – P. 352-355.
2. Thymus spp. plants / B. Salehi et al // Food applications and phytopharmacy properties. Trends Food Sci. Technol. – 2019. – № 85. – P. 286-306.
3. Health relevance of the modification of low grade inflammation in ageing (inflammaging) and the role of nutrition / P.C. Calder et al // Nutrients. – 2018. – Vol. 10, № 11. – P. 1618. https://doi.org/10.3390/nu10111618.
4. The role of polyphenols in human health and food systems: A mini-review. – In: Polyphenols: Mechanisms of Action in Human Health and Disease / H. Cory et al // Academic Press. – 2022. – P. 1-13. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823482-2.00018-2.
5. Панфилова О.В. Биологически активные вещества растений / О.В. Панфилова, Л.В. Петрова. – Москва: Юрайт, 2019. – 232 с.
6. Antioxidant compounds and their antioxidant mechanism / N.F. Santos-Sánchez et al // R. Salas-Coronado et al // Antioxidants. – 2022. – Vol. 11, № 6. – 1192. https://doi.org/10.3390/antiox11061192.
7. Скальный А.В. Биологически активные вещества в питании человека / А.В. Скальный, И.А. Рудаков. – Москва: ГЭОТАР-Медиа, 2018. – 304 с.
8. Sparkman O.D. Gas Chromatography and Mass Spectrometry: A Practical Guide / O.D. Sparkman, Z. Penton, F.G. Kitson // Amsterdam: Elsevier. – 2019. – 632 p. https://doi.org/10.1016/B978-0-443-29983-4.00008-9.
9. Нечаев А.П. Пищевая химия / А.П. Нечаев, С.Е. Траубенберг, А.А. Кочеткова. – Санкт-Петербург: ГИОРД, 2017. – 640 с.
10. Bioactive compounds from plant sources and their potential health benefits / Y. Zhang et al // Biomolecules. – 2025. – Vol. 15, № 5. – P. 629. https://doi.org/10.3390/biom15050629.

11. 5-Hydroxymethylfurfural mitigates inflammatory response through suppression of MAPK signaling pathway / F. Kong et al // Molecules. – 2019. – Vol. 24, № 2. – P. 275. https://doi.org/10.3390/molecules24020275.
12. 5-Hydroxymethylfurfural: Biological effects and anti-inflammatory mechanisms / J. Greilberger et al // Molecules. – 2025. – Vol. 30, № 19. – P. 3897. https://doi.org/10.3390/molecules30193897.
13. Biological activities of 5-hydroxymethylfurfural / A. Liu et al // International Immunopharmacology. – 2015. – Vol. 29, № 2. – P. 654-661. https://doi.org/10.1016/j.intimp.2014.10.028.
14. In vitro antioxidant and free radical scavenging activity of different parts of Stevia rebaudiana / M.M. Rahman et al // Molecules. – 2022. – Vol. 27, № 1. – P. 233. https://doi.org/10.3390/molecules27010233.
15. Phenolic compounds: Natural alternative in inflammation treatment / D. Ambriz-Pérez et al // Cogent Food & Agriculture. – 2016. – Vol. 2, № 1. – P. 1131412. https://doi.org/10.1080/23311932.2015.1131412.
16. Anti-inflammatory phenolic compounds and their mechanisms of action / H. Zou et al // Food Science and Human Wellness. – 2023. – Vol. 12, № 5. – P. 1648-1658. https://doi.org/10.1016/j.fshw.2023.03.031.
17. Giner R.M. Natural hydroquinones and their antioxidant activity / R.M. Giner, M.C. Recio, J.L. Ríos // Antioxidants. – 2022. – Vol. 11, № 2. – P. 343. https://doi.org/10.3390/antiox11020343.
18. Silva E. Phenolic compounds and anti-inflammatory effects / E. Silva, J. Costa, M. Pereira // GSC Biological and Pharmaceutical Sciences. – 2023. – Vol. 24, № 3. – P. 372-380. https://doi.org/10.30574/gscbps.2023.24.3.0372.
19. Role of phenolic compounds in human disease / M.M. Rahman et al // Molecules. – 2022. – Vol. 27, № 1. – P. 233. https://doi.org/10.3390/molecules27010233.

References

1. Felson D.T. Treatment and Prevention Methods, Symptoms / D.T. Felson, B. Zhang, Joint Pain // A Series of Known Vice Books – 2005. – № 7(1). – R. 352-355. (In English).
2. Thymus spp. plants / B. Salehi et al // Food applications and phytopharmacy properties. Trends Food Sci. Technol. – 2019. – № 85. – R. 286-306. (In English).
3. Health relevance of the modification of low grade inflammation in ageing (inflammaging) and the role of nutrition / P.C. Calder et al // Nutrients. – 2018. – Vol. 10, № 11. – R. 1618. https://doi.org/10.3390/nu10111618. (In English).
4. The role of polyphenols in human health and food systems: A mini-review. – In: Polyphenols: Mechanisms of Action in Human Health and Disease / H. Cory et al // Academic Press. – 2022. – P. 1-13. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823482-2.00018-2. (In English).
5. Panfilova O.V. Biologicheski aktivnye veshchestva rastenii / O.V. Panfilova, L.V. Petrova. – Moskva: Yurait, 2019. – 232 s. (In Russian).
6. Antioxidant compounds and their antioxidant mechanism / N.F. Santos-Sánchez et al // R. Salas-Coronado et al // Antioxidants. – 2022. – Vol. 11, № 6. – 1192. https://doi.org/10.3390/antiox11061192. (In English).
7. Skal'nyi A.V. Biologicheski aktivnye veshchestva v pitanii cheloveka / A.V. Skal'nyi, I.A. Rudakov. – Moskva: GEHOTAR-Media, 2018. – 304 s. (In Russian).
8. Sparkman O.D. Gas Chromatography and Mass Spectrometry: A Practical Guide / O.D. Sparkman, Z. Penton, F.G. Kitson // Amsterdam: Elsevier. – 2019. – 632 p. https://doi.org/10.1016/B978-0-443-29983-4.00008-9. (In English).
9. Nechaev A.P. Pishchevaya khimiya / A.P. Nechaev, S.E. Traubenberg, A.A. Kochetkova. – Sankt-Peterburg: GIORD, 2017. – 640 s. (In Russian).
10. Bioactive compounds from plant sources and their potential health benefits / Y. Zhang et al // Biomolecules. – 2025. – Vol. 15, № 5. – R. 629. https://doi.org/10.3390/biom15050629. (In English).
11. 5-Hydroxymethylfurfural mitigates inflammatory response through suppression of MAPK signaling pathway / F. Kong et al // Molecules. – 2019. – Vol. 24, № 2. – R. 275. https://doi.org/10.3390/molecules24020275. (In English).
12. 5-Hydroxymethylfurfural: Biological effects and anti-inflammatory mechanisms / J. Greilberger et al // Molecules. – 2025. – Vol. 30, № 19. – R. 3897. https://doi.org/10.3390/molecules30193897. (In English).
13. Biological activities of 5-hydroxymethylfurfural / A. Liu et al // International Immunopharmacology. – 2015. – Vol. 29, № 2. – P. 654-661. https://doi.org/10.1016/j.intimp.2014.10.028. (In English).

14. In vitro antioxidant and free radical scavenging activity of different parts of Stevia rebaudiana / M.M. Rahman et al // Molecules. – 2022. – Vol. 27, № 1. – R. 233. https://doi.org/10.3390/molecules27010233. (In English).
15. Phenolic compounds: Natural alternative in inflammation treatment / D. Ambriz-Pérez et al // Cogent Food & Agriculture. – 2016. – Vol. 2, № 1. – R. 1131412. https://doi.org/10.1080/23311932.2015.1131412. (In English).
16. Anti-inflammatory phenolic compounds and their mechanisms of action / H. Zou et al // Food Science and Human Wellness. – 2023. – Vol. 12, № 5. – P. 1648-1658. https://doi.org/10.1016/j.fshw.2023.03.031. (In English).
17. Giner R.M. Natural hydroquinones and their antioxidant activity / R.M. Giner, M.C. Recio, J.L. Ríos // Antioxidants. – 2022. – Vol. 11, № 2. – R. 343. https://doi.org/10.3390/antiox11020343. (In English).
18. Silva E. Phenolic compounds and anti-inflammatory effects / E. Silva, J. Costa, M. Pereira // GSC Biological and Pharmaceutical Sciences. – 2023. – Vol. 24, № 3. – P. 372-380. https://doi.org/10.30574/gscbps.2023.24.3.0372. (In English).
19. Role of phenolic compounds in human disease / M.M. Rahman et al // Molecules. – 2022. – Vol. 27, № 1. – R. 233. https://doi.org/10.3390/molecules27010233. (In English).

А.Т. Таутаева[1], М.Ж. Кизатова[2], С.Т. Азимова[3]*, Ф.А. Махмудов[3], А.О. Утегенова[4]
[1]Халықаралық инженерлік-технологиялық университеті,
050060, Қазақстан, Алматы, Әл-Фараби даңғылы, 89/21
[2]С.Д. Асфендияров атындағы ұлттық медицина университеті,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Төле Би к-сі, 94
[3]Алматы технологиялық университеті,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Төле би к-сі, 100
[4]Шәкәрім университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинка к-сі, 20
*e-mail: sanaazimova@mail.ru

ӨСІМДІК ЭКСТРАКТТАРЫНДАҒЫ БИОАКТИВТІ ҚОСЫЛЫСТАРДЫ ГХ-МС ДЕРЕКТЕРІ БОЙЫНША ТАЛДАУ

Мақалада шие (Prunus cerasus), стевия (Stevia rebaudiana) және соя бұршақтарының (Glycine max) экстракттарындағы органикалық қосылыстардың салыстырмалы талдауы қарастырылған. Қосылыстардың құрамын анықтау газды хроматография-масс-спектрометрия (ГХ-МС) әдісі арқылы жүргізілді. Зерттеу барысында зерттелген экстракттардың негізгі компоненттері анықталып, олардың салыстырмалы мөлшері белгіленді. Шие экстрактында фуран туындыларының басым екендігі анықталып, олардың ішінде 5-hydroxymethylfurfural қосылысы идентификацияланды. Соя бұршақтарының экстрактында антиоксиданттық белсенділікке ие қант туындылары мен фенолдық қосылыстар анықталды. Стевия экстрактында полиолдық және фенолдық қосылыстар, соның ішінде hydroquinone табылды. Фуран туындыларының, фенолдық қосылыстардың және полиолдардың болуы антиоксиданттық және қабынуға қарсы қасиеттердің байқалуына ықпал етуі мүмкін екендігі анықталды. Алынған нәтижелер зерттелген өсімдіктердің табиғи биологиялық белсенді заттардың перспективалы көзі екенін көрсетеді.

Түйін сөздер: *өсімдік экстракттары, газды хроматография-масс-спектрометрия, органикалық қосылыстар, фенолдық қосылыстар, антиоксиданттық белсенділік, қабынуға қарсы қасиеттер, биологиялық белсенді заттар.*

А.Т. Таутаева[1], М.Ж. Кизатова[2], С.Т. Азимова[3]*, Ф.А. Махмудов[3], А.О. Утегенова[4]
[1]Международный инженерно-технологический университет,
050060, Казахстан, Алматы, проспект Аль-Фараби, 89/21
[2]Национальный медицинский университет имени С.Д. Асфендиярова,
Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Толе Би 94
[3]Алматинский технологический университет,
Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Толе би, 100
[4]Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20
*e-mail: sanaazimova@mail.ru

БИОАКТИВНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ РАСТИТЕЛЬНЫХ ЭКСТРАКТОВ ПО ДАННЫМ ГХ-МС

В статье рассмотрен сравнительный анализ органических соединений в экстрактах вишни (Prunus cerasus), стевии (Stevia rebaudiana) и соевых бобов (Glycine max). Определение состава соединений проведено методом газовой хроматографии с масс-спектрометрическим детектированием (ГХ-МС). В ходе исследования выявлены основные компоненты исследуемых экстрактов и установлено их относительное содержание. Определено, что в экстракте вишни доминируют фурановые производные, среди которых идентифицировано соединение 5-hydroxymethylfurfural. В экстракте соевых бобов выявлены производные сахаров и фенольные соединения, обладающие антиоксидантной активностью. В экстракте стевии обнаружены полиольные и фенольные соединения, включая hydroquinone. Установлено, что наличие фурановых производных, фенольных соединений и полиолов может способствовать проявлению антиоксидантных и противовоспалительных свойств. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности исследуемых растений как источников природных биологически активных веществ.

Ключевые слова: *растительные экстракты, газовая хроматография-масс-спектрометрия, органические соединения, фенольные соединения, антиоксидантная активность, противовоспалительные свойства, биологически активные вещества.*

Information about the authors

Asel Tautayeva – Master of Technical Sciences, Doctoral Student of the Department of Food Production Engineering and Technology, International Engineering and Technology University, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: aselmus96@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-4564-9108.

Maigul Kizatova – Doctor of Technical Sciences, Professor; S. D. Asfendiyarov Kazakh National Medical University, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: kizatova@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6481-7410.

Sanavar Azimova* – PhD, Associate Professor of the Department of Food Safety and Quality; Almaty Technological University, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: sanaazimova@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8992-8889.

Farrukh Makhmudov – PhD, Associate Professor of the Department of Food Safety and Quality; Almaty Technological University, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: farruh-ma@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7791-1588.

Asiya Utegenova – PhD, Acting Associate Professor of the Department of Food Technology, Shakarim University, Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: asia_aksu@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6481-7410.

Авторлар туралы мәліметтер

Асель Талгаткызы Таутаева – техника ғылымдарының магистрі, «Тағам өндірісінің техникасы және технологиясы» кафедрасының докторанты; Алматы қаласындағы Халықаралық инженерлік-технологиялық университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: aselmus96@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-4564-9108.

Майгуль Жалеловна Кизатова – техника ғылымдарының докторы, профессор; Алматы қаласындағы С.Д. Асфендияров атындағы Қазақ ұлттық медицина университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: kizatova@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6481-7410.

Санавар Туглуковна Азимова* – PhD, «Тағам өнімдерінің қауіпсіздігі мен сапасы» кафедрасының қауымдастырылған профессоры; Алматы қаласындағы Алматы технологиялық университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: sanaazimova@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8992-8889.

Фаррух Абдигапурович Махмудов – PhD, «Тағам өнімдерінің қауіпсіздігі мен сапасы» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Алматы қаласындағы Алматы технологиялық университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: farruh-ma@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7791-1588.

Асия Оразбековна Утегенова – PhD, «Тағам технологиясы» кафедрасының доцент м.а., Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: asia_aksu@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6481-7410.

Сведения об авторах

Асель Талгаткызы Таутаева – магистр технических наук, докторант кафедры «Техника и технология пищевых производств», Международный инженерно-технологический университет города Алматы, Республика Казахстан; e-mail: aselmus96@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-4564-9108.

Майгуль Жалеловна Кизатова – доктор технических наук, профессор, Казахский Национальный медицинский университет имени С.Д. Асфендиярова города Алматы, Республика Казахстан; e-mail: kizatova@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6481-7410.

Санавар Туглуковна Азимова* – PhD, ассоциированный профессор кафедры «Безопасность и качество пищевых продуктов», Алматинский технологический университет города Алматы, Республика Казахстан; e-mail: sanaazimova@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8992-8889.

Фаррух Абдигапурович Махмудов – PhD, ассоциированный профессор кафедры «Безопасность и качество пищевых продуктов», Алматинский технологический университет города Алматы, Республика Казахстан; e-mail: farruh-ma@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7791-1588.

Асия Оразбековна Утегенова – PhD, и.о. доцента кафедры «Пищевой технологии», Шәкәрім университеті, Республика Казахстан; e-mail: asia_aksu@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6481-7410.

Received 30.03.2026
Revised 23.04.2026
Accepted 30.04.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-35

CC BY 4.0
Check for updates

ҒТАХР: 65.63.33

Г.Т. Юсупова[1]*, Ж.К. Шадьярова[1], А.Б. Итбалақова[2] , С.С. Толеубекова[3], М.К. Изтилеуов[4]
[1]С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті,
010011, Қазақстан Республикасы, Астана қ., Жеңіс даңғылы, 62
[2]І. Жансүгіров атындағы Жетісу университеті,
040009, Қазақстан Республикасы, Талдықорған қ., І.Жансүгіров көшесі 187а
[3]Шәкәрім университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинка көшесі, 20А
[4]Алматы технологиялық университеті,
050012, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Толе би көш., 100.
*e-mail: gaukhar.nitra@gmail.com

ФУНКЦИОНАЛДЫ ЙОГУРТТАҒЫ СҮТҚЫШҚЫЛДЫ БАКТЕРИЯЛАРДЫҢ ӨМІРШЕҢДІГІНЕ ЕРІГІШ ӨСІМДІК ТЕКТЕС ТАҒАМДЫҚ ТАЛШЫҚТЫҢ ӘСЕРІ

Аңдатпа: *Мақалада ерігіш өсімдік тектес тағамдық талшықтың функционалды йогурттағы сүтқышқылды бактериялардың өміршеңдігі мен микробиологиялық тұрақтылығына әсерін зерттеу нәтижелері ұсынылған. Зерттеудің өзектілігі қышқыл сүт өнімдерінің функционалдық құндылығын арттыру және сақтау мерзімі бойы пробиотикалық микрофлораның тұрақты деңгейін қамтамасыз ету қажеттілігімен байланысты.*

Зерттеу нысаны ретінде майлылығы 1,0% пастерленген сүттен дайындалған, құрамында Streptococcus thermophilus *және* Lactobacillus delbrueckii subsp. Bulgaricus *бар ашытқы қолданылған йогурт алынды. Ерігіш өсімдік тектес тағамдық талшық 0,3; 0,5 және 1,0 % мөлшерінде енгізілді.*

Сүтқышқылды бактериялардың өміршеңдігі MRS-агарға себу әдісі арқылы анықталып, колония түзуші бірліктерді санау нәтижелері log КТБ/г түрінде көрсетілді. Зерттеулер 4 ± 2 °С температурада сақтау кезінде 1, 7 және 14 тәуліктерде жүргізілді.

Зерттеу нәтижелері өсімдік тектес тағамдық талшықтың сүтқышқылды микрофлораның дамуына тежеуші әсер етпейтінін көрсетті. Керісінше, талшық қосылған үлгілерде бақылау нұсқасымен салыстырғанда бактериялардың өміршеңдігі жоғары деңгейде сақталды. Сақтаудың 14-тәулігінде бақылау үлгісінде өміршең жасушалар саны 7,6 log КТБ/г дейін төмендеген болса, 0,5 % концентрациясында 8,1 log КТБ/г деңгейінде сақталды.

Алынған нәтижелер өсімдік тектес тағамдық талшықтың ықтимал пребиотикалық әсерін және өнімнің микробиологиялық тұрақтылығына оң ықпалын көрсетеді. Ең тиімді концентрация ретінде 0,5 % анықталды, ол микрофлора тұрақтылығы мен технологиялық көрсеткіштердің оңтайлы үйлесімін қамтамасыз етеді. Әзірленген өнім нормативтік талаптарға сәйкес келеді және функционалды қышқыл сүт өнімдерін өндіруде қолдануға ұсынылады.

©Г.Т. Юсупова, Ж.К. Шадьярова, А.Б. Итбалақова, С.С. Толеубекова, М.К. Изтилеуов, 2026

Түйін сөздер: *функционалды йогурт; ерігіш өсімдік тектес тағамдық талшық; сүтқышқылды бактериялар; микроорганизмдердің өміршеңдігі; микробиологиялық тұрақтылық; пребиотикалық әсер; log КТБ/г; сақтау.*

Кіріспе

Сүтқышқылды бактериялардың өміршеңдігі қышқыл сүт өнімдерінің сапасы мен функционалдық құндылығының негізгі индикаторларының бірі болып табылады және олардың пробиотикалық әлеуеті мен биологиялық тиімділігін айқындайды. Қазіргі ғылыми деректерге сәйкес айқын пробиотикалық әсердің байқалуы үшін өнімдегі тіршілікке қабілетті жасушалардың мөлшері сақтау мерзімі бойы кемінде 10^7 КТБ/г деңгейінде болуы тиіс [1, 2].

Сонымен қатар, қышқыл сүт өнімдерін сақтау барысында өміршең микроорганизмдер санының заңды түрде төмендеуі байқалады, бұл физика-химиялық және биохимиялық факторлардың кешенді әсерімен түсіндіріледі. Негізгі себептерге pH деңгейінің төмендеуімен жүретін постқышқылдану процестері, органикалық қышқылдар мен метаболиттердің жиналуы, ақуыз матрицасының кеңістіктік құрылымының өзгеруі, сондай-ақ микробтық жасушаларға стресс туғызатын тотығу процестері жатады. Аталған өзгерістер пробиотикалық микрофлораның тұрақтылығына теріс әсер етіп, дайын өнімнің функционалдық құндылығын шектейді [3, 4].

Осыған байланысты соңғы жылдары микробиологиялық тұрақтылығы жоғары және пребиотикалық қасиеттері бар функционалды өнімдерді әзірлеу бағыты қарқынды дамып келеді. Бұл тұрғыда ерігіш өсімдік тектес тағамдық талшықтар ерекше қызығушылық тудырады, өйткені олар қышқыл сүт жүйелерінің құрылымдық және микробиологиялық көрсеткіштеріне кешенді әсер ету қабілетіне ие. Мұндай компоненттер екі түрлі қызмет атқарады: бір жағынан, өнімнің тұтқырлығы мен су ұстау қабілетін арттыра отырып, құрылым түзуші агент ретінде әрекет етеді, екінші жағынан – сүтқышқылды бактериялардың өсуі мен метаболикалық белсенділігін ынталандыратын пребиотикалық қасиет көрсете алады [5-7].

Ерігіш тағамдық талшықтардың полисахаридтік фракциялары пробиотикалық микроорганизмдер үшін көміртек пен энергияның қосымша көзі ретінде қызмет етіп, сақтау барысында олардың өміршеңдігін сақтауға ықпал етеді. Сонымен қатар, тығыз белок-полисахаридтік матрицаның түзілуі жасушаларды механикалық тұрғыдан ұстап тұруға, оттегінің диффузиясын төмендетуге және қоршаған ортаның қолайсыз факторларының әсерін азайтуға мүмкіндік береді.

Заманауи зерттеулер нәтижелері йогурт рецептурасына инулин, β-глюкандар және псиллиум сияқты ерігіш тағамдық талшықтарды енгізу сүтқышқылды бактериялардың өміршеңдігін арттырып, постқышқылдану қарқындылығын төмендететінін көрсетеді. Бұл жағдайда гельдік жүйенің құрылымдық өзгерістері қорғаныш әсердің қалыптасуында шешуші рөл атқарып, қышқылдық және осмостық стресс деңгейінің төмендеуін қамтамасыз етеді [8-10].

Дегенмен, қолда бар ғылыми мәліметтерге қарамастан, ерігіш өсімдік тектес тағамдық талшықтардың функционалды йогурттарды сақтау барысында сүтқышқылды бактериялардың өміршеңдігі динамикасына әсері әлі де толық зерттелмеген және концентрация факторын, сондай-ақ жүйенің құрылымдық ерекшеліктерін ескере отырып, қосымша эксперименттік негіздеуді талап етеді.

Осы зерттеудің мақсаты – ерігіш өсімдік тектес тағамдық талшықтың функционалды йогурттағы сүтқышқылды бактериялардың өміршеңдігі мен микробиологиялық тұрақтылығына сақтау процесі барысында тигізетін әсерін бағалау.

Зерттеу нысаны мен әдістері

Зерттеулер «С.С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті» КеАҚ жанындағы Органикалық агротехнологиялар инжинирингтік орталығы базасында жүргізілді.

Зерттеу нысаны ретінде зертханалық жағдайда әзірленген технологиялық схема негізінде алынған йогурт пайдаланылды. Шикізат ретінде майлылығы 1,0% пастерленген сиыр сүті қолданылды. Ұйыту үшін құрамында Streptococcus thermophilus және Lactobacillus delbrueckii subsp. Bulgaricus бар тікелей енгізілетін ашытқы мәдениеті пайдаланылды. Ерігіш өсімдік тектес тағамдық талшық 0,3; 0,5 және 1,0% мөлшерінде (құрғақ затқа шаққанда)

енгізілді. Бақылау үлгісі тағамдық талшық қоспай дайындалды. Барлық үлгілер (4 ± 2)°С температурада 14 тәулік бойы сақталды. Сүтқышқылды бактериялардың өміршеңдігін анықтау сериялық он еселік сұйылту әдісімен жүргізіліп, кейін MRS-агар қоректік ортасына (HiMedia, Үндістан) терең себу әдісі қолданылды. Зерттеу ГОСТ 10444.11-2013 талаптарына сәйкес орындалды.

Массасы 10 г өнім 90 мл стерильді физиологиялық ерітіндіде (0,85 % NaCl) зертханалық гомогенизатор көмегімен гомогенизацияланды. Одан кейін 10^{-7} дейінгі тізбекті сұйылтулар дайындалды. Себу Петри табақшаларына терең енгізу әдісімен жүргізілді. Инкубация (37 ± 1) °С температурада 72 сағат бойы термостатта жүргізілді. Инкубациядан кейін колония түзуші бірліктер саны сандық колония есептегіш арқылы анықталды. Нәтижелер логарифмдік түрде – log КТБ/г түрінде көрсетілді.

Талдау сақтау мерзімінің 1, 7 және 14 тәуліктерінде жүргізілді. Барлық тәжірибелер үш мәрте қайталанып орындалды. Алынған нәтижелердің статистикалық өңдеуі IBM SPSS Statistics 26 бағдарламалық пакеті арқылы жүргізілді. Орташа мән (M) және стандартты ауытқу (SD) есептелді. Үлгілер арасындағы айырмашылықтардың статистикалық маңыздылығы бір факторлы дисперсиялық талдау (ANOVA) әдісімен $p \leq 0,05$ деңгейінде бағаланды.

Зерттеу нәтижелері және оларды талқылау

Сүтқышқылды бактериялар санының өзгеру динамикасы 1-кестеде көрсетілген.

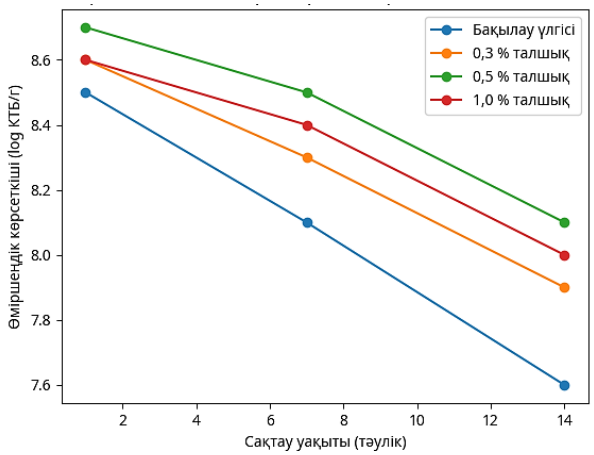
Кесте 1 – Сүтқышқылды бактериялардың өміршеңдігі (log КТБ/г)

Үлгі	1 тәулік	7 тәулік	14 тәулік
Бақылау	8,5 ±0,1	8,1 ±0,1	7,6 ±0,1
0,3 %	8,6 ±0,1	8,3 ±0,1	7,9 ±0,1
0,5 %	8,7 ±0,1	8,5 ±0,1	8,1 ±0,1
1,0 %	8,6 ±0,1	8,4 ±0,1	8,0 ±0,

1-кестеден көрініп тұрғандай, сақтау мерзімінің 14 тәулігі ішінде барлық үлгілерде сүтқышқылды бактериялар санының біртіндеп төмендеуі байқалды. Бұл құбылыс постферментациялық процестермен, органикалық қышқылдардың жиналуымен және ақуыз матрицасының құрылымдық өзгерістерімен түсіндіріледі.

Бақылау үлгісінде төмендеу деңгейі 0,9 log КТБ/г құрады (8,5-тен 7,6 log КТБ/г дейін). Ал ерігіш өсімдік тектес тағамдық талшық енгізілген үлгілерде микроорганизмдердің өміршеңдігінің төмендеуі анағұрлым аз болды, бұл талшықтың қорғаныштық әсерін көрсетеді.

Ең жоғары тұрақтылық 0,5 % концентрациясында байқалды, мұнда төмендеу небәрі 0,6 log КТБ/г құрады, ал соңғы мәні 8,1 log КТБ/г деңгейінде сақталды. Бұл көрсеткіш бақылау үлгісімен салыстырғанда статистикалық тұрғыдан сенімді жоғары болды ($p \leq 0,05$). Уақыт бойынша көрсеткіштердің төмендеу сипаты 1-суретте көрнекі түрде көрсетілген.



Сурет 1 – 4 ± 2 °С температурада 14 тәулік сақтау барысында сүтқышқылды бактериялардың өміршеңдігінің динамикасы (log КТБ/г)

1 – суретте көрсетілген өміршеңдік қисықтарын талдау ерігіш өсімдік тектес тағамдық талшық қосылған үлгілерде сүтқышқылды бактериялар санының төмендеуі бақылау үлгісімен салыстырғанда анағұрлым баяу жүретінін көрсетеді. Бұл талшықтың айқын тұрақтандырғыш

әсерін және микроорганизмдердің өміршеңдігін тоңазытқышта сақтау жағдайында сақтауға қабілетті екенін растайды.

Микроорганизмдердің өміршеңдігін сақтау тиімділігін сандық тұрғыдан бағалау үшін олардың төмендеу қарқындылығы мен сақталу деңгейі есептеліп, алынған нәтижелер 2-кестеде көрсетілген.

Кесте 2 – Сүтқышқылды бактериялар санының төмендеу қарқындылығы

Үлгі	Жалпы төмендеу (log КТБ/г)	Сақталу деңгейі (%)
Бақылау	0,9	89 %
0,3 %	0,7	92 %
0,5 %	0,6	93 %
1,0 %	0,6	93 %

2-кестеде көрсетілгендей, ерігіш өсімдік тектес тағамдық талшық қосылған үлгілерде микроорганизмдердің сақталу деңгейі жоғары болды. Әсіресе 0,5% және 1,0% концентрацияларында ең жоғары тұрақтылық байқалды (93%), бұл олардың микробиологиялық тұрақтандырғыш рөлін дәлелдейді.

Алынған нәтижелер заманауи зерттеулермен (2022-2025 жж.) сәйкес келеді, онда ерігіш тағамдық талшықтардың су ұстау қабілетін арттыратыны, қышқылдық және осмостық стрессті төмендететіні, сондай-ақ тығыз ақуыз-полисахаридтік матрицаның түзілуіне ықпал ететіні көрсетілген.

Талшықтың қорғаныштық әсері бірнеше механизмдермен түсіндіріледі: гельдік құрылымда жасушаларды механикалық бекіту, жоғары ылғал ұстау қабілеті арқылы қолайлы микросреда қалыптастыру, полисахаридтердің ферменттелетін субстрат ретінде қызмет атқаруы. Сонымен қатар барлық зерттелген үлгілерде сүтқышқылды бактериялар саны пробиотикалық әсер үшін қажетті ең төменгі деңгейден (10^7 КТБ/г) жоғары болды, бұл өнімнің функционалдық құндылығын растайды.

1,0% концентрациясында микробиологиялық тұрақтылық жоғары болғанымен, құрылымның шамадан тыс тығыздығы өнімнің сенсорлық қасиеттерінің төмендеуіне әкелуі мүмкін. Осылайша, алынған нәтижелер ерігіш өсімдік тектес тағамдық талшықтың сүтқышқылды бактериялардың өміршеңдігін сақтау барысында тиімді функционалды компонент екенін дәлелдейді. Практикалық тұрғыдан алғанда, 0,5 % концентрация микробиологиялық тұрақтылықтың, технологиялық қасиеттердің және тұтынушылық сапаның оңтайлы үйлесімін қамтамасыз етеді.

Қорытынды

Жүргізілген зерттеу нәтижесінде ерігіш өсімдік тектес тағамдық талшықты енгізу функционалды йогурттағы сүтқышқылды бактериялардың өміршеңдігіне оң әсер ететіні анықталды. Талшықты қосу сүтқышқылды микрофлораның дамуын тежемейді және ферментациялық процестердің кинетикасын бұзбайды, керісінше сақтау барысында өнімнің микробиологиялық тұрақтылығын арттырады. Барлық зерттелген үлгілерде тірі жасушалар саны пробиотикалық әсердің байқалуы үшін қажетті ең төменгі деңгейден – 10^7 КТБ/г көрсеткішінен жоғары болғаны көрсетілді. Сүтқышқылды бактериялардың ең жоғары сақталуы 0,5 % концентрациясында байқалды, мұнда сақтау мерзімінің 14-тәулігінде олардың саны 8,1 log КТБ/г құрап, бұл көрсеткіш бақылау үлгісімен салыстырғанда статистикалық тұрғыдан сенімді жоғары болды.

Алынған нәтижелер ерігіш өсімдік тектес тағамдық талшықтың кешенді қорғаныштық әсерін көрсетеді, бұл оның тұрақты ақуыз-полисахаридтік құрылым қалыптастыру қабілетімен және пребиотикалық қасиеттерімен байланысты. Мұндай құрылымның түзілуі микроорганизмдердің метаболикалық белсенділігі мен өміршеңдігін сақтау үшін қолайлы микросреданың қалыптасуына ықпал етеді.

Практикалық тұрғыдан алғанда, 0,5% концентрация микробиологиялық тұрақтылықтың, технологиялық сипаттамалардың және өнімнің тұтынушылық қасиеттерінің оңтайлы үйлесімін қамтамасыз етеді. Осылайша, ерігіш өсімдік тектес тағамдық талшықтарды қолдану қышқыл сүт өнімдерінің функционалдық құндылығын, микробиологиялық тұрақтылығын және сапасын арттырудың перспективалы бағыты болып табылады.

Әдебиеттер тізімі
1. Ranadheera R.D.C.S. Importance of food in probiotic efficacy / R.D.C.S. Ranadheera, S.K. Baines, M.C. Adams // Food Research International. – 2010. – Vol. 43, № 1. – P. 1-7. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.09.009.
2. Zhang L. Influence of plant polysaccharides on probiotic stability in yogurt systems / L. Zhang, J. Zhao, X. Li // International Journal of Biological Macromolecules. – 2024. – Vol. 254. – Article 127894. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127894.
3. Patel A. Functional fermented dairy products: Current trends and future perspectives / A. Patel, N. Shah // Current Opinion in Food Science. – 2022. – Vol. 44. – Article 100811. https://doi.org/10.1016/j.cofs.2022.100811.
4. Wang J. Role of prebiotic fibers in enhancing probiotic survival in dairy matrices / J. Wang, B. Sun, Y. Cao // Food Hydrocolloids. – 2023. – Vol. 137. – Article 108353. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.108353.
5. Gómez-Gallego C. The role of yogurt in human health: Recent advances / C. Gómez-Gallego, I. García-Mantrana, S. Salminen // Nutrients. – 2023. – Vol. 15, № 2. – Article 412. https://doi.org/10.3390/nu15020412.
6. Silva M.P. Prebiotic effects of dietary fibers in dairy products / M.P. Silva, D.C.U. Cavallini // Foods. – 2022. – Vol. 11, № 15. – Article 2345. https://doi.org/10.3390/foods11152345.
7. Ahmed Z. Microbiological stability of functional yogurt enriched with dietary fibers / Z. Ahmed, Y. Wang, N. Anjum // Journal of Food Processing and Preservation. – 2024. – Vol. 48, № 1. – Article e17421. https://doi.org/10.1111/jfpp.17421.
8. Li S. Interaction between milk proteins and polysaccharides in fermented dairy products / S. Li, X. Yang, Y. Chen // Food Chemistry. – 2023. – Vol. 405. – Article 134815. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134815.
9. Kaur R. Application of plant-based fibers in functional dairy products / R. Kaur, M. Kaur // Journal of Food Science and Technology. – 2022. – Vol. 59, № 10. – P. 3805-3815. https://doi.org/10.1007/s13197-021-05089-3.
10. Hassan A.N. Stability of probiotic cultures in fermented milk products / A.N. Hassan, J.F. Frank // Dairy. – 2023. – Vol. 4, № 3. – P. 512-525. https://doi.org/10.3390/dairy4030034.

Г.Т. Юсупова[1]*, Ж.К. Шадьярова[1], А.Б. Итбалақова[2] ,С.С. Толеубекова[3], М.К. Изтилеуов[4]
[1]Казахский агротехнический исследовательский университет имени С.Сейфуллина,
010011, Республика Казахстан, г. Астана, проспект Женис, 62
[2]Жетысуский университет имени И. Жансугурова,
040009, Республика Казахстан, г. Талдыкорган, ул. И. Жансугурова, 187а
[3]Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20А
[4]Алматинский технологический университет,
050012, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Толе би, 100
*e-mail: gaukhar.nitra@gmail.com

ВЛИЯНИЕ РАСТВОРИМОГО РАСТИТЕЛЬНОГО ПИЩЕВОГО ВОЛОКНА НА ЖИЗНЕСПОСОБНОСТЬ МОЛОЧНОКИСЛЫХ БАКТЕРИЙ В ФУНКЦИОНАЛЬНОМ ЙОГУРТЕ

В статье представлены результаты исследования влияния растворимого растительного пищевого волокна на жизнеспособность молочнокислых бактерий и микробиологическую стабильность функционального йогурта. Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения функциональной ценности кисломолочных продуктов и обеспечения стабильного уровня пробиотической микрофлоры в течение всего срока хранения. В качестве объекта исследования использовали йогурт, произведённый из пастеризованного молока с массовой долей жира 1,0% с применением закваски, содержащей Streptococcus thermophilus и Lactobacillus delbrueckii subsp. Bulgaricus. Растворимое растительное пищевое волокно вносили в концентрациях 0,3; 0,5 и 1,0%.

Жизнеспособность молочнокислых бактерий определяли методом посева на MRS-агар с последующим подсчётом колониеобразующих единиц и выражением результатов в log КОЕ/г. Исследования проводили на 1, 7 и 14 сутки хранения при температуре 4 ± 2°С. Установлено, что внесение растительного волокна не оказывает ингибирующего воздействия на развитие молочнокислой микрофлоры. Напротив, в образцах с добавлением волокна наблюдалась более высокая сохранность бактерий по сравнению с контрольным вариантом. На 14 сутки хранения

содержание жизнеспособных клеток в контрольном образце снижалось до 7,6 log КОЕ/г, тогда как при концентрации 0,5% сохранялось на уровне 8,1 log КОЕ/г.

Полученные данные свидетельствуют о потенциальном пребиотическом эффекте растительного волокна и его положительном влиянии на микробиологическую стабильность продукта. Оптимальной признана концентрация 0,5%, обеспечивающая наилучшее сочетание стабильности микрофлоры и технологических показателей. Разработанный продукт соответствует нормативным требованиям и может быть рекомендован для производства функциональных кисломолочных изделий.

Ключевые слова: *функциональный йогурт; растворимое растительное пищевое волокно; молочнокислые бактерии; жизнеспособность микроорганизмов; микробиологическая стабильность; пребиотический эффект; log КОЕ/г; хранение.*

G. Yussupova[1]*, Zh. Shadyarova[1], A. Itbalakova[2], S. Toleubekova[3], M. Iztileuov[4]

[1]S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University,
010011, Republic of Kazakhstan, Astana, Zhenis Avenue, 62
[2]Zhetysu University named after I. Zhansugurov,
040009, Republic of Kazakhstan, Taldykorgan, I. Zhansugurov Street, 187a
[3]Shakarim University,
071412, Republic of Kazakhstan, Semey, Glinka Street, 20A
[4]Almaty Technological University,
050012, Republic of Kazakhstan, Almaty, Tole bi Street, 100
*e-mail: gaukhar.nitra@gmail.com

EFFECT OF SOLUBLE PLANT DIETARY FIBER ON THE VIABILITY OF LACTIC ACID BACTERIA IN FUNCTIONAL YOGURT

The article presents the results of a study on the effect of soluble plant dietary fiber on the viability of lactic acid bacteria and the microbiological stability of functional yogurt. The relevance of the study is determined by the need to increase the functional value of fermented dairy products and to ensure a stable level of probiotic microflora throughout the storage period.

The object of the study was yogurt produced from pasteurized milk with a fat content of 1.0% using a starter culture containing Streptococcus thermophiles and Lactobacillus delbrueckii subsp. bulgaricus. Soluble plant dietary fiber was added at concentrations of 0.3%, 0.5%, and 1.0%.

The viability of lactic acid bacteria was determined by the plate count method on MRS agar followed by colony-forming unit enumeration, and the results were expressed as log CFU/g. The analyses were performed on days 1, 7, and 14 of storage at 4 ± 2 °C.

The results showed that the addition of plant dietary fiber did not exert an inhibitory effect on the development of lactic acid microflora. On the contrary, samples containing fiber demonstrated higher bacterial survival compared with the control sample. On the 14th day of storage, the number of viable cells in the control sample decreased to 7.6 log CFU/g, whereas at a concentration of 0.5% it remained at the level of 8.1 log CFU/g.

The obtained data indicate the potential prebiotic effect of plant dietary fiber and its positive influence on the microbiological stability of the product. The concentration of 0.5% was found to be optimal, providing the best balance between microbial stability and technological characteristics. The developed product meets regulatory requirements and can be recommended for the production of functional fermented dairy products.

Key words: *functional yogurt; soluble plant dietary fiber; lactic acid bacteria; microbial viability; microbiological stability; prebiotic effect; log CFU/g; storage.*

Авторлар туралы мәліметтер

Гаухар Тургалиевна Юсупова* – PhD, аға оқытушы, «Көлік техника, технология және стандарттау, сертификаттау және метрология» ББББТ, С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: gauhar_20_90@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1722-1294.

Жазира Куспановна Шадьярова – PhD, аға оқытушы, «Көлік техника, технология және стандарттау, сертификаттау және метрология» ББББТ, С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: zhazirashadyarova@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9379-5735.

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.

Ақбота Бекмұхамедқызы Итбалақова – техника ғылымдарының магистрі, оқытушы, «Экология және ауыл шаруашылығы ғылымдар» кафедрасы, І. Жансүгіров атындағы Жетісу университеті, Талдықорған қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: 22d52578@atu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3902-5104.

Максат Карсыбекович Изтилеуов – PhD, Студенттерге қызмет көрсету орталығының директоры – Тіркеу бөлімінің бастығы, Алматы технологиялық университет, Алматы қаласы, Қазақстан Республикасы; e-mail: m.iztileuov@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4843-4030.

Сведения об авторах

Гаухар Тургалиевна Юсупова* – PhD, старший преподаватель, ГОП «Транспортная техника и технологии, стандартизация, сертификация и метрология», Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина г. Астана, Казахстан; e-mail: gauhar_20_90@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1722-1294.

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.

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.

Акбота Бекмухамедкызы Итбалакова – магистр технических наук, преподаватель кафедры «Экология и сельскохозяйственные науки», Жетысуский университет имени И. Жансугурова, г. Талдыкорган, Республика Казахстан; e-mail: 22d52578@atu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3902-5104.

Максат Карсыбекович Изтилеуов – PhD, директор Центра обслуживания студентов – начальник регистрационного отдела, Алматинский технологический университет, г. Алматы, Республика Казахстан; e-mail: m.iztileuov@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4843-4030.

Information about the authors

Gaukhar Yussupova* – 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: gauhar_20_90@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1722-1294.

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.

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.

Akbota Itbalakova – Master of Technical Sciences, Lecturer at the Department of Ecology and Agricultural Sciences, Zhetysu University named after I. Zhansugurov, Taldykorgan, Republic of Kazakhstan; e-mail: 22d52578@atu.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3902-5104.

Maksat Iztileuov – PhD, Director of the Student Service Center – Head of the Registrar's Office, Almaty Technological University, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: m.iztileuov@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4843-4030.

Редакцияға енуі 30.03.2026
Өңдеуден кейін түсуі 13.04.2026
Жариялауға қабылданды 27.04.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-36

BY 4.0
Check for updates

ҒТАХР: 68.35.53

А.С. Абдреева*, Г.К. Искакова, Н.Б. Батырбаева, М.П. Байысбаева, М. Байғайыпқызы
Алматы технологиялық университеті,
050012, Қазақстан, Алматы қ., Төле би көш., 100
*e-mail: abdreeva.95@mail.ru

ЖАБАЙЫ ӨСІМДІКТЕРДЕН АЛЫНҒАН КОНЦЕНТРАТТЫ ҚОЛДАНА ОТЫРЫП, АШЫМАЛДЫҢ РЕЦЕПТУРАЛЫҚ ҚҰРАМЫН ӘЗІРЛЕУ ЖӘНЕ САПАСЫН ЗЕРТТЕУ

Аңдатпа: *қазіргі заманғы тамақ өнеркәсібі тұтынушыға өсімдік тектес әр түрлі биологиялық белсенді компоненттерді қолдана отырып, ашытылған нан ұсынады. Микроорганизмдерді мақсатты түрде өсіретін ашымалды пайдалану сапалы, бәсекеге қабілетті нан өндіруге мүмкіндік береді. Зерттеудің мақсаты итмұрын концентратын қолдана отырып, өздігінен ашитын бидай ұнынан жасалған ашымалдың рецептурасын жасау және оның физико-химиялық сапа көрсеткіштерін зерттеу болды. Жүргізілген зерттеулер нәтижесінде итмұрын концентраты негізінде өздігінен (табиғи) ашитын ашымалдың рецептурасы жасалды. Бидай ашымалысы 7 күнде алынады. Оңтайлы ферментация үшін 21°С-тан 28°С-қа дейінгі температура сақталады. Дайын ашымал күшті, көпіршікті, жағымды қышқыл-жемісті иіске ие болуы тиіс. Итмұрын концентратының мөлшері 2,5-тен 17,5%-ға дейін ұлғайған сайын бастапқы қышқылдық 5,2-31,6%-ға, соңғы қышқылдық 2,3-45,45%-ға артқаны анықталды. 2,5, 5,0, 7, 5 және 10,0% итмұрын концентраты қосылған ашытқы үлгілерінің көтеру күші бақылау үлгісінен кем түспеді, одан әрі ұлғаю ашымалдың көтерілу күшінің нашарлауына әкеледі. Осылайша, ашымалдың жоғары физика-химиялық көрсеткіштерін қамтамасыз ететін итмұрын концентратының ең қолайлы мөлшері анықталды, ол – 10,0%-ға дейінгі үлесі.*

Түйінді сөздер: *итмұрын концентраты, нан ашымалы, өздігінен ашитын ашымал, құрамы, сапасы*

Кіріспе

Қазақстандағы наубайхана өнеркәсібі тамақ өнеркәсібінің жетекші салаларының бірі болып табылады. Оның дамуының негізгі бағыты шикізатты ұтымды пайдаланатын, оның қауіпсіздігін қамтамасыз ететін және өнімнің тағамдық және биологиялық құндылығын арттыратын технологияларды қолдану болып табылады [1, 2]. Айта кету керек, бидай нанының, әсіресе жоғары сапалы ұнның негізгі кемшілігі-тағамдық құндылығы төмен. Мұның себебі көмірсулардың жоғары мөлшері және дәрумендердің, минералдардың, сондай-ақ талшықтардың аздығы екені белгілі [3, 4]. Сондықтан ағзаны биологиялық белсенді компоненттермен қанықтыратын нан өнімдерінің функционалды ингредиенттерімен байыту қазіргі заманғы нан пісіру өнеркәсібінің өзекті мәселесі болып табылады [5].

Нан – бұл күнделікті тұтынылатын өнім, сондықтан функционалды нан өнімдерінің ассортиментін кеңейту және олардың өндірісін арттыру маңызды. Бұл бағытқа нан дайындау технологиясы кіреді. МЕМСТ 32677-2014 сәйкес наубайханалық өндірісте қолданылатын ашымал микроорганизмдермен (сүтқышқылды бактериялар, ашытқылар және т.б.) қоректік қоспаны ашыту арқылы алынатын жартылай фабрикат ретінде қысқаша сипаттауға болады [6, 7]. Наубайхана ашымалы көптеген белгілер бойынша жіктеледі. Мысалы, нан өндірісінде қолданылатын ұн түріне байланысты бидай мен қара бидай ашымалы болып бөлінеді. Технологиялық микрофлорасына байланысты ашымалды екі үлкен топқа бөлуге болады. Бірінші топтың ашымалын өсіру кезінде (өсіру циклі) микроорганизмдердің таза дақылдарының препараттары қолданылады. Екінші топтағы ашымал, яғни өздігінен (табиғи) ашу, ұн мен қосымша шикізаттың құрамында табиғи түрде кездесетін «пайдалы» микрофлораны пайдалануды көздейді [8, 9].

Ашымалда қолданылатын микроорганизмдер нанның қышқылдығы, кеуектілігі, дәмі мен иісі сияқты көрсеткіштерді құрайды. Сонымен қатар, олар өнімнің микробиологиялық тазалығына ықпал етеді, бұл сақтау мерзімін ұзарту жағдайында, сондай-ақ тұқымдық ұнды

©А.С. Абдреева, Г.К. Искакова, Н.Б. Батырбаева, М.П. Байысбаева, М. Байғайыпқызы, 2026

пайдалану кезінде маңызды. Тағам өнімдерін ферментациялау үшін ашымалыны қопсытқыш ретінде пайдаланудың «алтын стандарты» болып саналады [10-14].

Ашымалды қолдану нан өнімдерінің дәмін, құрылымын және тұрақтылығын жақсарту үшін кең ауқымда пайдаланылады. Ашымал құрамында, ашытқы жасушалары мен сүт қышқылы бактерияларының микроорганизмдерінің комбинациялары бар. Бұл тұтынушылар жоғары бағалайтын хош иісті заттардың кең спектріне және балғын өнімдерді өндіруге қол жеткізіледі [15-18]. Сондай-ақ, ашымал қосып дайындалған нан өнімдерінің маңызды артықшылықтары – сақтау мерзімінің ұлғаюы (қышқылдық пен микробиологиялық төзімділіктің жоғарылауына, ескіру процесінің баяулауына байланысты); оның икемділігін жақсарту арқылы үгінділердің шамадан тыс үгітілуін болдырмау мүмкіндігі; гликемиялық индекстің төмендеуі; құрамындағы минералдардың биожетімділігін арттыру; глютеннің төмендеуі [19, 20]. Тұтастай алғанда, ашымал нанға дәм, құрылым және беріктік беруде шешуші рөл атқарады, бұл оны нан пісіру процесінің ажырамас бөлігі етеді.

Осылайша, функционалды ингредиенттерге негізделген ашымалды әзірлеу қажеттілігін көрсетеді. бұл сапаны, тағамдық құндылықты арттыруға және дайын өнімнің сақтау мерзімін ұзартуға ықпал етеді. Қоспаларды қолдану микрофлораны белсендіреді, қышқылдықты арттырады және хош иісті жақсартады.

Жоғарыда айтылғандарға байланысты жұмыстың мақсаты итмұрын концентратын қолдана отырып, өздігінен ашитын бидай ашытмалының рецептурасын әзірлеу және оның физико-химиялық сапа көрсеткіштерін зерттеу.

Зерттеу шарттары мен әдістері

Зерттеу нысандары ретінде: итмұрын концентраты, өздігінен ашу ашымалы (бақылау үлгісі), сондай-ақ құрамында 2,5; 5,0; 7,5; 10,0; 12,5; 15,0 және 17,5% итмұрын концентраты пайдаланылды.

Итмұрыннан концентрат алу. Өздігінен ашитын ашымал формуласында авторлардың алдыңғы жұмысында сипатталған технология бойынша алынған итмұрын концентраты қолданылды [21, 22]. Итмұрыннан спирттік сығынды мен концентрат алудың технологиялық процесі келесі кезеңдерден тұрды: өсімдік шикізаты мен экстрагентті дайындау (этанол концентрациясы 40%), ұнтақтау және елеу, ультрадыбыстық экстрактордағы экстракция (ультрадыбыстық толқындардың жиілігі 35 кГц, экстракция уақыты 30 мин, t = 50 0С), сүзу, тазарту, концентрациялау, пастерлеу және орау.

Нан-тоқаш ашытқысының қышқылдығын анықтау МЕМСТ 5670-96 «Нан-тоқаш өнімдері» Қышқылдықты анықтау әдістері» мемлекетаралық стандартының талаптарына сәйкес жүргізіледі. Бұл стандарт наубайхана өндірісінің жартылай фабрикаттарына, соның ішінде ашытқыларға қолданылады. Ашытқы қышқылдығы титриметриялық әдіспен анықталады (қышқыл-негіз титрлеу) және қышқылдық дәрежесімен көрсетіледі. Зерттеу әдісі фенолфталеин индикаторын қосу арқылы ашытқы құрамындағы қышқылдарды натрий гидроксиді (NaOH) немесе калий (KOH) ерітіндісімен бейтараптандыруға негізделген.

Жартылай фабрикаттың көтерілу күші (наубайхана өндірісі): осы жағдайларда микроорганизмдердің тіршілік әрекетін сипаттайтын наубайхана өндірісінің жартылай фабрикатын қопсыту процесінің көрсеткіші (ГОСТ 32677-2014. Нан-тоқаш өнімдері терминдер мен анықтамалар).

Көтерілу күшін «шардың» қалқып шығу әдісімен анықтады. Бұл әдіс ашымал мен ұннан иленген қамыр шарының суда қалқып шығу жылдамдығын анықтауға негізделген. Жартылай фабрикаттың көтеру күші деп шартты түрде қамыр шарлары суға салынған сәттен бастап олардың бетіне қалқып шыққан сәтіне дейінгі уақыт аралығы (минутпен) түсініледі [6].

Зерттеу нәтижелері

Бидай ұнынан арналған өздігінен ашу ашымалының технологиясын әзірлеу – бұл өнеркәсіптік ашытқыларды қоспай, тек ұн мен судан жабайы ашытқы саңырауқұлақтары мен сүт қышқылы бактерияларының (СҚБ) тұрақты дақылын жасау процесі. Бұл хош иісі айқын, қыртысы қытырлақ, сақтау мерзімі ұзақ және тез қорытылатын нан өнімін алуға мүмкіндік береді.

Итмұрын концентратын қолдана отырып, өздігінен ашу ашымалының рецепті 1-кестеде және 1-суретте келтірілген.

Кесте 1 – Рецепт итмұрын концентраты негізінде өздігінен (табиғи) ашу стартерін дайындау

Шикізат атаулары	Мөлшері, г	Шикізат атаулары	Мөлшері, г
1-күн – ашымалыны бастау		4-күн –үшінші қоректендіру	
қара бидай ұны	25	ашымал (3-ші күндегі)	50
1-сұрыпты бидай ұны	25	1-сұрыпты бидай ұны	25
итмұрын концентраты	2,5-17,5	су	25
су	есеп бойынша		
2-күн – бірінші қоректендіру		5-күн – төртінші қоректендіру	
ашымал(1-ші күндегі)	100	ашымал (4-ші күндегі)	50
1-сұрыпты бидай ұны	25	1-сұрыпты бидай ұны	25
су	25	су	25
3-күн – екінші қоректендіру		6-күн – бесінші қоректендіру	
ашымал (2-ші күндегі)	50	ашымал (5-ші күндегі)	50
1-сұрыпты бидай ұны	25	1-сұрыпты бидай ұны	25
су	25	су	25
7-күн – алтыншы қоректендіру			
ашымал (6-шы күндегі)		50	
1-сұрыпты бидай ұны		25	
су		25	



1 күн



2 күн



3 күн



4 күн



5 күн



6 күн



7 күн

Сурет 1 – Итмұрын жемісі концентраты негізінде өздігінен (табиғи) ашу ашымал үлгілерінің суреті

Бидай ашымалын өсіру 7 күнде іске асырылады. Бастапқы кезеңде бидай мен қара бидай ұны, су (25-28°C) және итмұрын концентраты қолданылады. Ұн мен су тең пропорцияда араласады. Келесі күндері ашытқылар мен сүт қышқылы бактерияларының тіршілігін қамтамасыз ету үшін үнемі тамақтандыру (ұн мен судың жаңа бөлігін қосу) жүргізіледі. Оңтайлы ашыту үшін температура 21°C-тан 28°C-қа дейін сақталады, дайын ашытқы күшті, көпіршікті, жағымды қышқыл-жеміс иісі болуы керек.

Осы зерттеу барысында ашымалдың эксперименттік үлгілерінің физика-химиялық көрсеткіштеріне бағалау жүргізілді (2-кесте). Физика-химиялық көрсеткіштерді бағалау кезінде ашымалылдың бастапқы және соңғы, сондай ақ көтерілу күші анықталды. 2-кестені талдау нәтижиесі итмұрын концентратының мөлшері артқан сайын, бақылау үлгісімен салыстырғанда қышқылдықтың жоғарылайтынын көрсетті. Мәселен, концентрат мөлшерін 2,5%-дан 17,5%-ға дейін арттырғанда, бастапқы қышқылдық 5,2-31,6%-ға, ал соңғы қышқылдық 2,3-45,45%-ға ұлғайды.

Көтеру күші «шардың» қалқып шығу әдісімен анықталды. Өлшеу нәтижелері бойынша құрамында 2,5; 5,0; 7,5 және 10,0% итмұрын концентраты бар үлгілер бақылау үлгісінен кем түспеді, ал одан әрі ұлғайту ашытқылардың көтеру күшінің нашарлауына әкеледі.

Кесте 2 – Итмұрын концентраты негізінде өздігінен (табиғи) ашыту ашытқыларының сапа көрсеткіштері

Шикізат атаулары	Бақылау	Итмұрын концентратының мөлшері, %						
		2,5	5	7,5	10	12,5	15	17,5
Қышқылдық, градус (бастапқы)	3,8	4,0	4,2	4,4	4,5	4,6	4,8	5,0
Қышқылдық, градус (соңғы)	8,8	9,0	9,4	9,8	10,6	11,6	12,4	12,8
Көтергіштік күші, мин	22	20	21	22	23	30	34	38

Ғылыми нәтижелерді талқылау

Әдеби дереккөздерді талдау ашытқы пайдаланылған нанының, ашымалмен пісірілген нанға қарағанда бірқатар артықшылықтары бар екенін көрсетеді. Біріншіден, оның құрамында дәрумендер мен минералдар көп, өйткені ашымал қамырды пайдалы бактериялармен байытады. Екіншіден, мұндай нан балғындықты ұзақ сақтайды және ескірмейді. Үшіншіден, ол аз калориялы, өйткені оны дайындау үшін қант пен май аз қолданылады. Сонымен бірге, ашытылған нан сүт қышқылының құрамына байланысты жарқын дәм мен хош иіске ие. Осылайша, ашымалды қолдану тағамның сапасы мен пайдалы қасиеттерін сақтауға, сондай-ақ жаңа дәм мен текстуралық сипаттамаларды жасауға қатысты [23-26]. Дегенмен, ашымалды қолданып бидай нанын дайындау технологиясы көп фазалы, ұзақ мерзімді, көп уақытты және қамырдың сапасын үнемі бақылауды қажет етеді.

Ашымалды әзірлеу кезінде құрамына кіретін өнімдерге көп көңіл бөлу керек. Соңғы жылдардағы зерттеулер ингредиенттердің сапасы мен құрамы микробиологиялық профильді және болашақ ашытқының тұрақтылығын анықтайтын негіз екенін көрсетті. Нан пісіретін ашытқыларда функционалды ингредиенттерді қолдану биологиялық құндылықты арттыруға, қамырдың реологиялық қасиеттерін жақсартуға және өнімдердің балғындығын ұзартуға бағытталған. Мұндай ингредиенттерге құрамында фенолдық қосылыстардың, каротиноидтардың, токоферолдардың, флавоноидтардың және С дәруменінің көп мөлшері кездеседі. Сонымен қатар итмұрынның құрамында басқа да дәрумендер (А, В1, В2, К), минералдар (кальций, фосфор, калий), көмірсулар (пектин), таниндер және эфир майлары бар [27-30]. Итмұрын жемістері мен оның қайта өңделген өнімдерінің құрамындағы биоактивті қосылыстардың жоғары концентрациясы халықты биологиялық құндылығы жоғары функционалды тағам өнімдерімен қамтамасыз ету мәселесін шешуге мүмкіндік береді. Нан пісіру өндірісінде, атап айтқанда ашытқы (стартерлік дақылдар) құрамына итмұрын концентратын енгізу – өнім ассортиментін кеңейтіп қана қоймай, диеталық қасиеттері жақсартылған бәсекеге қабілетті инновациялық өнімдерді модельдеуге жағдай жасайды. Тұтастай алғанда, ашытқы нанға дәм, дәм, құрылым және беріктік беруде шешуші рөл атқарады, бұл оны нан пісіру процесінің ажырамас бөлігі етеді.

Қорытынды

Жүргізілген зерттеулер нәтижесінде итмұрын концентраты негізінде өздігінен (табиғи) ашымалдың рецептурасы жасалды. Ашымалды дайындау циклі 7 тәулікті құрады,

Ферментация процесінің тиімді өтуі үшін оңтайлы температура режімі 21°С-тан 28°С-қа дейін сақталды. Дайын ашымал күшті, көпіршікті, жағымды қышқыл-жеміс иісі болуы шарт. Нан ашымалының қышқылдығын анықтау - бұл нанның дәмін, құрылымын және кеуектілігіне әсер ететін сапасын бақылаудың маңызды процесі. Итмұрын концентратының мөлшері 2,5-тен 17,5%-ға дейін өскен сайын бастапқы қышқылдық 5,2-31,6%-ға, соңғы қышқылдық 2,3-45,45%-ға артқаны көрсетілген. 2,5, 5,0, 7, 5 және 10,0% итмұрын концентраты бар ашымал үлгілерінің көтерілу күші бақылау үлгісінен кем түспеді, одан әрі ұлғаю ашытқылардың көтеру күшінің нашарлауына әкеледі. Ашытқының физика-химиялық және технологиялық көрсеткіштерін оңтайландыратын итмұрын концентратының ең тиімді мөлшері 10,0%-ға дейін екені ғылыми тұрғыдан негізделді. Бұл көрсеткіш дайын өнімнің жоғары сапасын сақтай отырып, оның биологиялық құндылығын арттыруға мүмкіндік береді.

Әдебиеттер тізімі

1. Физико-химические показатели и безопасность хлеба с закваской / А. Дуйсенбай и др. // Academic Journal of Physical and Chemical Sciences. – 2024. – № 4. – С. 135-145. https://doi.org/10.32014/2023.2518-1483.314.
2. Оценка системы управления хлебопекарней для повышения качества и безопасности пищевых продуктов / Ж.С. Мухаметжанова и др. // Вестник университета «Туран». – 2024. – № 1. – С. 201-212. https://doi.org/10.46914/1562-2959-2024-1-1-201-212.
3. Курбанова С.О. Анализ способов повышения качественных показателей хлеба путем использования природных добавок / С.О. Курбанова, А.А. Набиев, Э.А. Ахмедова // Вестник науки. – 2024. – № 10(79). https://doi.org/10.24412/2712-8849-2024-1079.
4. Plant survival under drought stress: Implications, adaptive responses, and integrated rhizosphere management strategy for stress mitigation / R. Zia et al // Microbiological Research. – 2021. – Vol. 242. https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126626.
5. Биотехнология производства бездрожжевого хлеба с использованием местного штамма *Streptococcus thermophilus* и дикого хмеля / С.А. Гревцова и др. // Инновации и безопасность пищевых продуктов. – 2020. – № 4. – С. 28-34. https://doi.org/10.31677/2072-6724-2020-30-4-28-34.
6. Гурьев С.С. Изучение свойств заквасок, приготовленных на основе нетрадиционных видов муки / С.С. Гурьев, В.С. Попов // Техника и технология пищевых производств. – 2021. – Т. 51, № 3. – С. 470-479. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-3-470-479.
7. Хлесткин В.К. Традиции ведения хлебных заквасок на Русском Севере / В.К. Хлесткин // Письма в Вавиловский журнал генетики и селекции. – 2020. – Т. 6, № 2. – С. 65-71. https://doi.org/10.18699/Letters2020-6-08.
8. Жаркова И.М. Закваски спонтанного (естественного) брожения: особенности технологии и роль в современном хлебопекарном производстве / И.М. Жаркова, Ю.Ф. Росляков, Д.С. Иванчиков // Техника и технология пищевых производств. – 2023. – Т. 53, № 3. – С. 525-544. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-3-525-544.
9. History and domestication of *Saccharomyces cerevisiae* in bread baking / C. Lahue et al // Frontiers in Genetics. – 2020. – Vol. 11. https://doi.org/10.3389/fgene.2020.584718.
10. Sourdough improves the quality of whole-wheat flour products: Mechanisms and challenges – A review / S. Ma et al // Food Chemistry. – 2021. – Vol. 360. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130038.
11. Novel insights on the functional/nutritional features of the sourdough fermentation / M. Gobbetti et al // International Journal of Food Microbiology. – 2019. – Vol. 302. – P. 103-113. https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2018.05.018.
12. Gänzle M.G. Lifestyles of sourdough lactobacilli – Do they matter for microbial ecology and bread quality? / M.G. Gänzle, J. Zheng // International Journal of Food Microbiology. – 2019. – Vol. 302. – P. 15-23. https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2018.08.019.

13. Investigation of the nutritional, functional and technological effects of the sourdough fermentation of sprouted flours / M. Montemurro et al // International Journal of Food Microbiology. – 2019. – Vol. 302. – P. 47-58. https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2018.08.005.
14. Whole cereal grains and potential health effects: Involvement of the gut microbiota / L. Gong et al // Food Research International. – 2018. – Vol. 103. – P. 84-102.
15. Defined co-cultures of yeast and bacteria modify the aroma, crumb and sensory properties of bread / M. Winters et al // Journal of Applied Microbiology. – 2019. – Vol. 127, № 3. – P. 778-793. https://doi.org/10.1111/jam.14349.
16. Effects of leavening agent and time on bread texture and in vitro starch digestibility / A. Hernandez et al // Journal of Food Science and Technology. – 2022. – Vol. 59, № 5. – P. 1922-1930. https://doi.org/10.1007/s13197-021-05206-1.
17. Effect of mixed cultures of yeast and lactobacilli on the quality of wheat sourdough bread / D. Xu et al // Frontiers in Microbiology. – 2019. – Vol. 10. https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.02113.
18. Fermented foods in a global age: East meets West / J.P. Tamang et al // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. – 2020. – Vol. 19, № 1. – P. 184-217. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12520.
19. Characterization of artisanal spontaneous sourdough wheat bread from Central Greece / P. Katsi et al // Foods. – 2021. – Vol. 10, № 3. https://doi.org/10.3390/foods10030635.
20. Characteristics of sourdough bread fermented with *Pediococcus pentosaceus* and Saccharomyces cerevisiae / J. Jin et al // Food Chemistry. – 2021. – Vol. 345. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128787.
21. Substantiation of ultrasound-assisted extraction parameters for obtaining an extract from rose hips (*Rosa Canina L.*) / G.K. Iskakova et al // Вестник Университета Шакарима. Серия технические науки. – 2024. – № 2(14). – С. 92-98. https://doi.org/10.53360/2788-7995-2024-2(14)-12.
22. Қара шетен жемістерінің сапасын зерттеу және олардан экстрактілер мен концентраттар алу / Г.К. Искакова и др. // Вестник Университета Шакарима. Серия технические науки. – 2025. – № 3(19). https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-3(19)-32.
23. Изучение влияния пшеничной закваски «Грантум» на качество и безопасность хлебобулочных изделий / О.А. Савкина и др. // Всё о мясе. – 2020. – № 5S. – С. 309-313. https://doi.org/10.21323/2071-2499-2020-5S-309-313.
24. Пшеничный хлеб на закваскаx / Л.И. Кузнецова и др. // Кондитерское и хлебопекарное производство. – 2019. – № 9-10. – С. 44-48.
25. Impact of using the developed starter culture on the quality of sourdough, dough and wheat bread / O. Savkina et al // Agronomy Research. – 2019. – Vol. 17, № S2. – P. 1435-1451. https://doi.org/10.15159/AR.19.138.
26. Дорош А.П. Антагонистические свойства хлебных заквасок направленного культивирования и микробиологические характеристики хлеба / А.П. Дорош, Н.Н. Грегирчак // Техника и технология пищевых производств. – 2015. – Т. 37, № 2. – С. 10-15.
27. Saricaoglu F.T. Application of multi pass high pressure homogenization to improve stability, physical and bioactive properties of rosehip (*Rosa canina L.*) nectar / F.T. Saricaoglu // Food Chemistry. – 2019. – Vol. 282. – P. 67-75. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.01.002.
28. Korkmaz M. Analysis of genetic relationships between wild roses (*Rosa L. Spp.*) growing in Turkey / M. Korkmaz, N.Y. Dogan // Genetic Resources and Crop Evolution. – 2018. – Vol. 65, № 4. – P. 305-310.
29. Gruenwald J. Rosa Canina – Rose hip pharmacological ingredients and molecular mechanics counteracting osteoarthritis – A systematic review / J. Gruenwald, R. Uebelhack, M.I. Moré // Phytomedicine. – 2019. – Vol. 60. – Art. 152908.
30. Bioactive Compounds and Antioxidant Activity in the Fruit of Rosehip (*Rosa canina L.* and *Rosa rubiginosa L.*) / F. Pena et al // Molecules. – 2023. – Vol. 28, № 8. Art. 3544. DOI: 10.3390/molecules28083544.

References

1. Fiziko-khimicheskie pokazateli i bezopasnost' khleba s zakvaskoi / A. Duisenbai i dr. // Academic Journal of Physical and Chemical Sciences. – 2024. – № 4. – S. 135-145. https://doi.org/10.32014/2023.2518-1483.314. (In Russian).
2. Otsenka sistemy upravleniya khlebopekarnei dlya povysheniya kachestva i bezopasnosti pishchevykh produktov / Zh.S. Mukhametzhanova i dr. // Vestnik universiteta «Turan». – 2024. – № 1. – S. 201-212. https://doi.org/10.46914/1562-2959-2024-1-1-201-212. (In Russian).
3. Kurbanova S.O. Analiz sposobov povysheniya kachestvennykh pokazatelei khleba putem ispol'zovaniya prirodnykh dobavok / S.O. Kurbanova, A.A. Nabiev, Eh.A. Akhmedova // Vestnik nauki. – 2024. – № 10(79). https://doi.org/10.24412/2712-8849-2024-1079. (In Russian).
4. Plant survival under drought stress: Implications, adaptive responses, and integrated rhizosphere management strategy for stress mitigation / R. Zia et al // Microbiological Research. – 2021. – Vol. 242. https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126626. (In English).
5. Biotekhnologiya proizvodstva bezdrozhzhevogo khleba s ispol'zovaniem mestnogo shtamma Streptococcus thermophilus i dikogo khmelya / S.A. Grevtsova i dr. // Innovatsii i bezopasnost' pishchevykh produktov. – 2020. – № 4. – S. 28-34. https://doi.org/10.31677/2072-6724-2020-30-4-28-34. (In Russian).
6. Gur'ev C.C. Izuchenie svoistv zakvasok, prigotovlennykh na osnove netraditsionnykh vidov muki / C.C. Gur'ev, V.S. Popov // Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv. – 2021. – T. 51, № 3. – S. 470-479. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-3-470-479. (In Russian).
7. Khlestkin V.K. Traditsii vedeniya khlebnykh zakvasok na Russkom Severe / V.K. Khlestkin // Pis'ma v Vavilovskii zhurnal genetiki i selektsii. – 2020. – T. 6, № 2. – S. 65-71. https://doi.org/10.18699/Letters2020-6-08. (In Russian).
8. Zharkova I.M. Zakvaski spontannogo (estestvennogo) brozheniya: osobennosti tekhnologii i rol' v sovremennom khlebopekarnom proizvodstve / I.M. Zharkova, Yu.F. Roslyakov, D.S. Ivanchikov // Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv. – 2023. – T. 53, № 3. – S. 525-544. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-3-525-544. (In Russian).
9. History and domestication of Saccharomyces cerevisiae in bread baking / C. Lahue et al // Frontiers in Genetics. – 2020. – Vol. 11. https://doi.org/10.3389/fgene.2020.584718. (In English).
10. Sourdough improves the quality of whole-wheat flour products: Mechanisms and challenges – A review / S. Ma et al // Food Chemistry. – 2021. – Vol. 360. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130038. (In English).
11. Novel insights on the functional/nutritional features of the sourdough fermentation / M. Gobbetti et al // International Journal of Food Microbiology. – 2019. – Vol. 302. – P. 103-113. https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2018.05.018. (In English).
12. Gänzle M.G. Lifestyles of sourdough lactobacilli – Do they matter for microbial ecology and bread quality? / M.G. Gänzle, J. Zheng // International Journal of Food Microbiology. – 2019. – Vol. 302. – P. 15-23. https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2018.08.019. (In English).
13. Investigation of the nutritional, functional and technological effects of the sourdough fermentation of sprouted flours / M. Montemurro et al // International Journal of Food Microbiology. – 2019. – Vol. 302. – P. 47-58. https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2018.08.005. (In English).
14. Whole cereal grains and potential health effects: Involvement of the gut microbiota / L. Gong et al // Food Research International. – 2018. – Vol. 103. – P. 84-102. (In English).
15. Defined co-cultures of yeast and bacteria modify the aroma, crumb and sensory properties of bread / M. Winters et al // Journal of Applied Microbiology. – 2019. – Vol. 127, № 3. – P. 778-793. https://doi.org/10.1111/jam.14349. (In English).
16. Effects of leavening agent and time on bread texture and in vitro starch digestibility / A. Hernandez et al // Journal of Food Science and Technology. – 2022. – Vol. 59, № 5. – P. 1922-1930. https://doi.org/10.1007/s13197-021-05206-1. (In English).
17. Effect of mixed cultures of yeast and lactobacilli on the quality of wheat sourdough bread / D. Xu et al // Frontiers in Microbiology. – 2019. – Vol. 10. https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.02113. (In English).
18. Fermented foods in a global age: East meets West / J.P. Tamang et al // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. – 2020. – Vol. 19, № 1. – P. 184-217. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12520. (In English).

19. Characterization of artisanal spontaneous sourdough wheat bread from Central Greece / P. Katsi et al // Foods. – 2021. – Vol. 10, № 3. https://doi.org/10.3390/foods10030635. (In English).
20. Characteristics of sourdough bread fermented with Pediococcus pentosaceus and Saccharomyces cerevisiae / J. Jin et al // Food Chemistry. – 2021. – Vol. 345. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128787. (In English).
21. Substantiation of ultrasound-assisted extraction parameters for obtaining an extract from rose hips (Rosa Canina L.) / G.K. Iskakova et al // Vestnik Universiteta Shakarima. Seriya tekhnicheskie nauki. – 2024. – № 2(14). – S. 92-98. https://doi.org/10.53360/2788-7995-2024-2(14)-12. (In English).
22. Kara sheten zhemisterinin sapasyn zertteu zhane olardan ehkstraktiler men kontsentrattar alu / G.K. Iskakova i dr. // Vestnik Universiteta Shakarima. Seriya tekhnicheskie nauki. – 2025. – № 3(19). https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-3(19)-32. (In Kazakh).
23. Izuchenie vliyaniya pshenichnoi zakvaski «Grantum» na kachestvo i bezopasnost' khlebobulochnykh izdelii / O.A. Savkina i dr. // Vse o myase. – 2020. – № 5S. – S. 309-313. https://doi.org/10.21323/2071-2499-2020-5S-309-313. (In Russian).
24. Pshenichnyi khleb na zakvaskakh / L.I. Kuznetsova i dr. // Konditerskoe i khlebopekarnoe proizvodstvo. – 2019. – № 9-10. – S. 44-48. (In Russian).
25. Impact of using the developed starter culture on the quality of sourdough, dough and wheat bread / O. Savkina et al // Agronomy Research. – 2019. – Vol. 17, № S2. – P. 1435-1451. https://doi.org/10.15159/AR.19.138. (In English).
26. Dorosh A.P. Antagonisticheskie svoistva khlebnykh zakvasok napravlennogo kul'tivirovaniya i mikrobiologicheskie kharakteristiki khleba / A.P. Dorosh, N.N. Gregirchak // Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv. – 2015. – T. 37, № 2. – S. 10-15. (In Russian).
27. Saricaoglu F.T. Application of multi pass high pressure homogenization to improve stability, physical and bioactive properties of rosehip (Rosa canina L.) nectar / F.T. Saricaoglu // Food Chemistry. – 2019. – Vol. 282. – P. 67-75. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.01.002. (In English).
28. Korkmaz M. Analysis of genetic relationships between wild roses (Rosa L. Spp.) growing in Turkey / M. Korkmaz, N.Y. Dogan // Genetic Resources and Crop Evolution. – 2018. – Vol. 65, № 4. – P. 305-310. (In English).
29. Gruenwald J. Rosa Canina – Rose hip pharmacological ingredients and molecular mechanics counteracting osteoarthritis – A systematic review / J. Gruenwald, R. Uebelhack, M.I. Moré // Phytomedicine. – 2019. – Vol. 60. – Art. 152908. (In English).
30. Bioactive Compounds and Antioxidant Activity in the Fruit of Rosehip (Rosa canina L. and Rosa rubiginosa L.) / F. Pena et al // Molecules. – 2023. – Vol. 28, № 8. Art. 3544. DOI: 10.3390/molecules28083544. (In English).

А.С. Абдреева*, Г.К. Искакова, Н.Б. Батырбаева, М.П. Байысбаева, М. Байғайыпқызы
[1]Алматы технологиялық университеті,
050012, Қазақстан, Алматы қ., Төле би көш., 100
*e-mail: iskakova-61@mail.ru

РАЗРАБОТКА РЕЦЕПТУРНОГО СОСТАВА И ИССЛЕДОВАНИЯ КАЧЕСТВА ЗАКВАСОК С ПРИМЕНЕНИЕМ КОНЦЕНТРАТА ИЗ ДИКОРАСТУЩИХ РАСТЕНИЙ

Современная пищевая промышленность предлагает потребителю хлеб, выпеченный на закваске с использованием различных биологически активных компонентов растительного происхождения. Использование закваски с направленным культивированием микроорганизмов позволяет производить качественный конкурентоспособный хлеб. Целью исследований являлось разработка рецептуры пшеничной закваски спонтанного брожения с использованием концентрата из шиповника и изучение ее качественных характеристик. В результате проведенных исследований разработана рецептура закваски спонтанного (естественного) брожения на основе концентрата из плодов шиповника. Выведение пшеничной закваски занимает 7 дней, для оптимальной ферментации поддерживается температура от 21°С до 28°С, готовая закваска должна быть сильной, пузырчатой, с приятным кисло-фруктовым запахом. Установлено, что с увеличением дозировок концентрата из шиповника с 2,5 до 17,5 % начальная кислотность увеличилась на 5,2-31,6%, конечная кислотность – на 2,3-45,45%. Подъемная сила образцов заквасок с содержанием концентрата из шиповника 2,5, 5,0, 7, 5 и 10,0% не уступали контрольному образцу, дальнейшее же

увеличение приводит к ухудшению подъемной силы заквасок. Таким образом, установлена рациональная дозировка концентрата из шиповника в количестве до 10,0 % в закваске, обеспечивающая хорошие физико-химические показатели качества закваски.

Ключевые слова: *концентрат из шиповника, хлебная закваска, закваска спонтанного брожения, рецептура, качество.*

A.S. Abdreeva*, G.K. Iskakova, N.B. Batyrbayeva, M.P. Bayisbaeva, M. Baigaiypkyzy
[1]Almaty technological university,
050012, Kazakhstan, Almaty, str. Tole bi, 100
*e-mail: iskakova-61@mail.ru

DEVELOPMENT OF THE FORMULATION AND QUALITY RESEARCH OF STARTER CULTURES USING WILD PLANT CONCENTRATES

The modern food industry offers consumers bread baked using sourdough starters enriched with various biologically active components of plant origin. The use of sourdough with directed cultivation of microorganisms allows for the production of high-quality, competitive bread. The aim of this research was to develop a formulation for spontaneous fermentation wheat sourdough using rose hip concentrate and to study its qualitative characteristics. As a result of the studies, a formulation for spontaneous (natural) fermentation sourdough based on rose hip fruit concentrate was developed. The cultivation of the wheat sourdough takes 7 days; a temperature between 21°C and 28°C is maintained for optimal fermentation. The finished sourdough should be strong and bubbly, with a pleasant acidic-fruity aroma. It was established that with an increase in rose hip concentrate dosages from 2.5% to 17.5%, the initial acidity increased by 5.2-31.6%, and the final acidity by 2.3-45.45%. The lifting power (leavening ability) of sourdough samples containing 2.5, 5.0, 7.5, and 10.0% rose hip concentrate was not inferior to the control sample, while a further increase led to a deterioration of the lifting power. Thus, a rational dosage of rose hip concentrate in the amount of up to 10.0% in the sourdough was established, ensuring good physicochemical quality indicators of the starter.

Key words: *rose hip concentrate, bread sourdough, spontaneous fermentation sourdough, formulation, quality.*

Авторлар туралы ақпарат

Асемкул Садуақасқызы Абдреева – «Нан өнімдері және қайта өңдеу өндірістерінің технологиясы» кафедрасының сеньор-лекторы, Алматы технологиялық университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қаласы; e-mail: abdreeva.95@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3567-8028.

Галия Куандыккызы Искакова – техника ғылымдарының докторы, «Нан өнімдері және қайта өңдеу өндірістерінің технологиясы» кафедрасының профессоры, Алматы технологиялық университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қаласы; e-mail: iskakova-61@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2077-8755.

Нургуль Базиловна Батырбаева – «Нан өнімдері және қайта өңдеу өндірістерінің технологиясы» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, доцент, PhD, Алматы технологиялық университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қаласы; e-mail: alua_01.02.03@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8258-5353.

Меруерт Пернебаевна Байысбаева – «Нан өнімдері және қайта өңдеу өндірістерінің технологиясы» кафедрасының техника ғылымдарының кандидаты, профессордың м.а, Алматы технологиялық университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қаласы. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1172-9281.

Макпал Байғайыпқызы – «Нан өнімдері және өңдеу өндірістерінің технологиясы» кафедрасының PhD докторанты; Алматы технологиялық университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.; e-mail: makpal_atyhanova@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1092-1853.

Information about the authors

Asemkul Saduakasovna Abdreeva* – Senior Lecturer of the Department of «Technology of Bread Products and Processing Industries», Almaty Technological University, Republic of Kazakhstan, Almaty; e-mail: abdreeva.95@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3567-8028.

Galiya Kuandykovna Iskakova – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department «Technology of bread products and processing industries», Almaty Technological University, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: iskakova-61@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2077-8755.

Nurgul Bazilovna Batyrbayeva – PhD, associate professor of the department «Technology of bread products and processing industries», «Almaty technological university», Republic of Kazakhstan, Almaty; e-mail: alua_01.02.03@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8258-5353.

Meruert Pernebaevna Bayisbaeva – candidate of Engineering sciences, acting professorof the Department «Technology of bread products and processing industries», Almaty Technological University, Almaty, Republic of Kazakhstan; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1172-9281.

Makpal Baigaiypkyzy – PhD student of the department «Technology of bread products and processing industries», JSC «Almaty technological university», Republic of Kazakhstan, Almaty; e-mail: makpal_atyhanova@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1092-1853.

Сведения об авторах

Асемкул Садуакасовна Абдреева* – сеньор-лектор кафедры «Технология хлебопродуктов и перерабатывающих производств», Алматинский технологический университет, г. Алматы, Республика Казахстан; e-mail: abdreeva.95@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3567-8028.

Галия Куандыковна Искакова – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология хлебопродуктов и перерабатывающих производств», Алматинский технологический университет, г. Алматы, Республика Казахстан; e-mail: iskakova-61@mail.ru.
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2077-8755.

Нургуль Базиловна Батырбаева – ассоциированный профессор, доцент (ассоциированный профессор), кафедры «Технология хлебопродуктов и перерабатывающих производств»; Алматинский технологический университет, г. Алматы, Республика Казахстан; e-mail: alua_01.02.03@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8258-5353.

Меруерт Пернебаевна Байысбаева – к.т.н., и.о. профессор кафедры «Технология хлебопродуктов и перерабатывающих производств», Алматинский технологический университет, г. Алматы, Республика Казахстан. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1172-9281.

Макпал Байгайыпкызы – докторант кафедры «Технология хлебобулочных изделий и перерабатывающих производств», Алматинский технологический университет, Республика Казахстан, г. Алматы; e-mail: makpal_atyhanova@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1092-1853.

Редакцияға енуі 06.03.2026
Өңдеуден кейін түсуі 29.04.2026
Жариялауға қабылданды 30.04.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-37

IRSTI: 65.63.39

E.A. Gabrilyants*, R.S. Alibekov, A.A. Utebayeva
M. Auezov South Kazakhstan University,
160012, Republic of Kazakhstan, Shymkent, Tauke Khan Avenue, 5
*e-mail: gabrilyants@mail.ru

A COMPARATIVE ANALYSIS OF MILK-CLOTTING COAGULANTS IN CAMEL MILK CHEESEMAKING

Abstract: *Camels (Camelus dromedarius), which are highly resilient to extreme climatic conditions, play a vital role in ensuring food security and the sustainability of pastoral farming in Kazakhstan. Enzymatic coagulation is a key stage in cheese production, determining the structure, yield and quality characteristics of the product. The efficiency of coagulation and the intensity of proteolysis depend on the nature of the coagulant and its rennet and proteolytic activity, which is particularly important when processing camel milk, given its specific protein composition.*

This study aimed to conduct a comparative analysis of camel's milk cheeses produced using microbial and animal-derived coagulants. The study assessed dry matter content, yield, and textural characteristics, and evaluated the effect of coagulant type on the formation of the cheese's peptide profile. The results obtained show that, under various temperature conditions, the Kalase coagulant exhibited a longer coagulation time, ranging from 224,8 s at 34 °C to 95,6 s at 40 °C, compared with the Chy-Max coagulant, which ranged from 180 s at 34 °C to 88 s at 40 °C. In contrast, at higher temperatures (38-40 °C), the difference narrowed to 7,6-9 s. Syneresis showed that when using the Chy-Max coagulant, the curd released an average of 55,6% whey, whilst cheese samples using the Kalase coagulant showed a lower syneresis level of 45,6%. The cheese yield

©E.A. Gabrilyants, R.S. Alibekov, A.A. Utebayeva, 2026

using the Chy-Max coagulant was 20,9%, whilst that using the coagulant Kalase was 18,7%. The total solid content in the cheese samples using the coagulant Chy-Max and Kalase was 48,4%±0,05 and 47,3%±0,5, respectively. The textural parameters of the cheeses indicated a denser texture when the microbial coagulant was used. Biologically active peptides were also identified in both cheese samples, which possess antihypertensive, antioxidant, antimicrobial, and immunomodulatory properties.

Key words: *camel milk, cheese, coagulation, microbial coagulant, animal coagulant, peptide composition.*

Introduction

Milk coagulation is a key stage in cheese production. It is achieved by coagulant preparations that break down kappa-casein, leading to the aggregation of casein micelles and the formation of a protein network [1].

The rate and extent of syneresis are influenced by temperature, holding time, pH, structural and mechanical properties, and the proteolytic activity of the coagulating [2,3].

Coagulants of animal and microbial origin differ in proteolytic specificity, resulting in distinct peptide profiles. These peptides can exhibit biological activity and functional properties that influence cheese flavour, aroma, and texture [4].

In recent years, interest in bioactive peptides has grown due to their health-promoting properties, which depend on specific amino acid sequences. Bioactive peptides are chains of 2–20 amino acids linked by amide or peptide bonds, which are released when proteolytic enzymes cleave them from inactive protein forms. They have been reported to exhibit antimicrobial, antioxidant, antidiabetic, and antihypertensive activities [5].

Most studies on bioactive peptides have focused on cow's milk and, to a lesser extent, on sheep's and goat's milk [6]. In contrast, information on peptides derived from camel milk remains limited, highlighting the need for further research.

This study aimed to conduct a comparative analysis of camel's milk cheeses produced using coagulants of microbial and animal origin.

Materials and Methods

Fresh whole camel milk from C. dromedarius from a private herd in the local region was obtained.

Soft camel milk cheeses were produced using two types of coagulants:

Microbial coagulant Chy-Max M 1000 (Chr. Hansen, Denmark) is a purified solution of chymosin obtained by fermentation of Aspergillus niger var. awamori.

Kalase (CSK Food Enrichment, The Netherlands) is an animal-derived rennet containing approximately 80% chymosin and 20% pepsin.

Cheesemaking. Milk was pasteurised to 63-65°C. It was cooled to the coagulation temperature of 34-40°C. The initial pH of the milk was 6,3. Milk-clotting coagulants were added in accordance with the manufacturer's instructions: 50 μL/L for Chy-Max and approximately 9 drops/L for Kalase. Coagulation was performed under controlled conditions at temperatures ranging from 34 to 40°C. Coagulation was carried out under controlled conditions and monitored by recording time until firm curd formation was achieved. After coagulation, the curd was cut, moulded and salted. All cheesemaking trials were performed in triplicate and the cheese samples underwent the following analyses. Both types of cheese were produced under identical processing conditions, differing only in the type of rennet used.

The coagulation time of camel milk under different conditions was determined using a modified method based on the International Dairy Federation standard (IDF 157:2007) [7].

Syneresis was evaluated based on the volume of whey released from the curd.

Total solids of the cheese samples were determined by the oven-drying method in accordance with AOAC (1997), method 926.08 [8]. Samples were dried to a constant weight in a forced-air oven at 102 ± 2°C. Total solids were calculated gravimetrically as the percentage loss in mass after drying.

Yield of camel milk cheese was calculated using the following equation:

$$Yield\ (\%) = \frac{Wc}{\mathrm{Wm}}\ x\ 100, \quad (1)$$

where «Wch» – weight of cheese after whey drainage(g).

Wm – weight of raw milk used for cheese production(g).

Texture profile analysis. Texture profile analysis was carried out on all samples using a texture analyser (TX-700 Texture Analyser, France).

The biologically active peptides were identified using nano-flow reverse-phase liquid chromatography coupled with tandem mass spectrometry (nanoLC-MS/MS). Mass spectra were recorded on an Impact II ESI-Q-TOF instrument (Bruker Daltonics, Germany). Biological activity was identified using the database of biologically active milk peptides [5].

Statistical analysis. All experiments were conducted in triplicate (n=3), and the results are presented as the mean and standard deviation (SD). Statistical differences between samples were evaluated using an independent Student's t-test. Differences were considered significant at p<0,05. The data analysis was performed using IBM SPSS Statistics 23.0 and MS Excel.

Results and discussion. In this study, the effect of two proteolytic coagulants, Chy-Max and Kalase, on the coagulation time of camel milk was investigated. Coagulation time was used as an indicator of rennet efficacy and clot formation kinetics. The effect of temperature on milk coagulation time was assessed for Chy-Max and Kalase in the range of 34-40°C (Fig. 1). As the temperature increased, a progressive reduction in coagulation time was observed for both rennets.

The rate of syneresis determines the rate of whey separation and, consequently, the residence time of the curd in the cheese vat, during which fermentation takes place (Fig. 2).

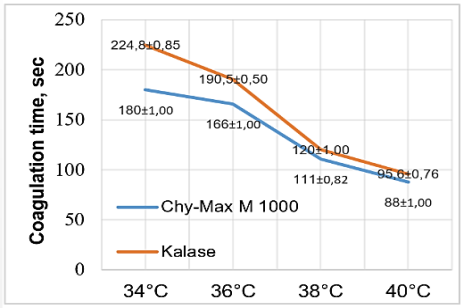


Figure 1 – Coagulation time of camel milk as a function of coagulant and temperature. Values are means ± SD; significant differences at *p* <0,05; n = 3

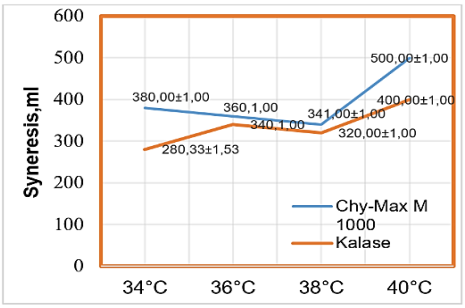


Figure 2 – Syneresis rate as a function of coagulant and temperature. Values are means ± SD; significant differences at *p* <0,05; n = 3

At all tested temperatures, Kalase exhibited a longer coagulation time compared to Chy-Max ($p < 0.05$). The difference between the two coagulants was more pronounced at lower temperatures (34-36°C). At 34°C, the coagulation time was 180 s and 224,8 for Chy-Max and Kalase, respectively, whereas at higher temperatures (38-40°C) the difference decreased to 7,6-9 s.

Temperature and coagulant type significantly influenced whey separation from the camel milk curd. On average, the use of Chy-Max resulted in higher syneresis (55,6%) compared to Kalase 45,6 % (p <0,05). In cheese produced with Chy-Max, syneresis decreased slightly between 34 and 38 °C, followed by a marked increase at 40 °C. In contrast, Kalase showed a moderate increase in syneresis with increasing temperature, while the total whey yield remained lower than that of Chy-Max under all tested conditions.

The physicochemical and textural properties of soft camel's milk cheeses produced with various coagulants are presented in Table 1.

Table 1 Physicochemical and textural properties of soft camel's milk cheeses

Parameters	Chy-Max	Kalase
Yield, g	88,13±0,30	75,00±0,50
Total solids, %	48,4±0,33	47,3±0,45
Hardness(N)	22,53±0,46	17,26±0,76
Cohesiveness*	0,34±0,006	0,37±0,009
Springiness*	0,81±0,005	0,75±0,037
Gumminess (N)	7,63±0,32	6,46±0,43
Chewiness(N)	6,19±0,30	4,85±0,54
Resilience*	0,15±0,006	0,19±0,015

Values are means ± SD; significant differences at p < *0,05; n = 3.*
**Cohesiveness, springiness, and resilience are dimensionless parameters*

According to Table 1, the cheese yield from camel's milk significantly depends on the type of coagulant used ($p < 0,05$). When the Chy-Max was used, the cheese yield was 88,13g, whereas the use of the Kalase resulted in a slightly lower yield 75,00 g. This corresponds to yield values of approximately 20,9% and 18,7% respectively.

The total solids content was also significantly higher in camel milk cheese produced using the Chy-Max (48,4%±0,33%), compared to cheese produced using Kalase (47,3%±0,05) (Fig. 3).



Figure 3 – Camel milk cheese produced with
a) microbial coagulant ChyMax and b) animal coagulant Kalase

Texture profile analysis revealed that cheese produced using Chy-Max exhibited a firmer and more structured texture, as indicated by significantly higher hardness (22,53±0,46 N) and gumminess (7,63±0,32 N) compared to Kalase (17,26±0,76 N and 6,46±0,43 N, respectively). In contrast, cheeses produced with Kalase demonstrated slightly higher cohesiveness and resilience values, suggesting a more flexible internal structure and improved ability to recover after deformation. Springiness values were higher for cheeses produced with Chy-Max, indicating greater elasticity.

Based on the peptide profiles presented in Tables 2 and 3, the majority of peptide fragments were derived from β-CN. This indicates that β-CN is more susceptible to proteolytic cleavage than αs1-CN regardless of the type of coagulant used.

Table 2 – Identified peptides in camel milk cheese with animal-derived coagulant of Kalase

Mass observed (Da)	Mr(calc)2 (Da)	Score	Sequence	Biology properties
β-CN-derived peptides				
654.8690	1307.7312	40	LPPLQPAVMVPF	(ACE)-inhibitory DPP-IV inhibitory activity
428.7641	855.5178	41	ETIIPKR	(ACE)-inhibitory activity, anti-cancer and anti-inflammatory properties
593.9983	1778.9865	24	KVLPVPQQMVPYPQR	DPP-IV inhibitory activity (IC_{50} = 41,45 M)
518.7698	1035.5349	38	QEPVPDPVR	(ACE)-inhibitory activity
718.9294	1435.8551	68	GLHPVPQPLVPVIA	antioxidant, antimicrobial and immunomodulatory properties
Alfa-casein αs1-CNderived peptides				
954.4441	1906.8836	48	YPEVFQNEPDSIEEVL	not found
508.7949	1015.5815	68	AVVSPIQFR	anti-cancer and anti-inflammatory properties

According to Tables 2 and 3, fifteen peptides with biological activity were identified in both samples. In particular, the sequences LPPLQPAVMVPF and KVLPVPQQMVPYPQR have been previously associated with angiotensin-converting enzyme (ACE) inhibitory and dipeptidyl peptidase-IV (DPP-IV) inhibitory activity, suggesting potential antihypertensive and antidiabetic properties. In addition, the peptide GLHPVPQPLVPVIA, detected in both samples, has been reported to exhibit antioxidant, antimicrobial, and immunomodulatory activity [17].

At the same time, differences in the peptide profile were observed depending on the coagulant. In cheeses produced using Kalase, peptides such as ETIIPKR and QEPVPDPVR were identified, which have been reported to potentially exhibit ACE-inhibitory activity [15]. In contrast, cheeses produced using Chy-Max contained longer peptide sequences (e.g VYSHTEPIPYPILPQNF and AMPVQAVLPFQEPVPDPVR), indicating a higher degree of proteolysis due to differences in enzymatic specificity.

Table 3 – Identified peptides in camel milk cheese with microbial coagulant of Chy-Max

Mass observed (Da)	Mr(calc)2 (Da)	Score	Sequence	Biology properties
β-CN-derived peptides				
1008.0168	2014.0200	28	VYSHTEPIPYPILPQNF	ACE-inhibitory
654.8687	1307.7312	56	LPPLQPAVMVPF	(ACE)-inhibitory activity and antidiabetic (DPP-IV inhibitor)
593.9951	1778.9865	57	KVLPVPQQMVPYPQR	DPP-IV inhibitory activity (IC_{50} = 41,45 мкМ
1045.5560	2089.1030	17	AMPVQAVLPFQEPVPD PVR	DPP-IV с IC_{50}
718.9279	1435.8551	28	GLHPVPQPLVPVIA	antioxidant, antimicrobial and immunomodulatory properties
αs1-CNderived peptides				
657.8789	1313.7595	30	ILDLAVVSPIQF	anti-cancer and anti-inflammatory properties
537.2618	1072.5189	53	SSHPYLEQL	ACE-inhibitory
515.3223	1028.6634	58	GPLPLPLPLL	DPP-IV Inhibitory

Analysis of αs1-casein-derived peptides also revealed differences between samples. The peptide AVVSPIQFR, detected in cheese with Kalase, has been characterized with anti-inflammatory and anticancer activity. In Chy-Max samples, the peptide ILDLAVVSPIQF with similar biological properties was also detected. Peptide SSHPYLEQL has been associated with angiotensin-converting enzyme (ACE) inhibitory [18], while GPLPLPLPLL has been reported as a dipeptidyl peptidase-IV (DPP-IV) inhibitory peptide [19].

Discussion

A comparative analysis of coagulants showed that the preparations are characterized by different kinetic parameters of milk coagulation, which can be used to optimize technological modes and increase the yield of cheese from camel milk. According to previous studies, differences between animal and microbial coagulants are manifested in the coagulation rate, gel formation and strength, which directly affect the technological properties of the clot [9].

In the conducted studies, the microbial enzyme Chy-Max demonstrated higher coagulation activity and shorter clotting time in camel milk. At the same time, the animal coagulant Kalase, with the correct dosage, can also ensure stable curd formation and the formation of a pronounced flavor profile of the cheese. However, the use of animal coagulants may be limited by modern requirements for production ethics and animal welfare, which increases interest in microbial alternatives [10].

The differences in cheese yield can be explained by the specificity of the enzyme, which effectively hydrolyzes k-casein and promotes the formation of a denser clot with less loss of whey [11].

Similar trends have been reported, where cheeses produced using animal rennet were characterised by a higher dry matter content [12]. Dry matter content varied between 65.2% and 68.8% depending on the type of rennet and milk pre-treatment, with microbial coagulant slightly reducing the concentration of solids due to higher proteolytic activity [13]. It has also been noted that microbial coagulants may lead to the formation of a softer curd and a moderate reduction in yield compared to animal rennets[14].

A comparison of the results shows that the use of Chy-Max promotes the formation of more structurally flexible and potentially bioactive peptide fragments compared with the Kalase, which may be due to differences in the specificity of enzymatic cleavage [16]. The amino acid composition of peptide sequences and the stage of cheese ripening are key factors influencing the biological activity of peptides [20]. It has been reported that higher levels of bioactive activity are often observed during the ripening period, particularly in cheeses produced with starter cultures [5]. A study [21] investigated six cheese types (Karish, Feta-Type, Domoiati, RAS, Gouda, and Edam) produced under different technological conditions, and reported anti-hypertensive peptides in all types of cheeses. Furthermore, the release of antioxidant peptides generated by pepsin hydrolysis of whey and casein fractions from goat's milk has been reported [22]. The antioxidant activity of cheese is influenced by the type of coagulants exhibit higher in vitro antioxidant activity compared to those obtained using animal coagulants [23].

Thus, the choice of coagulant has a complex effect on the coagulation, texture, yield, and peptide profile of camel milk cheese, requiring a comprehensive technological justification.

Conclusions

The results of the present study demonstrate that the type of coagulant significantly affects the coagulation process, physicochemical properties, texture, and peptide profile of camel milk cheese.

At all tested temperatures, animal coagulant Kalase exhibited a significantly longer coagulation time compared to microbial coagulant Chy-Max with most pronounced differences observed at lower temperature (34-36 C), where the coagulation time reached 224,8 s for Kalase and 180 s for Chy-Max at 34 C. At higher temperatures (38-40 C), this difference decreased to 7,6-9 s.

Cheese with was significantly higher in samples with Chy-Max (88,13±0,30, approximately 20,9%) compared to Kalase (75,00±0,50), approximately 18,7%. Chy-Max also resulted in higher total solids content(48,4 ± 0,33%) and a firmer texture, by hardness (22,53±0,46 N) and gumminess (7,63±0,32 N).

The use of different types of coagulants affects the peptide profile of camel milk cheese. A total of fifteen bioactive peptides were identified in both cheese samples, including sequences associated with angiotensin-converting enzyme (ACE) inhibitory and dipeptidyl peptidase-IV (DPP-IV) inhibitory activities.

References

1. Proteolytic activity of three variants of fermentation-produced chymosin on sodium caseinate and during Cheddar cheese ripening / B. Li et al // International Dairy Journal. – 2024. – Vol. 149. https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2023.105835.
2. Lucey J.A. The relation between rheological parameters and whey separation in milk gels / J.A. Lucey // Food Hydrocolloids. – 2001. – Vol. 15. – P. 603-608.
3. Walstra P. The syneresis of curd. 1. General considerations and literature review / P. Walstra, van H.J.M. Dijk, T. Geurts // Netherlands Milk and Dairy Journal. – 1985. – № 39. – P. 209-246.
4. Application of animal- and plant-derived coagulant in artisanal Italian Caciotta cheesemaking: comparison of sensory, biochemical, and rheological parameters / G. Lomolino et al // Dairy. – 2025. – Vol. 6. – Art. 43. https://doi.org/10.3390/dairy6040043.
5. The effect of starter cultures on peptide profiles identified in camel milk cheese / E. Gabrilyants et al // Quality Assurance and Safety of Crops & Foods. – 2025. – Vol. 17, № 4. – P. 217-229. https://doi.org/10.15586/qas.v17i4.1580.
6. Shuangquan H.T. Angiotensin I-converting enzyme inhibitory peptides in skim milk fermented with *Lactobacillus helveticus* 130B4 from camel milk in Inner Mongolia, China / H.T. Shuangquan, H. Tsuda, M. Taku // Journal of the Science of Food and Agriculture. – 2008. – Vol. 88. – P. 2688-2692.
7. Milk – Determination of the coagulation time and curd firmness – Instrumental method // IDF Standard 157:2007. – Brussels: International Dairy Federation, 2007.
8. AOAC Official Method 926.08 for moisture determination // AOAC International. – 1997.
9. Effects of animal rennet, fermentation-produced chymosin, and microbial coagulants on bovine milk coagulation properties / G. Stocco et al // Journal of Dairy Science. – 2025. – Vol. 108, № 5. – P. 4614-4625. https://doi.org/10.3168/jds.2024-26167.
10. The effect of coagulant type and refrigerated storage on texture and functional properties of low-moisture mozzarella cheese and pizza cheese analogues / M. Małkowska-Kowalczyk et al // International Dairy Journal. – 2024. – Vol. 155. – Art. 105989. https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2024.105989.
11. Plant milk-clotting enzymes for cheesemaking / F.D. Nicosia et al // Foods. – 2022. – Vol. 11, № 6. – Art. 871. https://doi.org/10.3390/foods11060871.
12. Derar A.M.A. Evaluation of microbiological quality of white soft cheese manufactured from camel and sheep milk / A.M.A. Derar, I.E.M. El Zubeir // Annals of Food Science and Technology. – 2013. – Vol. 14. – P. 304-311.
13. The texture of camel milk cheese: effects of milk composition, coagulants, and processing conditions / M. Mbaye et al // Frontiers in Nutrition. – 2022. – Vol. 9. – Art. 868320. https://doi.org/10.3389/fnut.2022.868320.

14. Awad S. The impact of microbial transglutaminase on the quality and antioxidant activity of camel milk soft cheese / S. Awad, N.H.I. Abou-Soliman, M.I. El-Sayed // Food and Nutrition Sciences. – 2020. – Vol. 11. – P. 153-165. https://doi.org/10.4236/fns.2020.113012.
15. Camel whey protein hydrolysates induced G2/M cell cycle arrest in human colorectal carcinoma / C. Murali et al // Scientific Reports. – 2021. – Vol. 11. – Art. 7062. https://doi.org/10.1038/s41598-021-86391-z.
16. Uğur E. Effects of coagulants on peptide profiles and ACE-inhibitory activity in ultrafiltered white (Beyaz) cheese / E. Uğur, Z. Öner // Journal of Food Composition and Analysis. – 2023. https://doi.org/10.1016/j.jfca.2023.105622.
17. Identification of ACE-inhibitory peptides in different Spanish cheeses by tandem mass spectrometry / J.Á. Gómez-Ruiz et al // European Food Research and Technology. – 2006. – Vol. 223. – P. 595-601. https://doi.org/10.1007/s00217-005-0238-0.
18. Mullally M.M. Synthetic peptides corresponding to alpha-lactalbumin and beta-lactoglobulin sequences with angiotensin-I-converting enzyme inhibitory activity / M.M. Mullally, H. Meisel, R.J. FitzGerald // Biol. Chem. Hoppe-Seyler. – 1996. – Vol. 377, № 4. – P. 259-260. https://doi.org/10.1515/bchm3.1996.377.4.259.
19. Nongonierma A.B. The scientific evidence for the role of milk protein-derived bioactive peptides in humans: a review / A.B. Nongonierma, R.J. FitzGerald // Journal of Functional Foods. – 2015. – Vol. 17. – P. 640-656. https://doi.org/10.1016/j.jff.2015.06.021
20. Functional role of bioactive peptides with special reference to cheeses / S. Rafiq et al // International Journal of Dairy Technology. – 2021. https://doi.org/10.1111/1471-0307.12732.
21. Helal A. Peptidomics profile, bioactive peptides identification and biological activities of six different cheese varieties / A. Helal, D. Tagliazucchi // Biology. – 2023. – Vol. 12. – Art. 78. https://doi.org/10.3390/biology12010078.
22. Identification of potent antioxidant bioactive peptides from goat milk proteins / A.S. Ahmed et al // Food Research International. – 2015. – Vol. 74. – P. 80-88.
23. Antioxidant peptides (<3 kDa) identified in hard cow milk cheese with rennet from different origin / M.L. Timón et al // Food Research International. – 2019. – Vol. 120. – P. 643-649. – DOI: 10.1016/j.foodres.2018.11.019.

Funding: *The authors extend their appreciation to the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan for funding this work through the research project №: AP25794145 «Development of camel milk soft cheese technology using lactic acid micro-organisms with desired properties».*

Э.А. Габрильянц*, Р.С. Алибеков, А.А. Утебаева
М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті,
160012, Қазақстан Республикасы, Шымкент қаласы, Тәуке хан даңғылы 5
*e-mail: gabrilyants@mail.ru

ТҮЙЕ СҮТІНЕН ІРІМШІК ӨНДІРУ КЕЗІНДЕ СҮТТІ ҰЙЫТАТЫН ФЕРМЕНТТЕРДІ САЛЫСТЫРМАЛЫ ТАЛДАУ

Түйелер (Camelus dromedarius) экстремалды климаттық жағдайларға өте төзімді, азық-түлік қауіпсіздігін және Қазақстандағы жайылымдық шаруашылықтардың тұрақтылығын қамтамасыз етуде маңызды рөл атқарады. Ферменттік коагуляция ірімшік жасаудағы маңызды кезең болып табылады, өнімнің құрылымын, өнімділігін және сапалық сипаттамаларын анықтайды. Коагуляцияның тиімділігі және протеолиздің қарқындылығы коагулянттың табиғатына және оның сүтті ұйыту және протеолитикалық белсенділігіне байланысты, бұл әсіресе түйе сүтін өзінің ерекше ақуыз құрамымен өңдеу кезінде маңызды.

Бұл зерттеудің мақсаты микробтық және жануарлардан алынатын ферменттерді пайдаланып өндірілген түйе сүтінен жасалған ірімшіктерді салыстыру болды. Құрғақ заттардың мөлшері, өнімділігі, құрылымдық сипаттамалары және ірімшіктің пептидтік профилінің қалыптасуына коагулянт түрінің әсері бағаланды. Нәтижелер әртүрлі температуралық жағдайларда Kalase ферментінің ұзағырақ коагуляция уақытын көрсеткенін, 34°C температурада 224,8 секундтан 95,6 секундқа дейін өзгергенін көрсетеді. 40 градуста, Chy-Max ферментімен салыстырғанда 34°C температурада 180 с-тан 40°C температурада 88 с-қа дейін, ал жоғары температурада (38-40°C)

айырмашылық 7,6-9 с-қа дейін азайды. Синерез Chy-Max ферментін қолданған кезде сүзбе орта есеппен 55,6% сарысу бөлетінін көрсетті, ал Kalase ферментін қолданатын ірімшік үлгілерінде синерезис деңгейі 45,6% төмен болды. Chy-Max ферментін қолданатын ірімшік өнімділігі 20,9%, ал жануар текті мәйектен жасалған Kalase ферментімен 18,7% болды. Chy-Max және Kalase қолданатын ірімшік үлгілеріндегі құрғақ зат сәйкесінше 48,4% ± 0,05 және 47,3% ± 0,05 көрсетті. Ірімшіктердің текстуралық көрсеткіштері микробтық ферментпен тығызырақ құрылымды көрсетті. Екі ірімшік үлгісінде де биологиялық белсенді пептидтер анықталды, олар гипертонияға қарсы, антиоксидантты, микробқа қарсы және иммуномодуляциялық қасиеттерге байланысты.

Түйін сөздер: *түйе сүті, ірімшік, ұю, микробтық фермент, жануарлардан алынатын фермент, пептидтік композиция.*

Э.А. Габрильянц*, Р.С. Алибеков, А.А. Утебаева
Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова,
160012, Республика Казахстан, г. Шымкент, проспект Тауке-хана 5
*e-mail: gabrilyants@mail.ru

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОЛОКОСВЕРТЫВАЮЩИХ ФЕРМЕНТОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ СЫРА ИЗ ВЕРБЛЮЖЬЕГО МОЛОКА

Верблюды (Camelus dromedarius), обладающие высокой устойчивостью к экстремальным климатическим условиям, играют важную роль в обеспечении продовольственной безопасности и устойчивости пастбищных хозяйств Казахстана. Ферментативное свертывание является ключевым этапом сыроделия, определяющим структуру, выход и качественные характеристики продукта. Эффективность коагуляции и интенсивность протеолиза зависят от природы коагулянта, его молокосвертывающей и протеолитической активности, что особенно важно при переработке верблюжьего молока с его специфическим белковым составом.

Целью настоящего исследования явился сравнительный анализ сыров из верблюжьего молока, полученных с использованием ферментов микробного и животного происхождения. Оценены показатели сухих веществ, выход, текстурные характеристики, а также влияние типа коагулянта на формирование пептидного профиля сыра. Полученные результаты демонстрируют, что при различных температурных режимах фермент Kalase демонстрировал более длительное время свертывания от 224,8 с. при 34 °C до 95,6 с. при 40, по сравнению с ферментом Chy-Max с 180 с при 34 °C до 88 с при 40 °C.,тогда как при более высоких температурах (38-40°C) разница сократилась до 7,6-9 с. Синерезис показал, что при применении фермента Chy-Max сгусток выделял в среднем 55,6% сыворотки, в то время как образцы сыра, с использованием фермента Kalase, показали более низкий уровень синерезиса 45,6%. Выход сыра с использованием фермента Chy-Max составил 20,9%, в то время как с использованием сычужного фермента животного происхождения Kalase составил 18,7%. Сухие вещества в образцах сыра с использованием Chy-Max и Kalase показали 48,4%±0,05 и 47,3%±0,05 соответственно. Текстурные показатели сыров показали более плотную текстуру с использованием микробиального фермента. Также были идентифицированны биологически активные пептиды у обоих образцов сыра, которые относятся к антигипертензивным, антиоксидантным, антимикробным и иммуномодулирующимм свойствам.

Ключевые слова: *верблюжье молоко, сыр, свертывание, микробный фермент, фермент животного происхождения, пептидная композиция.*

Information about the authors

Eleonora Artyunovna Gabrilyants* – doctoral student, M. Auezov South Kazakhstan university, Textile and Food Engineering higher school, Shymkent, Kazakhstan; e-mail: gabrilyants@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5568-5674.

Ravshanbek Sultanbekovish Alibekov – candidate of chemical science, professor, M. Auezov South Kazakhstan university, Textile and Food Engineering higher school. Shymkent, Kazakhstan; e-mail: ralibekov@hotmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0723-3101.

Aidana Askarovna Utebayeva – PhD, M. Auezov South Kazakhstan university, Textile and Food Engineering higher school, Shymkent, Kazakhstan; e-mail: aidana.utebaeva@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3792-4656.

Авторлар туралы мәліметтер

Элеонора Артюновна Габрильянц* – докторант, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Тоқыма және тамақ инженериясы жоғары мектебі, Шымкент, Қазақстан, e-mail: gabrilyants@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5568-5674.

Равшанбек Султанбекович Алибеков – химия ғылымдарының кандидаты, профессор, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Тоқыма және тамақ инженериясы жоғары мектебі, Шымкент, Қазақстан, e-mail: ralibekov@hotmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0723-3101.

Айдана Аскаровна Утебаева – PhD, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Тоқыма және тамақ инженериясы жоғары мектебі, Шымкент, Қазақстан; email: aidana.utebaeva@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3792-4656.

Сведения об авторах

Элеонора Арутюновна Габрильянц – докторант, Южно-Казахстанский университет им. М.Ауэзова, Высшая школа Текстильной и пищевой инженерии, Шымкент, Казахстан; e-mail: gabrilyants@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5568-5674.

Равшанбек Султанбекович Алибеков – кандидат химических наук, профессор, ЮжноКазахстанский университет им. М.Ауэзова, Высшая школа Текстильной и пищевой инженерии, Шымкент, Казахстан; e-mail: ralibekov@hotmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0723-3101.

Айдана Аскаровна Утебаева – PhD Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова, Высшая школа Текстильной и пищевой инженерии, Шымкент, Казахстан; e-mail: aidana.utebaeva@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3792-4656.

Received 30.03.2026
Revised 30.04.2026
Accepted 04.05.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-38

МРНТИ: 68.37.29

К.А. Абышева[1]*, Ә.Н. Махамбетов[2], Б. Дулат[2], З.К. Даирбекова[2], Ш.А. Абжанова[1]
[1]Алматинский технологический университет,
050061, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Фурката, 348/4
[2]Институт биологии и биотехнологии растений,
050040, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Тимирязева, 45
*e-mail: kami021102@gmail.com

ИНТЕГРИРОВАННАЯ СИСТЕМА ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА, ЦИФРОВОЙ ПАСПОРТИЗАЦИИ И ПОДГОТОВКИ ОБРАЗЦОВ *HALYOMORPHA HALYS STÅL* В ЮЖНОМ КАЗАХСТАНЕ

Аннотация: *В статье предложена и апробирована интегрированная схема раннего выявления, цифровой паспортизации и подготовки образцов Halyomorpha halys Stål к последующей молекулярно-генетической верификации в условиях юга Казахстана. Целью исследования являлась разработка воспроизводимой системы, объединяющей полевой мониторинг, GPS-привязку очагов, стандартизированный учет образцов и формирование коллекции, пригодной для последующего анализа по маркерам COI и ITS1. Полевую апробацию системы выполнили в Ботаническом саду г. Алматы с использованием феромонных ловушек и ловчих поясов на яблоне и груше. В ходе наблюдений было зарегистрировано 215 особей на разных стадиях развития. Наибольшая численность выявлена в центральной части обследованной территории; максимальные показатели зафиксированы в точках D1 и D2. Установлено, что феромонные ловушки более эффективно выявляют имаго, тогда как ловчие пояса повышают обнаруживаемость нимфальных стадий. Предложен унифицированный цифровой паспорт образца, обеспечивающий трассируемость данных от момента отбора до этапа лабораторной обработки и пространственного анализа. Разработанная система может служить основой для дальнейших диссертационных исследований по молекулярной структуре инвазивных популяций H. halys и региональных программ фитосанитарного мониторинга.*

Ключевые слова: *Halyomorpha halys; молекулярно-генетическая идентификация; COI; ITS1; геоинформационный мониторинг; феромонные ловушки; цифровой паспорт образца; Южный Казахстан.*

©К.А. Абышева, Ә.Н. Махамбетов, Б. Дулат, З.К. Даирбекова, Ш.А. Абжанова, 2026

Введение

Мраморный клоп *Halyomorpha halys* относится к числу наиболее опасных инвазивных полифагов, быстро распространяющихся за пределами естественного ареала и причиняющих значительный ущерб плодовым, овощным и декоративным культурам [1]. Для юга Казахстана проблема особенно актуальна в связи с сочетанием благоприятных климатических условий, развитого садоводства и высокой транспортной связанности региона.

В мировой литературе *H. halys* рассматривается как инвазивный вид глобального значения, сочетающий высокую экологическую пластичность, широкий круг растений-хозяев и выраженный экономический ущерб в агроценозах [2].

Для практики фитосанитарного контроля недостаточно только фиксировать факт обнаружения вредителя. На ранних стадиях инвазии критическое значение имеет воспроизводимая техническая схема, которая обеспечивает сопоставимость полевых наблюдений, корректную географическую привязку, трассируемость каждого экземпляра и возможность последующей молекулярной верификации. Без такой схемы данные мониторинга трудно использовать для популяционного анализа, оценки путей расселения и построения региональных карт риска.

В Казахстане *H. halys* был зарегистрирован сравнительно недавно, а материалы по его распространению в Алматинском регионе указывают на формирование устойчивой популяции и постепенное расширение ареала [3, 4]. Вместе с тем для дальнейших исследований по теме диссертации требуется перенос акцента от описательного учета вредителя к разработке технологически выверенного контура отбора, маркировки, хранения и аналитического сопровождения образцов.

Цель настоящей работы – разработать и апробировать интегрированную систему молекулярно-генетической идентификации и геоинформационного мониторинга *H. halys* в южном Казахстане, пригодную для последующего использования в диссертационных исследованиях по анализу маркеров COI и ITS1.

Материалы и методы

Полевую апробацию интегрированной системы выполнили на территории Ботанического сада г. Алматы. Мониторинг проводили на участках с яблоней и грушей как на наиболее репрезентативных кормовых растениях для локальной популяции вредителя. Схема отбора включала регулярное обследование заранее размеченных точек наблюдения в период с конца мая по середину июня 2025 года.

Мониторинг *Halyomorpha halys* проводили с использованием феромонных ловушек и ловчих поясов в насаждениях юга Казахстана (рис. 1). Координаты точек отбора фиксировали с помощью GPS для последующей цифровой паспортизации образцов. Феромонные ловушки применяли преимущественно для выявления имаго, тогда как ловчие пояса позволяли фиксировать нимфальные стадии и локальные участки концентрации вредителя. Собранные образцы маркировали, фотографировали и заносили в электронную базу данных с указанием даты, координат, культуры и стадии развития насекомого. Подготовка образцов включала их консервацию и паспортизацию для последующей молекулярно-генетической верификации по маркерам COI и ITS1 [5].



Рисунок 1 – Феромонная ловушка, использованная для мониторинга *Halyomorpha halys*

Ловушки устанавливали на плодовых деревьях (яблоня, груша) на высоте 1,5-2,0 м от поверхности почвы, что обеспечивало сопоставимость данных между точками наблюдения и

соответствовало подходам, используемым в международных системах мониторинга *H. halys* [6]. При установке ловушку закрепляли на устойчивом участке кроны, после чего проверяли надежность фиксации, сохранность приманки и свободный доступ насекомых к улавливающему элементу. Осмотр феромонных ловушек проводили с интервалом 7 дней. При каждом учете фиксировали код точки, растение-хозяин, дату наблюдения, количество зарегистрированных имаго и общее состояние ловушки.

Дополнительно использовали ловчие пояса из гофрированного картона как вспомогательный метод выявления насекомых, перемещающихся по штамбу (рис. 2). Ловчие пояса фиксировали на высоте 1,0-1,5 м, осмотр проводили один раз в 7 дней. При учете регистрировали наличие нимф, имаго и яйцекладок [7]. Осмотр поясов также проводили один раз в 7 дней. При учете фиксировали наличие нимф, имаго, а при обнаружении яйцекладок на прилегающих участках растения соответствующая информация заносилась в полевой журнал данной точки.



Рисунок 2 – Ловчий пояс из гофрированного картона, использованный для выявления *Halyomorpha halys*

Сопоставление двух методов было предусмотрено дизайном исследования. Феромонные ловушки использовали преимущественно для выявления активной и расселяющейся части популяции, тогда как ловчие пояса обеспечивали дополнительную регистрацию особей, локализованных на кормовых растениях. Такой подход позволил оценить информативность каждого метода для различных стадий развития вредителя в условиях Ботанического сада г. Алматы [8].

Геоинформационный модуль включал GPS-привязку всех точек мониторинга с последующим формированием пространственной базы данных и картографированием очагов заселения.

Важным элементом системы являлась цифровая паспортизация образцов. Для каждого экземпляра или партии формировали уникальный идентификатор, объединяющий полевые данные, географическую привязку и информацию о дальнейшем лабораторном сопровождении. Паспорт содержал сведения о стадии развития, растении-хозяине, способе отбора, дате и месте сбора, а также отметку о пригодности материала для последующей молекулярной верификации (рис. 3).



Рисунок 3 – Логическая схема интегрированной системы мониторинга и молекулярно-генетической идентификации

В рамках исследования была разработана система отбора, маркировки и подготовки образцов *H. halys* для последующей молекулярно-генетической верификации. Подготовленный материал может быть использован для дальнейшего анализа по митохондриальному маркеру COI и ядерному региону ITS1, применяемым для подтверждения видовой принадлежности и оценки генетического разнообразия инвазивных популяций [9, 10].

Дополнительную ценность для последующего анализа представляют данные о распространении и вариабельности COI-гаплотипов *H. halys* в инвазивном ареале Евразии, включая Казахстан, что позволяет использовать молекулярные маркеры не только для идентификации, но и для реконструкции возможных путей расселения популяций [11]

Для оценки работоспособности системы анализировали суммарную численность зарегистрированных особей, распределение по точкам наблюдения и диагностическую полезность разных средств мониторинга на разных стадиях развития *H. halys*.

Результаты исследований и их обсуждение

Апробация разработанной системы в условиях Ботанического сада г. Алматы показала ее работоспособность на стадии раннего выявления и пространственной локализации очагов *H. halys*. Всего за период наблюдений было зарегистрировано 215 особей на разных стадиях развития. Наличие имаго, нимф и яйцекладок указывает на закрепление вредителя в пределах исследованной территории и подтверждает практическую необходимость постоянного мониторинга.

Наибольшая численность вредителя была зафиксирована в точках D1 и D2, расположенных на яблоне и груше. Это свидетельствует о формировании локального очага высокой плотности и согласуется с представлениями о предпочтении *H. halys* плодовых древесных растений как основных кормовых объектов [12]. Центральная часть обследованной территории характеризовалась более устойчивым накоплением имаго, что делает ее приоритетной зоной для последующего отбора материала на молекулярный анализ.

Феромонные ловушки обеспечивали более стабильное выявление имаго и лучше отражали участки с повышенной численностью вредителя, тогда как ловчие пояса были более информативны при обнаружении особей, локально удерживающихся на штамбах деревьев, прежде всего нимфальных стадий. Таким образом, интеграция нескольких методов наблюдения позволила получить более полное представление о структуре локальной популяции *H. halys*, чем использование одного средства учета.

По данным полевых регистраций, наиболее высокие показатели были получены в точках D1 и D2, где фиксировалась наибольшая численность вредителя. Это указывает на наличие локального очага повышенной плотности и обосновывает приоритетный отбор материала именно в этих точках.

Для феромонных ловушек диапазон зарегистрированных значений составил от 18 до 33 особей на точку, а для ловчих поясов – от 12 до 20 особей на точку. При этом максимальные показатели были получены именно при использовании феромонных ловушек в точках D1 и D2, что подтверждает их высокую диагностическую ценность для выявления очагов с повышенной плотностью имаго. В то же время ловчие пояса имели особую практическую значимость как дополнительный метод учета нимфальных стадий, которые могут быть представлены в феромонных уловах менее полно.

Результаты настоящего исследования согласуются с мировыми данными о том, что мониторинг *H. halys* наиболее эффективен при комбинированном использовании нескольких взаимодополняющих инструментов наблюдения. В ряде зарубежных работ показано, что феромонные ловушки являются основой системы раннего обнаружения и пространственного контроля популяции, однако их диагностическая ценность существенно возрастает при сочетании с дополнительными методами полевого учета, адаптированными к сезону, типу насаждений и биологии вредителя [13]. Наши данные подтверждают применимость этой логики для условий юга Казахстана. В условиях Ботанического сада г. Алматы гибридная система слежения позволила одновременно фиксировать активную фракцию популяции через феромонный канал и локально удерживающиеся стадии через контактно-укрывной канал, что повысило полноту мониторинга и улучшило отбор материала для дальнейшего молекулярно-генетического анализа.

С практической точки зрения использование гибридной схемы имеет несколько преимуществ. Во-первых, она снижает риск недоучета популяции, который возникает при использовании только одного метода. Во-вторых, она позволяет более точно интерпретировать пространственное распределение вредителя, поскольку зоны высокой активности имаго и зоны локального присутствия нимф могут не полностью совпадать. В-

третьих, комбинированный учет более удобен для последующего отбора репрезентативных образцов на лабораторные этапы исследования. Следовательно, в условиях начального или развивающегося очага инвазии интеграция нескольких методов мониторинга является более обоснованной стратегией, чем опора только на феромонные ловушки или только на ловчие пояса.

Анализ данных, представленных в таблице 1, показал, что феромонные ловушки обеспечивали более стабильное выявление имаго *H. halys*, тогда как ловчие пояса были более информативны при регистрации нимфальных стадий. Следовательно, комбинированное использование методов позволило получить более полное представление о структуре локальной популяции вредителя по сравнению с применением только одного способа учета.

Таблица 1 – Результаты мониторинга *Halyomorpha halys* с использованием феромонных ловушек и ловчих поясов

Точка мониторинга	Растение-хозяин	Метод выявления	Количество особей	Стадия развития	Дата сбора
A1	Яблоня	Ловчий пояс	15	нимфы/имаго	28.05.2025
A2	Груша	Ловчий пояс	12	нимфы/имаго	28.05.2025
B1	Яблоня	Феромонная ловушка	22	имаго	04.06.2025
B2	Груша	Феромонная ловушка	18	имаго	04.06.2025
C1	Яблоня	Феромонная ловушка	25	имаго	11.06.2025
C2	Груша	Ловчий пояс	20	нимфы/имаго	11.06.2025
D1	Яблоня	Феромонная ловушка	30	имаго	18.06.2025
D2	Груша	Феромонная ловушка	33	имаго	18.06.2025

Существенным результатом работы является не только регистрация вредителя, но и формализация маршрута каждого образца. Это особенно важно для дальнейших этапов диссертационного исследования, поскольку сбор, маркировка и хранение материала должны быть строго увязаны с точкой происхождения и полевыми метаданными. Предложенный цифровой паспорт образца обеспечивает такую прослеживаемость и переводит полевые наблюдения в единую систему учета.

Практическая ценность разработанной схемы заключается в объединении биологического, пространственного и аналитического уровней данных. Биологический уровень отражает стадию развития и численность вредителя, пространственный – координаты и распределение очагов, а аналитический – готовность материала к последующей молекулярной верификации. Такой подход особенно важен при изучении инвазивных популяций, поскольку позволяет не только подтвердить присутствие вида, но и оценить особенности его распространения [14].

Таким образом, предложенная система представляет собой не описание отдельного энтомологического объекта, а технологически выстроенную схему мониторинга, паспортизации и подготовки данных для последующего молекулярно-генетического анализа (табл. 2).

Таблица 2 – Рекомендуемая структура цифрового паспорта образца для молекулярно-генетического мониторинга

Параметр	Назначение
ID образца	Уникальный код, обеспечивающий связь между полевыми и лабораторными данными
Дата и время отбора	Хронологическая привязка образца
Координаты GPS	Пространственная локализация точки сбора
Растение-хозяин	Учет трофической связи и микробиотопа
Стадия развития	Разделение имаго, нимф и яйцекладок
Метод отбора	Сопоставление чувствительности феромонных ловушек и ловчих поясов
Условия хранения	Контроль пригодности биоматериала для выделения ДНК
Статус лабораторной обработки	Отметка о подготовке материала для последующей молекулярно-генетической верификации

Наиболее высокие показатели регистрации были получены в точках D1 и D2, что указывает на наличие локального очага повышенной плотности и обосновывает приоритетный отбор материала именно в этих точках.

Заключение

В ходе проведённого исследования была разработана и апробирована интегрированная система раннего выявления, геопространственной фиксации и цифровой паспортизации *Halyomorpha halys* в условиях юга Казахстана. Полевой этап показал наличие устойчивого локального очага вредителя в пределах Ботанического сада г. Алматы, а комбинированное применение феромонных ловушек и ловчих поясов позволило повысить полноту выявления различных стадий развития.

Созданная система цифровой паспортизации обеспечивает стандартизированное формирование коллекции образцов для последующей молекулярно-генетической верификации. Полученные результаты могут быть использованы при организации регионального фитосанитарного мониторинга инвазивных видов и в дальнейших исследованиях с применением маркеров COI и ITS1.

Список литературы

1. Leskey T.C. Impact of the invasive brown marmorated stink bug in North America and Europe: History, biology, ecology, and management / T.C. Leskey, A.L. Nielsen // Annual Review of Entomology. – 2018. – Vol. 63. P. 599-618. https://doi.org/10.1146/ annurev-ento-020117-043226.
2. Esenbekova P.A. First record of Halyomorpha halys (Stål, 1855) (Heteroptera, Pentatomidae) from Kazakhstan / P.A. Esenbekova // Euroasian Entomological Journal. – 2017. – Vol. 16, № 1. – P. 23-24. https://doi.org/10.15298/euroasentj.16.1.05.
3. Biology, ecology, and management of brown marmorated stink bug (*Hemiptera: Pentatomidae*) / K.B. Rice et al // Journal of Integrated Pest Management. – 2014. – Vol. 5, № 3. https://doi.org/10.1603/IPM14002.
4. Temreshev I.I. New records of a dangerous invasive pest – brown marmorated stink bug Halyomorpha halys Stål, 1855 (Heteroptera, Pentatomidae) in Kazakhstan / I.I. Temreshev, P.A. Esenbekova, A.M. Uspanov // Acta Biologica Sibirica. – 2018. – Vol. 4, № 3. – P. 94-101. https://doi.org/10.14258/abs.v4i3.4413.
5. Improved trap designs and retention mechanisms for Halyomorpha halys (Hemiptera: Pentatomidae) / K.B. Rice et al // Journal of Economic Entomology. – 2018. – Vol. 111, № 5. – P. 2136-2142. https://doi.org/10.1093/jee/toy185.
6. Halyomorpha halys (Hemiptera: Pentatomidae) responses to traps baited with pheromones in peach and apple orchards / C. Akotsen-Mensah et al // Journal of Economic Entomology. – 2018. – Vol. 111, № 5. – P. 2153-2162. https://doi.org/10.1093/jee/toy200.
7. Characterizing spring emergence of adult Halyomorpha halys using experimental overwintering shelters and commercial pheromone traps / J.C. Bergh et al // Entomologia Experimentalis et Applicata. – 2017. – Vol. 162. – P. 336-345. https://doi.org/10.1111/eea.12539.
8. Monitoring of the invasive Halyomorpha halys, a new key pest of fruit orchards in northern Italy / L. Maistrello et al // Journal of Pest Science. – 2017. – Vol. 90, № 4. – P. 1231-1244. https://doi.org/10.1007/s10340-023-01638-0.
9. Monitoring and biosurveillance tools for the brown marmorated stink bug, Halyomorpha halys (Stål) (Hemiptera: Pentatomidae) / A.L. Acebes-Doria et al // Insects. – 2018. – Vol. 9, № 3, Article 82. https://doi.org/10.3390/insects9030082.
10. Halyomorpha halys (Hemiptera: Pentatomidae) genetic diversity in North America and Europe / D.E. Kapantaidaki et al // Insects. – 2019. – Vol. 10, № 6, Article 174. https://doi.org/10.3390/insects10060174.
11. Real-time PCR assay for the identification of the brown marmorated stink bug (Halyomorpha halys) / M.K. Dhami et al // Frontiers in Molecular Biosciences. – 2016. – Vol. 3, Article 5. https://doi.org/10.3389/fmolb.2016.00005.
12. Seasonal abundance and trap comparisons of the invasive brown marmorated stink bug Halyomorpha halys (Hemiptera: Pentatomidae) adults from its native region / M.T. Kamiyama et al // Biologia. – 2024. – Vol. 79. – P. 1341-1349. https://doi.org/10.1007/s11756-024-01618-4.

13. Diversity and distribution of cytochrome oxidase I (COI) haplotypes of the brown marmorated stink bug, *Halyomorpha halys* Stål (Hemiptera, Pentatomidae), along the eastern front of its invasive range in Eurasia / T.D. Gariepy et al // NeoBiota. – 2021. – Vol. 68. – P. 53-77. https://doi.org/10.3897/neobiota.68.68915.
14. Review of the biology, ecology, and management of Halyomorpha halys in China, Japan, and Korea / D.-H. Lee et al // Environmental Entomology. – 2013. – Vol. 42, № 4. – P. 627-641. https://doi.org/10.1603/EN13006.

Финансирование

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства сельского хозяйства Республики Казахстан, грант № BR22887230 «Создание эффективной системы управления численностью популяций карантинных вредных организмов, ограничено распространенных на территории Республики Казахстан».

К.А. Абышева[1]*, Ә.Н. Махамбетов[2], Б. Дулат[2], З.К. Даирбекова[2], Ш.А. Абжанова[1]
[1]Алматы технологиялық университеті,
050061, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Фуркат к-сі, 348/4
[2]Қазақстан Республикасының Ғылым және жоғары білім министрлігі
Ғылым комитетінің Өсімдіктер биологиясы және биотехнологиясы институты
050040 Қазақстан Республикасы, Алматы, Тимирязев к-сі, 45
*e-mail: kami021102@gmail.com

ОҢТҮСТІК ҚАЗАҚСТАНДАҒЫ HALYOMORPHA HALYS STÅL ҮЛГІЛЕРІН ГЕОАҚПАРАТТЫҚ МОНИТОРИНГТЕУ, ЦИФРЛЫҚ ПАСПОРТТАУ ЖӘНЕ ДАЙЫНДАУДЫҢ ИНТЕГРАЦИЯЛАНҒАН ЖҮЙЕСІ

Мақалада Оңтүстік Қазақстан жағдайында Halyomorpha halys Stål үлгілерін ерте анықтауға, цифрлық паспорттауға және молекулалық-генетикалық верификацияға дайындауға арналған интеграцияланған техникалық схема ұсынылып, сынақтан өткізілді. Зерттеудің мақсаты ошақтарды GPS-байланыстыруды, үлгілерді стандартталған есепке алуды және COI мен ITS1 маркерлері бойынша кейінгі талдауға жарамды коллекция қалыптастыруды біріктіретін қайталанымды жүйені әзірлеу болды. Жүйені далалық сынақтан өткізу Алматы қаласының Ботаникалық бағында алма мен алмұрт ағаштарында феромондық тұзақтар мен аулағыш белдеулерді пайдалану арқылы жүргізілді. Бақылау барысында дамудың әртүрлі сатыларындағы 215 дара тіркелді. Ең жоғары саны зерттелген аумақтың орталық бөлігінде анықталды; ең жоғары көрсеткіштер D1 және D2 нүктелерінде тіркелді (тиісінше 30 және 33 дара). Феромондық тұзақтардың ересек имаголарды неғұрлым толық анықтауды қамтамасыз ететіні, ал аулағыш белдеулердің нимфалық сатылардың анықталуын арттыратыны белгіленді. Үлгінің біріздендірілген цифрлық паспорты ұсынылды, ол іріктеп алу сәтінен бастап зертханалық өңдеу және кеңістіктік талдау кезеңіне дейінгі деректердің қадағалануын қамтамасыз етеді. Әзірленген жүйе H. halys инвазиялық популяцияларының молекулалық құрылымы бойынша диссертациялық зерттеулердің бірінші кезеңі және өңірлік фитосанитарлық мониторинг бағдарламаларының негізі бола алады.

Түйін сөздер: *Halyomorpha halys; молекулалық-генетикалық сәйкестендіру; COI; ITS1; геоақпараттық мониторинг; феромондық тұзақтар; үлгінің цифрлық паспорты; Оңтүстік Қазақстан.*

A. Abysheva[*], A.N. Makhambetov[2], B. Dulat[2], Z.K. Dairbekova[2], S.A. Abzhanova [1]
[1]Almaty Technological University,
050061, Republic of Kazakhstan, Almaty, Furkat str., 348/4
[2]Institute of Biology and Biotechnology of Plants, Committee of Science,
Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan,
050040, Republic of Kazakhstan, Almaty, Timiryazev str., 45
*e-mail: kami021102@gmail.com

INTEGRATED SYSTEM OF GEOINFORMATION MONITORING, DIGITAL PASSPORTIZATION, AND SAMPLE PREPARATION OF HALYOMORPHA HALYS STÅL IN SOUTHERN KAZAKHSTAN

The article proposes and tests an integrated technical scheme for the early detection, digital passportization, and preparation of Halyomorpha halys Stål samples for molecular-genetic verification under the conditions of southern Kazakhstan. The aim of the study was to develop a reproducible system combining

field monitoring, GPS referencing of foci, standardized recording of samples, and the formation of a collection suitable for subsequent analysis using the COI and ITS1 markers. Field testing of the system was carried out in the Botanical Garden of Almaty using pheromone traps and trap belts on apple and pear trees. During the observations, 215 individuals at different developmental stages were recorded. The highest abundance was detected in the central part of the surveyed territory; the maximum values were recorded at points D1 and D2 (30 and 33 individuals, respectively). It was established that pheromone traps provide more complete detection of adult imagoes, whereas trap belts increase the detectability of nymphal stages. A unified digital passport of the sample was proposed, ensuring the traceability of data from the moment of collection to the stage of laboratory processing and spatial analysis. The developed system can serve as the first stage of dissertation research on the molecular structure of invasive populations of H. halys and as a basis for regional phytosanitary monitoring programs.

Key words *Halyomorpha halys; molecular-genetic identification; COI; ITS1; geoinformation monitoring; pheromone traps; digital passport of the sample; southern Kazakhstan.*

Сведения об авторах

Камила Абышева* – магистрант 2 курса кафедры пищевой биотехнологии Алматинского технологического университета, Алматы, Казахстан; e-mail: kami021102@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-5567-6820.

Әлібек Махамбетов – лаборант лаборатории молекулярной биологии РГП на ПХВ «Институт биологии и биотехнологии растений» КН МНВО РК, Алматы, Казахстан. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-8076-8624.

Бақыт Дулат – лаборант лаборатории молекулярной биологии РГП на ПХВ «Институт биологии и биотехнологии растений» КН МНВО РК, Алматы, Казахстан. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-7000-6887.

Зарина Даирбекова – лаборант лаборатории молекулярной биологии РГП на ПХВ «Институт биологии и биотехнологии растений» КН МНВО РК, Алматы, Казахстан. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-1327-084X.

Шолпан Абжанова – кандидат технических наук, ассоциированный профессор кафедры «Пищевая биотехнология» Алматинского Технологического Университета, Алматы, Казахстан. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3209-6855.

Авторлар туралы мәліметтер

Камила Абышева* – Алматы Технологиялық Университетінің «Тағамдық биотехнология» кафедрасының 2-курс магистранты, Алматы, Қазақстан; e-mail: kami021102@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-5567-6820.

Әлібек Махамбетов – ҚР ҒЖБМ «Өсімдіктер биологиясы және биотехнологиясы институты» РМК-ның Молекулалық биология зертханасының лаборанты, Алматы, Қазақстан. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-8076-8624.

Бақыт Дулат – ҚР ҒЖБМ «Өсімдіктер биологиясы және биотехнологиясы институты» РМК-ның Молекулалық биология зертханасының лаборанты, Алматы, Қазақстан. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-7000-6887.

Зарина Даирбекова – ҚР ҒЖБМ «Өсімдіктер биологиясы және биотехнологиясы институты» РМК-ның Молекулалық биология зертханасының лаборанты, Алматы, Қазақстан. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-1327-084X.

Шолпан Абжанова – Алматы Технологиялық Университетінің «Тағамдық биотехнология» кафедрасының техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, Алматы, Қазақстан. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3209-6855.

Information about the authors

Kamila Abysheva* – 2nd-year Master's student of the Department of Food Biotechnology, Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-5567-6820.

Alibek Makhambetov – technician at the Laboratory of Molecular Biology, RSE on REM «Institute of Plant Biology and Biotechnology» CS MSHE RK, Almaty, Kazakhstan. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-8076-8624.

Bakyt Dulat – technician at the Laboratory of Molecular Biology, RSE on REM «Institute of Plant Biology and Biotechnology» CS MSHE RK, Almaty, Kazakhstan. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-7000-6887.

Zarina Dairbekova – technician at the Laboratory of Molecular Biology, RSE on REM «Institute of Plant Biology and Biotechnology» CS MSHE RK, Almaty, Kazakhstan. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-1327-084X.

Sholpan Abzhanova – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Food Biotechnology, Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3209-6855.

Поступила в редакцию 30.03.2026
Поступила после доработки 12.05.2026
Принята к публикации 13.05.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-39

МРНТИ: 34.31.25

К.О. Богданова*, Г.Т. Доланбаева[1], В.Н. Николаева[2], С.К. Кабдрахманова[1], А.К. Кабдрахманова[3,4]

[1]Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева
050013, Республика Казахстан, г. Алматы, ул.Каныша Сатпаева, 22
[2]Восточно-Казахстанский университет им. Сарсена Аманжолова
070002, Республика Казахстан, г.Усть-Каменогорск, ул.30-й Гвардейской дивизии, 34
[3]ТОО «Научный центр композиционных материалов»,
050000, Республика Казахстан, г.Алматы, Алмалинский район, ул.Нурмакова, д. 79,
[4]ТОО «Научно-исследовательский институт «TrueScience»,
050054, Республика Казахстан, г.Алматы, Туркисибский район, ул.Тукая, 33
*e-mail: bogdanova.xeniya@mail.ru

РАЗРАБОТКА И ОЦЕНКА МНОГОСЛОЙНОЙ ПОЛИМЕРНОЙ ОБОЛОЧКИ НА ОСНОВЕ МЕТИЛЦЕЛЛЮЛОЗЫ ДЛЯ КОНТРОЛИРУЕМОЙ ДОСТАВКИ ФУЗИКОКЦИНА НА СЕМЕНАХ СОИ

Аннотация: *Эффективность применения фитогормонов в значительной степени ограничивается их стремительной деградацией, неравномерным распределением на поверхности семян и отсутствием контроля за высвобождением в процессе прорастания. В данной работе разработана и исследована многослойная полимерная оболочка на основе метилцеллюлозы с использованием минерального наполнителя (тальк) и полисахаридного наполнителя (картофельный крахмал) для контролируемой доставки фитогормона фузикокцина (FC) на семенной материал сои. Изучены физико-химические характеристики покрытий, равномерность нанесения, кинетика деградации и высвобождение активного вещества при различных температурно-влажностных условиях. Установлено, что композиции на основе метилцеллюлозы и талька обладают более высокой механической стабильностью, меньшей склонностью к набуханию и более продолжительным временем деградации по сравнению с крахмальными системами. Высвобождение FC подчиняется кинетике первого порядка с константой скорости 0,025 ч⁻¹ и периодом полувыведения 27,8 ч. Полученные результаты подтверждают перспективность применения разработаных метилцеллюлозно-тальковых оболочек для пролонгированной и контролируемой доставки фитогормонов в технологиях предпосевной обработки семян. В дальнейшем данные будут использованы при исследованиях в области изучения полимерных покрытий в условиях прорастания семян.*

Ключевые слова: *метилцеллюлоза, фузикокцин, оболочка семян, контролируемое высвобождение, тальк, соя.*

Введение

Повышение эффективности предпосевной обработки семян является одной из ключевых задач современного растениеводства, поскольку ранние этапы онтогенеза растений в значительной степени определяют продуктивность агроценозов и устойчивость культур к абиотическим стрессам [1, 2]. Адресная доставка биологически активных веществ к семенному материалу рассматривается как перспективный инструмент управления физиологическими процессами прорастания, обеспечивающий повышение энергии

©К.О. Богданова, Г.Т. Доланбаева, В.Н. Николаева, С.К.Кабдрахманова, А.К. Кабдрахманова, 2026

прорастания, выравненность всходов и улучшение начального роста растений [3]. Вместе с тем традиционные методы нанесения фитогормонов и регуляторов роста характеризуются рядом существенных ограничений, включая быстрое вымывание действующих веществ, их неравномерное распределение по поверхности семян и отсутствие контроля над скоростью и направленностью их поступления в ткани [4, 5].

Фузикокцин (FC) относится к классу высокоактивных фитогормонов, проявляющих выраженное физиологическое действие в ультранизких концентрациях за счёт активации H^+ – АТФазы плазматической мембраны и усиления клеточного растяжения [6, 7]. Благодаря этому FC рассматривается как перспективный регулятор роста на ранних стадиях развития растений. Однако высокая биологическая активность данного соединения обуславливает узкое «терапевтическое окно» его применения: незначительное превышение оптимальной дозы или неконтролируемое высвобождение может приводить к ингибирующим эффектам и проявлениям фитотоксичности [7]. Это существенно ограничивает практическое использование FC в традиционных препаративных формах и подчёркивает необходимость разработки систем его контролируемой доставки.

В последние годы значительный интерес вызывают полимерные оболочки на основе биосовместимых и биоразлагаемых материалов, способные выполнять функцию носителей биологически активных соединений и обеспечивать пролонгированное и дозированное высвобождение действующих веществ [8, 10, 11]. Среди таких материалов особое место занимает метилцеллюлоза — неионное производное целлюлозы, широко применяемое в фармацевтических, биомедицинских и агробиотехнологических системах благодаря способности формировать однородные полупроницаемые плёнки [8, 10, 11].

Метилцеллюлоза позволяет направленно изменять свойства оболочки за счёт введения наполнителей. Минеральные наполнители влияют на морфологию, пористость, устойчивость матрицы и скорость высвобождения фитогормонов [8, 10, 11]. При этом их влияние по сравнению с полисахаридными наполнителями изучено недостаточно. Выбор метилцеллюлозы обусловлен её биосовместимостью, неионной природой и способностью формировать полупроницаемые плёнки. Использование талька в качестве минерального наполнителя позволяет дополнительно регулировать морфологию и пористость покрытия без изменения химической природы полимерной системы. Химическая инертность и низкая гидрофильность талька способствуют повышению механической стабильности оболочки и замедлению её деградации, что делает комбинацию «метилцеллюлоза-тальк» рациональной основой для систем контролируемого высвобождения высокоактивных фитогормонов [10, 11].

Целью настоящей работы являлась разработка многослойной полимерной оболочки на основе метилцеллюлозы для семян сои и комплексная оценка влияния минерального и полисахаридного наполнителей на стабильность покрытия, кинетику деградации и параметры контролируемого высвобождения FC.

Материалы и методы

Для формирования полимерной оболочки использовали метилцеллюлозу $[C_6H_7O_2(OH)_{3-x}(OCH_3)_x]_n$ как плёнкообразующий и связывающий компонент. Выбор этого полимера обусловлен его способностью образовывать вязкие растворы, обеспечивать равномерное распределение состава по поверхности семян и повышать прочность покрытия. В качестве наполнителей применяли крахмал $(C_6H_{10}O_5)n$ и тальк $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$, которые использовали для изменения структуры оболочки и её технологических свойств. Подобные полимерные композиции применяются в технологиях покрытия семян для улучшения адгезии, снижения пыления и более равномерного нанесения активных веществ на поверхность семени.

Рабочий раствор FC готовили в водно-спиртовой системе [6], что обеспечивало равномерное распределение вещества при сверхмалых концентрациях. Навеску FC массой 0,05 мг предварительно растворяли в 1 мл 96% этанола, после чего объём доводили дистиллированной водой до 1 л. Полученный раствор с концентрацией 50 нг/мл использовали сразу после приготовления либо хранили при температуре +4 °C не более 72 часов. Подготовку и замачивание семян проводили в соответствии с методами предпосевной гормональной обработки [3]. После обработки семена подсушивали и помещали во вращающийся барабан, где поэтапно наносили 1% раствор полимерной основы. Для изменения структуры покрытия применяли наполнители, которые используются в

полимерных матрицах контролируемого высвобождения [8, 10, 11]. Качество нанесения оболочки оценивали по приросту массы семян. При этом учитывали, что допустимое увеличение массы не должно превышать 10%, поскольку именно такой предел соответствует агротехническим требованиям и не ухудшает посевные качества семенного материала [4, 5].

Стабильность и деградацию полимерных покрытий изучали при различных температуре и влажности, которые используются при анализе систем пролонгированного высвобождения [11, 12]. В качестве интегрального показателя устойчивости определяли время сохранности 50% оболочки (t_{50}), что позволяло сопоставить долговечность различных вариантов покрытия между собой.

Остаточное содержание FC определяли спектрофотометрическим методом при длине волны 254 нм с использованием калибровочного графика и холостых проб [6]. Для анализа профилей высвобождения применяли классические кинетические модели, включая кинетику первого порядка, модель Хигучи и модель Корсмейера-Пеппаса. Параметры моделей рассчитывали методом наименьших квадратов, а выбор наиболее подходящей модели проводили по коэффициенту детерминации (R^2), характеру остатков и физической интерпретируемости полученных параметров. При необходимости анализ выполняли отдельно для раннего и позднего этапов высвобождения, что позволяло точнее описывать двухстадийный характер процесса.

Все эксперименты выполняли не менее чем в трёх биологических повторах, а измерения массы и деградации оболочки — в трёх технических повторах для каждого варианта. Полученные данные представляли в виде среднего значения ± стандартное отклонение (SD). Для сравнения групп использовали однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) с пост-хок тестом Тьюки при уровне значимости $p<0,05$. Обработку данных и аппроксимацию кинетических кривых проводили в программе OriginPro 2022.

Результаты и обсуждение

Результаты визуальной и весовой оценки показали, что тип и дозировка наполнителя оказывают определяющее влияние на морфологию и качество формируемого полимерного покрытия. Концептуальная схема разработанной многослойной полимерной оболочки для контролируемой доставки FC на семенах сои представлена на рисунке 1.

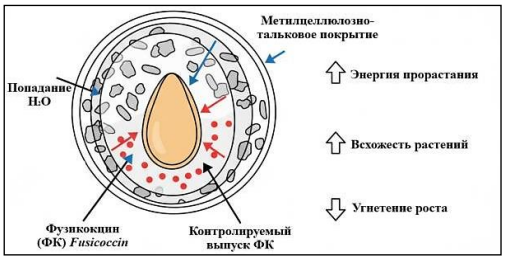
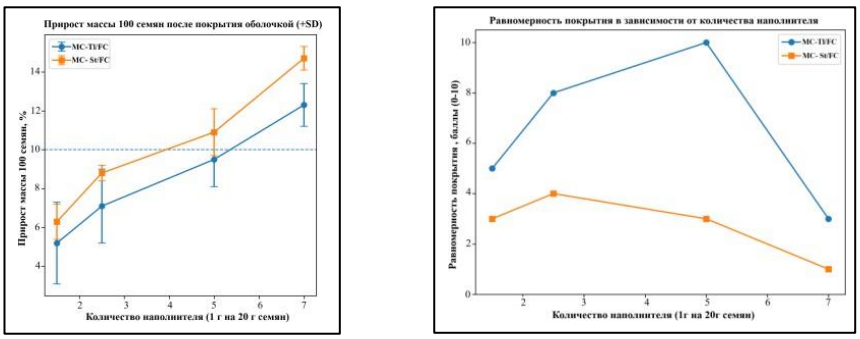


Рисунок 1 – Схематическое изображение многослойной полимерной оболочки на основе метилцеллюлозы с минеральным наполнителем (тальк), предназначенной для контролируемой доставки FC на семенах сои и её влияния на ранние этапы прорастания

Наиболее равномерное и тонкое покрытие было получено при использовании талька. Как показано на рисунке 2a, прирост массы семян существенно зависел от вида и количества наполнителя. На рисунке 2b показан анализ равномерности покрытия семян сои при разных наполнтелях. Применение талька в дозировке 2,5 г на 20 г семян обеспечивало умеренный прирост массы (7,1 ± 1,9%), не превышающий агротехнический предел 10%, и одновременно сопровождалось высоким показателем равномерности покрытия (8 баллов), что указывает на формирование наиболее технологически приемлемой оболочки.

При увеличении дозировки талька до 5,0 г на 20 г семян наблюдалось формирование более плотного покрытия с максимальной визуальной равномерностью, однако дальнейшее увеличение количества минерального наполнителя приводило к утолщению оболочки и появлению локальных дефектов, включая микротрещины и снижение эластичности. Это указывает на существование оптимального диапазона концентраций талька, при котором достигается баланс между механической прочностью и пластичностью полимерной матрицы, что согласуется с данными о поведении минеральных наполнителей в полимерных системах [5].

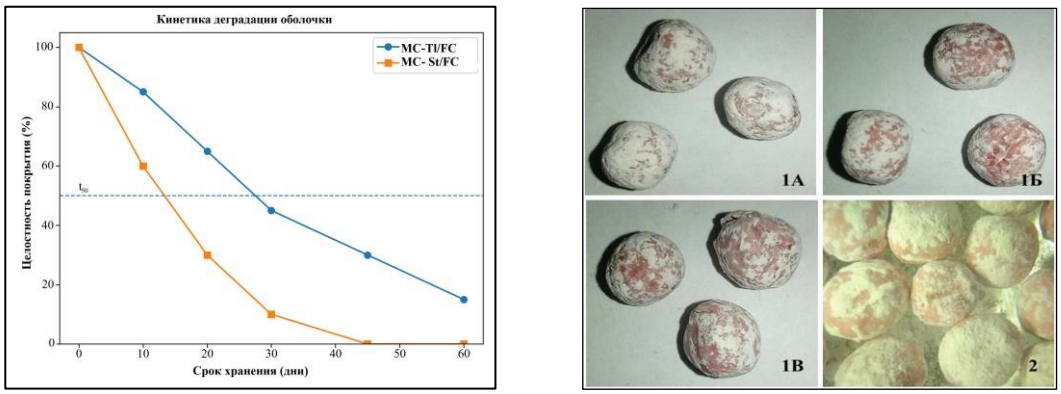


a b

Рисунок 2 – Влияние вида и количества наполнителя на качество покрытия семян сои
a – прирост массы 100 семян после нанесения оболочки (пунктирной линией обозначен агротехнический предел 10%); b – показатель равномерности покрытия (шкала 0-10 баллов)

Образцы оболочек с использованием картофельного крахмала демонстрировали иные морфологические характеристики. Уже при умеренных дозировках наполнитель придавал покрытию повышенную пористость и менее выраженную равномерность. При увеличении количества крахмала наблюдалась склонность оболочки к рыхлению и частичному отслаиванию, сопровождавшаяся ростом массы семян. Данные эффекты обусловлены высокой гидрофильностью полисахаридного наполнителя и его способностью интенсивно поглощать влагу, что приводит к набуханию и снижению механической устойчивости покрытия [8].

Сравнительный анализ показал, что тальк как химически инертный и слабогидрофильный минеральный наполнитель способствует формированию более плотной и стабильной полимерной матрицы, ограничивает избыточное водопоглощение и обеспечивает контролируемую пористость оболочки. В отличие от него, картофельный крахмал повышает водоудерживающую способность покрытия, что может способствовать локальному увлажнению семян, однако при превышении оптимальной дозировки ухудшает адгезию и снижает эксплуатационные свойства оболочки [8, 10, 11]. Изучение кинетики деградации показало, что скорость разрушения покрытия зависит как от условий хранения, так и от природы наполнителя. Как видно на рисунке 3а, оболочки с тальком характеризовались более медленной и предсказуемой потерей целостности, тогда как системы с картофельным крахмалом демонстрировали ускоренную деструкцию и достигали t_{50} в более ранние сроки, что видно в сравнении покрытия на рисунке 3b.



a b

Рисунок 3 – Деградация полимерных оболочек на основе метилцеллюлозы в процессе хранения и оптические микрофотографии семян сои, покрытых метилцеллюлозными композициями с различными наполнителями
a – кинетика деградации оболочек MC–Tl/FC и MC–St/FC; пунктирной линией показано время, соответствующее потере 50% целостности оболочки (t_{50});
b — внешний вид семян сои с покрытиями: 1А–1В — варианты с тальком (MC–Tl/FC), 2 — вариант с картофельным крахмалом (MC–St/FC)

Уже на ранних стадиях хранения крахмальные оболочки демонстрировали интенсивное набухание, рыхление структуры и появление множественных трещин, что сопровождалось ускоренным отслаиванием покрытия от поверхности семян (табл. 1). При температуре 30°C и относительной влажности 70% время сохранности 50% покрытия (t_{50}) для варианта с тальком составляло около 25 суток, тогда как для оболочек с картофельным крахмалом данный показатель не превышал 12 суток. В отличие от этого, тальковый наполнитель способствовал формированию более плотной и тонкой оболочки, деградация которой происходила постепенно и носила локальный характер.

Таблица 1 – Обобщённые характеристики полимерных оболочек, деградации и биологической эффективности

Вид наполнителя	Количество (г на 20 г семян)	Равномерность покрытия (0-10 баллов)	Прирост массы 100 семян, % (±SD)	Стабильность оболочки (t_{50}, сут)	Характер высвобождения
Тальк	1,5	5	5,2 ± 2,1	~25	Контролируемое
Тальк	2,5	8	7,1 ± 1,9	~25	Первый порядок
Тальк	5,0	10	9,5 ± 1,4	~25	Первый порядок
Тальк	7,0	3	12,3 ± 1,1	~25	Замедленная диффузия
Крахмал	1,5	3	6,3 ± 0,9	~12	Ускоренное
Крахмал	2,5	4	8,8 ± 0,4	~12	Ускоренное
Крахмал	5,0	3	10,9 ± 1,2	~12	Быстрое
Крахмал	7,0	1	14,7 ± 0,6	~12	Неконтролируемое

При повышенной температуре и влажности (t 35°C, RH 80%) различия между системами усиливались. Крахмальная оболочка подвергалась практически полной деструкции в течение 30 суток, тогда как оболочка на основе метилцеллюлозы и талька сохраняла остаточные фрагменты покрытия вплоть до 60 суток. Наблюдаемая разница обусловлена высокой гидрофильностью полисахаридного наполнителя, приводящей к интенсивному водопоглощению и ускоренной эрозии полимерной матрицы, тогда как химически инертный тальк ограничивает доступ влаги и снижает скорость набухания покрытия [8, 5].

При более мягких условиях хранения (t 22°C, RH 40%) обе системы демонстрировали повышенную стабильность: оболочки сохраняли целостность в течение первых 30 суток, а деградация носила медленный характер и проявлялась преимущественно в виде постепенного истончения слоя. Тем не менее даже в этих условиях оболочки с тальком отличались более высокой сохранностью по сравнению с крахмальными аналогами, что подтверждает стабилизирующую роль минерального наполнителя в полимерной матрице [12].

Высвобождение FC из полимерной оболочки оценивали по остаточному содержанию фитогормона на поверхности семян и в составе оболочки в течение 48 часов после обработки. Полученные данные показали постепенное снижение его концентрации в полимерной матрице, что указывает на контролируемое высвобождение и/или поглощение семенами. Как показано на рисунке 4, высвобождение FC из метилцеллюлозно-тальковой оболочки наиболее точно описывалось моделью первого порядка с константой скорости 0,025 $ч^{-1}$ и периодом полувыведения 27,8 часа.

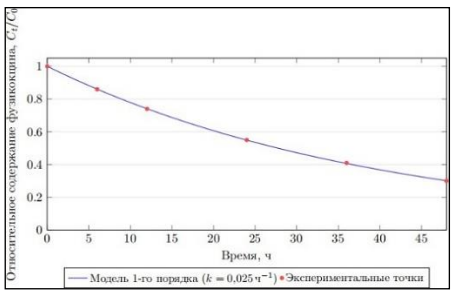


Рисунок 4 – Кинетика контролируемого высвобождения FC из метилцеллюлозной оболочки с тальком. Экспериментальные данные аппроксимированы моделью кинетики первого порядка

Качественные различия, обусловленные наполнителем, подтверждаются обобщёнными характеристиками (табл. 1). Для тальк-содержащих покрытий при 2,5-5,0 г на 20 г семян высвобождение классифицировано как «первый порядок», что согласуется с полученной для системы «метилцеллюлоза–тальк» кинетикой и высокой стабильностью оболочки (t_{50}≈ 25 сут). При увеличении доли талька до 7,0 г наблюдается ухудшение равномерности и рост прироста массы выше агротехнического порога, а характер высвобождения смещается в сторону «замедленной диффузии», что может объясняться уплотнением матрицы и усилением барьерного эффекта.

Для крахмалосодержащих вариантов (t_{50} ≈ 12 сут) характер высвобождения описан как «ускоренный/быстрый» вплоть до «неконтролируемого» при 7,0 г. Это коррелирует с высокой гидрофильностью крахмала и его склонностью к набуханию: в таких системах диффузионный перенос накладывается на релаксацию и частичную эрозию матрицы, что приводит к ускорению выхода действующего вещества. На рисунке 4 показана кинетика контролированного высвобождения FC из оболочки, где наполнитель выступает ключевым регулятором механизма транспорта: тальк повышает структурную целостность и замедляет перенос за счёт увеличения пластичности и уменьшения эффективной пористости, тогда как крахмал усиливает водопоглощение и структурную перестройку покрытия, ускоряя высвобождение. Это объясняет, почему система «метилцеллюлоза–тальк» наиболее пригодна для пролонгированной доставки FC в критический ранний период прорастания семян.

Наибольшее снижение содержания FC в оболочке наблюдалось в первые 24 часа после обработки семян, тогда как в интервале 24-48 часов скорость высвобождения заметно снижалась. Это указывает на переход процесса в диффузионно-ограниченный режим, характерный для гидрофильных полимерных матриц [11, 12]. Для количественного описания кинетики использовали модель первого порядка, которая показала высокую степень соответствия экспериментальным данным: зависимость $\ln(C_t)$ от времени характеризовалась коэффициентом аппроксимации R^2>0,99. Рассчитанная константа скорости высвобождения составила 0,025 $ч^{-1}$, а период полувыведения — 27,8 часа. Полученные значения свидетельствуют о медленном и контролируемом высвобождении FC из метилцеллюлозно-тальковой матрицы, что обеспечивает пролонгированное действие фитогормона в течение первых двух суток после обработки семян. Сопоставление кинетики высвобождения с результатами деградационных испытаний (рис. 5) показало, что разрушение полимерной оболочки и диффузия действующего вещества являются взаимосвязанными процессами. Более высокая стабильность тальковой оболочки обеспечивала более равномерное поступление FC и снижала риск его неконтролируемого действия. При этом концентрация 50 нг/мл оказалась оптимальной для стимуляции прорастания семян сои и начального роста проростков: она повышала энергию прорастания и общую всхожесть без признаков фитотоксичности, тогда как более высокие концентрации вызывали частичное угнетение прорастания семян [6, 7].

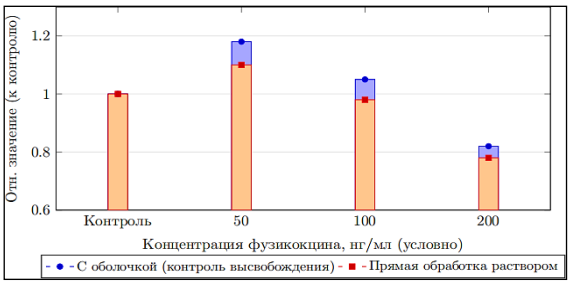


Рисунок 5 – Влияние концентрации FC и способа его внесения на показатели прорастания семян сои. Данные представлены в виде относительных значений, нормированных по отношению к необработанному контролю

Повышение концентрации FC приводило к частичному угнетению роста и снижению положительного физиологического эффекта, что указывает на узкий диапазон эффективных доз данного фитогормона [7]. Это подчёркивает важность точного дозирования и контроля

скорости поступления действующего вещества в ткани семян. Применение полимерной оболочки на основе метилцеллюлозы с минеральным наполнителем обеспечивало более равномерное и пролонгированное высвобождение FC, способствуя поддержанию его концентрации в физиологически оптимальном диапазоне на ранних стадиях прорастания. В отличие от прямой обработки раствором, такая система доставки снижает риск локальной передозировки и связанных с ней фитотоксических эффектов [11, 12]. Кинетические параметры высвобождения согласуются с временными рамками физиологической активации семян, а результаты биологических испытаний подтверждают, что сочетание концентрации 50 нг/мл и метилцеллюлозно-тальковой оболочки обеспечивает выраженный стимулирующий эффект без негативного воздействия на семенной материал.

С практической точки зрения оболочка должна быть не только эффективной, но и экологически нейтральной на этапах хранения семян, посева и последующей трансформации в почве. Метилцеллюлоза относится к биоразлагаемым производным целлюлозы и обычно разлагается почвенными микроорганизмами до низкомолекулярных продуктов, не образуя стойких загрязнителей, тогда как тальк является химически инертным магнийсиликатом и выполняет главным образом функцию минерального наполнителя, влияя преимущественно на физические свойства поверхности и водный режим в микрозоне семени. При разработке технологии важно учитывать возможную миграцию остаточного этанола из покрытия при хранении и его влияние на всхожесть, потенциальную сорбцию FC на минеральной фазе и изменение его биодоступности, а также воздействие на нецелевые организмы при превышении доз или систематическом применении. С технологической точки зрения ключевыми параметрами масштабирования остаются вязкость раствора метилцеллюлозы, скорость вращения барабана и режим сушки, поскольку именно они определяют толщину и дефектность слоёв. При этом прирост массы семян должен оставаться ниже агротехнического предела 10%, так как избыточное утяжеление и закупорка микропиле могут снижать газообмен и замедлять набухание семени.

Выводы

В настоящей работе разработана и экспериментально обоснована многослойная полимерная оболочка на основе метилцеллюлозы для контролируемой доставки фитогормона FC на семенной материал сои. Показано, что природа используемого наполнителя оказывает решающее влияние на морфологию покрытия, его механическую устойчивость, кинетику деградации и параметры высвобождения действующего вещества.

Установлено, что применение минерального наполнителя (талька) в дозировке 2,5 г на 20 г семян обеспечивает формирование равномерного, тонкого и устойчивого покрытия с допустимым приростом массы семян (7,1 ± 1,9%), соответствующим агротехническим требованиям. В сравнении с полисахаридным наполнителем (картофельный крахмал) тальковая оболочка характеризуется меньшей склонностью к набуханию, более высокой механической стабильностью и замедленной деградацией при повышенных температурно-влажностных условиях.

Показано, что деградация полимерной оболочки и высвобождение FC являются взаимосвязанными процессами. Оболочка на основе метилцеллюлозы и талька обеспечивает контролируемое высвобождение фитогормона, которое адекватно описывается моделью первого порядка с константой скорости $k = 0{,}025$ ч$^{-1}$ и периодом полувыведения 27,8 часа. Такая кинетика позволяет поддерживать концентрацию FC в физиологически оптимальном диапазоне в течение первых двое суток после обработки семян, что особенно важно с учётом его высокой биологической активности.

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности использования метилцеллюлозно-тальковых оболочек в технологиях предпосевной обработки семян для пролонгированной и дозированной доставки фитогормонов. Предложенный подход может быть адаптирован для других биологически активных соединений и сельскохозяйственных культур, что открывает возможности для дальнейшего развития экологически безопасных и ресурсосберегающих агротехнологий.

Список литературы

1. Seeds: Physiology of Development / J.D. Bewley et al // Germination and Dormancy. 3rd ed. – New York: Springer, 2013. – 392 p.

2. Finch-Savage W.E. Seed vigour and crop establishment: extending performance beyond adaptation / W.E. Finch-Savage, G.W. Bassel // Journal of Experimental Botany. – 2016. – Vol. 67, № 3. – P. 567-591. https://doi.org/10.1093/jxb/erv490.
3. Growth stimulating and fungicidal properties of succinic acid complexes with silver, copper and boron ions during pre-sowing treatment of soybean seeds / S.K. Kabdrakhmanova et al // Engineered Science. – 2023. – Vol. 26. – Art. 973. https://doi.org/10.30919/es973.
4. Kapsulirovanie semyan maslichnykh kul'tur kak bezopasnaya sistema primeneniya sredstv zashchity rastenii / A.K. Kabdrakhmanova i dr. // Vestnik NYATs RK. – 2023. – № 3. – S. 111-120. https://doi.org/10.52676/1729-7885-2023-3-111-120. (In Rrssian).
5. Seed coating technology: an innovative and sustainable approach for improving seed quality and crop performance / T. Javed et al // Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences. – 2022. – Vol. 21, № 8. – P. 536-545. https://doi.org/10.1016/j.jssas.2022.03.003.
6. Marrè E. Fusicoccin: a tool in plant physiology / E. Marrè // Annual Review of Plant Physiology. – 1979. – Vol. 30. – P. 273-288. https://doi.org/10.1146/annurev.pp.30.060179.001421.
7. Phytohormones and Plant Growth Regulators — A Review / C.E. Agudelo-Morales et al // Journal of Science with Technological Applications. – 2021. – Vol. 10. – P. 27-65. https://doi.org/10.34294/j.jsta.21.10.66.
8. Oxidized starch/CMC based biofilm: synthesis and characterization / K. Akatan et al // Physical Sciences and Technology. — 2024. — Vol. 11, № 1-2. — P. 58-63. https://doi.org/10.26577/phst2024v11i1a7.
9. Synthesis of Cellulose Based Hydrogel With High Absorption Capacity / K. Akatan et al // International Journal of Biology and Chemistry. – 2025. – Vol. 18, № 1. — P. 150-158. https://doi.org/10.26577/IJBCh202518115.
10. Synthesis and Application of Biodegradable Cellulose Hydrogels From Sunflower Husks as a Water-Retaining Material in Agriculture / A. Battalova et al // Journal of Polymer Science. — 2025. — Vol. 63, № 24. — P. 5402-5413. https://doi.org/10.1002/pol.20240486.
11. Cellulose based materials for controlled release formulations of agrochemicals: a review of modifications and applications / L. Pang et al // Journal of Controlled Release. – 2019. – Vol. 316. – P. 187-199. https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2019.11.004.
12. Mechanisms of solute release from porous hydrophilic polymers / R.W. Korsmeyer et al // International Journal of Pharmaceutics. – 1983. – Vol. 15, № 1. – P. 25-35. https://doi.org/10.1016/0378-5173(83)90064-9.

Финансирование

Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № BR24993105).

К.О. Богданова[1*], Г.Т. Доланбаева[1], В.Н. Николаева[2], С.К. Қабдрахманова[1], А.К. Қабдрахманова[3,4]
[1]Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті,
050013, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Қаныш Сәтбаев көш., 22
[2]Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті
070002, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ., 30-шы Гвардиялық дивизия көш., 34
[3]«Ғылыми композиттік материалдар орталығы» ЖШС,
050000, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Алмалы ауданы, Нұрмақов көш., 79
[4]«TrueScience» ғылыми-зерттеу институты ЖШС,
050054, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Түрксіб ауданы, Тұқай көш., 33
*e-mail: bogdanova.xeniya@mail.ru

СОЯ ТҰҚЫМДАРЫНДА ФУЗИКОКЦИНДІ БАҚЫЛАНАТЫН ЖЕТКІЗУ ҮШІН МЕТИЛЦЕЛЛЮЛОЗА НЕГІЗІНДЕГІ КӨПҚАБАТТЫ ПОЛИМЕРЛІ ҚАБЫҚШАНЫ ӘЗІРЛЕУ ЖӘНЕ БАҒАЛАУ

Фитогормондарды қолданудың тиімділігі едәуір дәрежеде олардың жылдам ыдырауымен, тұқым бетіне біркелкі таралмауымен және өну процесі кезінде босап шығуын бақылаудың болмауымен шектеледі. Осы жұмыста соя тұқымдарына фузикокцин (FC) фитогормонын бақыланатын түрде жеткізу үшін минералды толтырғыш (тальк) және полисахаридті толтырғыш (картоп крахмалы) қолданылған метилцеллюлоза негізіндегі көпқабатты полимерлі қабықша әзірленіп, зерттелді. Қаптамалардың физика-химиялық сипаттамалары, жағылу біркелкілігі,

деградация кинетикасы және әртүрлі температуралық-ылғалдылық жағдайларында белсенді заттың босап шығуы зерттелді. Метилцеллюлоза мен тальк негізіндегі композициялардың крахмал негізіндегі жүйелермен салыстырғанда механикалық тұрақтылығы жоғары, ісінуге бейімділігі төмен және деградация уақыты ұзақ екені анықталды. FC босап шығуы 0,025 сағ⁻¹ жылдамдық константасымен және 27,8 сағаттық жартылай ыдырау кезеңімен бірінші ретті кинетикаға бағынатыны көрсетілді. Алынған нәтижелер тұқымды себу алдындағы өңдеу технологияларында фитогормондарды ұзақ мерзімді және бақыланатын жеткізу үшін әзірленген метилцеллюлоза-тальк қабықшаларын қолданудың перспективалы екенін растайды. Болашақта бұл деректер тұқымның өну жағдайындағы полимерлі жабындарды зерттеу саласында пайдаланылатын болады.

Түйін сөздер: *метилцеллюлоза, фузикокцин, тұқым қабықшасы, бақыланатын босап шығу, тальк, соя*

X.O. Bogdanova[1*], G.T. Dolanbayeva[1], V.N. Nikolayeva[2], S.K. Kabdrakhmanova[1], A.K. Kabdrakhmanova[3,4]

[1]K.I.Satpayev Kazakh National Research Technical University,
050013, Republic of Kazakhstan, Almaty, 22 Kanysh Satpayev str.
[2]Sarsen Amanzholov Higher Kazakhstan University,
070002, Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk, 30th Guards Division, 34
[3]LLP «Scientific Center of Composite Materials»,
050000, Republic of Kazakhstan, Almaty, 79 Nurmakova St.
[4]LLP «Scientific Research Institute «TrueScience»
050054, Republic of Kazakhstan, Almaty, 33 Tukaya St., Turksib District
*e-mail: bogdanova.xeniya@mail.ru

DEVELOPMENT AND EVALUATION OF A MULTILAYER METHYLCELLULOSE-BASED POLYMER COATING FOR CONTROLLED DELIVERY OF FUSICOCCIN ON SOYBEAN SEEDS

The effectiveness of phytohormone application is largely limited by their rapid degradation, uneven distribution on the seed surface, and the lack of control over their release during germination. In this study, a multilayer polymer coating based on methylcellulose was developed and investigated for the controlled delivery of the phytohormone fusicoccin (FC) to soybean seeds using a mineral filler (talc) and a polysaccharide filler (potato starch). The physicochemical properties of the coatings, application uniformity, degradation kinetics, and release of the active compound under different temperature and humidity conditions were evaluated. The methylcellulose-talc compositions exhibited higher mechanical stability, lower swelling tendency, and longer degradation time compared with starch-based systems. The release of FC followed first-order kinetics, with a rate constant of 0.025 h⁻¹ and a half-life of 27.8 h. The obtained results confirm the potential of the developed methylcellulose-talc coatings for the prolonged and controlled delivery of phytohormones in seed pre-sowing treatment technologies. In the future, these findings may be used in further studies of polymer coatings under seed germination conditions.

Key words: *methylcellulose, fusicoccin, seed coating, controlled release, talc, soybean.*

Сведения об авторах

Ксения Олеговна Богданова* – докторант, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, научный сотрудник лаборатории биологии и биотехнологии растений национальной научной лаборатории коллективного пользования, Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан; e-mail: bogdanova.xeniya@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9318-6155.

Гүлсайын Тойкенқызы Доланбаева — докторант, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, научный сотрудник лаборатории биологии и биотехнологии растений национальной научной лаборатории коллективного пользования, Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан; e-mail: saia_26@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000- 0002-0049-1511.

Валентина Николаевна Николаева — научный сотрудник лаборатории биологии и биотехнологии растений национальной научной лаборатории коллективного пользования, Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан; e-mail: valentina_nn23@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001- 8887-7111.

Сана Канатбековна Кабдрахманова — руководитель Международного Research & Development (R&D) центра передовых функциональных материалов и их композитов кафедры химических процессов и промышленной экологии Казахского национального исследовательского технического университета имени К. Сатпаева, г. Алматы, Республика Казахстан; e-mail: skabdrakhmanova@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5760-2967.

Айнур Канатовна Кабдрахманова – заведующая испытательной лабораторией по контролю качества биологических образцов и объектов окружающей среды Международного Research & Development (R&D) центра кафедры химических процессов и промышленной экологии Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, г. Алматы, Республика Казахстан; e-mail: kabdrahmanovaajnur4@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4425-303x.

Авторлар туралы мәліметтер

Ксения Олеговна Богданова – докторанты, Қ.И. Сәтпаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті, ұжымдық пайдаланудағы ұлттық ғылыми зертхананың өсімдіктер биологиясы және биотехнологиясы зертханасының ғылыми қызметкері, Шығыс Қазақстан университеті Сарсен Аманжолов, Өскемен қаласы, Қазақстан Республикасы; e-mail: bogdanova.xeniya@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9318-6155.

Гүлсайын Тойкенқызы Доланбаева – Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті, Биоэкологиялық инженерия – Қоршаған ортаны қорғау технологиясы, докторанты, ұжымдық пайдаланудағы ұлттық ғылыми зертхананың өсімдіктер биологиясы және биотехнологиясы зертханасының ғылыми қызметкері, Шығыс Қазақстан университеті Сарсен Аманжолов, Өскемен қаласы, Қазақстан Республикасы; e-mail: saia_26@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000- 0002-0049-1511.

Валентина Николаевна Николаева – Қазақстан Республикасы, Өскемен қаласы, Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, ұжымдық пайдалану ұлттық ғылыми зертханасының өсімдіктер биологиясы және биотехнологиясы зертханасының ғылыми қызметкері; e-mail: valentina_nn23@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8887-7111.

Сана Канатбековна Кабдрахманова – Қ. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, химиялық процестер және өнеркәсіптік экология кафедрасы Озық функционалды материалдар мен олардың композиттері Research & Development халықаралық орталығының жетекшісі, Алматы қаласы, Қазақстан Республикасы; e-mail: skabdrakhmanova@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5760-2967.

Айнур Канатовна Кабдрахманова – Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Химиялық процестер және өнеркәсіптік экология кафедрасының Халықаралық Research & Development (R&D) орталығының биологиялық үлгілер мен қоршаған орта объектілерінің сапасын бақылау жөніндегі сынақ зертханасының меңгерушісі, Алматы қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: kabdrahmanovaajnur4@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4425-303x.

Information about the authors

Xeniya Olegovna Bogdanova* – doctoral student, Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpaev, Researcher, Laboratory of Plant Biology and Biotechnology, National Scientific Laboratory of Collective Use, Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk city, Republic of Kazakhstan; e-mail: bogdanova.xeniya@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9318-6155.

Gulsaiyn Toikenkyzy Dolanbayeva – doctoral student, Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev, Researcher, Laboratory of Plant Biology and Biotechnology, National Scientific Laboratory of Collective Use, Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, city Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan; e-mail: saia_26@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0049-1511.

Valentina Nikolaevna Nikolaeva – Researcher at the Laboratory of Plant Biology and Biotechnology of the National Scientific Laboratory of Collective Use, Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan; e-mail: valentina_nn23@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8887-7111.

Sana Kanatbekovna Kabdrakhmanova — Head of the International Research & Development (R&D) Center for Advanced Functional Materials and Their Composites, Department of Chemical Processes and Industrial Ecology, K. Satpayev Kazakh National Research Technical University, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: skabdrakhmanova@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5760-2967.

Ainur Kanatbekovna Kabdrakhmanova – Head of the Testing Laboratory for Quality Control of Biological Samples and Environmental Objects, International Research & Development (R&D) Center, Department of Chemical Processes and Industrial Ecology, Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: kabdrahmanovaajnur4@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4425-303x.

Поступила в редакцию 30.03.2026
Поступила после доработки 04.05.2026
Принята к публикации 14.05.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-40

МРНТИ: 65.63.03

BY 4.0
Check for updates

Д.К. Задабек*, Ш.Н. Ахметсадыкова, Ш.С. Аманова, С.Е. Ибраимова, Н.А. Серикбаева
Алматинский технологический университет,
050012, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Толе Би 100
*e-mail: danazadabek@gmail.com

МЕЛИССОПАЛИНОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КАК ИНСТРУМЕНТ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПИЩЕВОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И ВЫЯВЛЕНИЯ ФАЛЬСИФИКАЦИИ МЁДА В РЕСПУБЛИКЕ КАЗАХСТАН

Аннотация: *В статье рассмотрена роль мелиссопалинологического анализа в системе обеспечения пищевой безопасности и подтверждения подлинности мёда в Республике Казахстан. Актуальность исследования обусловлена ростом требований к качеству пищевой продукции, рисками фальсификации мёда по ботаническому и географическому происхождению, а также усилением экспортной ориентации казахстанской продукции. В соответствии с Codex Standard for Honey мёд не должен содержать посторонних пищевых ингредиентов, а удаление пыльцы допускается лишь в технологически неизбежных случаях, что придаёт пыльцевому анализу важное идентификационное значение. В работе использован обзорно-аналитический подход с обобщением современных зарубежных и отечественных публикаций по мелиссопалинологии, аутентификации мёда и выявлению несоответствия маркировки. Показано, что мелиссопалинологический анализ позволяет устанавливать ботаническое происхождение, выявлять расхождения между заявленным и фактическим составом, а также служит базовым инструментом скрининга при оценке подлинности мёда. На основе анализа литературы и нормативных подходов предложена интегрированная модель контроля мёда для Казахстана, сочетающая мелиссопалинологию, физико-химические показатели и молекулярные методы верификации. Практическая значимость исследования состоит в возможности использования предложенного подхода лабораториями контроля качества, производителями и надзорными органами при формировании доказательной базы подлинности мёда и снижении рисков пищевой фальсификации.*

Ключевые слова: *мёд, мелиссопалинология, пищевая безопасность, фальсификация, ботаническое происхождение, пыльцевой анализ, аутентификация, Казахстан.*

Введение

Мёд относится к продуктам питания с высокой биологической и потребительской ценностью, однако одновременно является одной из наиболее уязвимых категорий в части подлинности и достоверности маркировки. В современных условиях обеспечение пищевой безопасности охватывает не только санитарно-гигиенические характеристики продукции, но и подтверждение её природного происхождения, отсутствия недекларированных примесей, а также соответствия заявленному ботаническому и географическому источнику [1, 2]. По стандарту Codex для мёда не допускается внесение пищевых ингредиентов, а удаление пыльцы разрешается только в случаях, когда это технологически неизбежно при удалении посторонних веществ, что придаёт пыльцевому составу особую идентификационную ценность.

Для Республики Казахстан проблема подтверждения подлинности мёда приобретает особую значимость в связи с развитием внутреннего рынка качественной пищевой продукции и расширением экспортных возможностей. В этой связи возрастает потребность в лабораторных методах, способных надёжно подтверждать происхождение мёда и выявлять случаи его фальсификации или некорректной маркировки [2, 3, 12]. Современные исследования показывают, что мелиссопалинологический анализ остаётся одним из базовых и наиболее доказательных подходов к определению ботанического происхождения мёда, особенно при комплексной оценке вместе с физико-химическими и молекулярными методами.

Мелиссопалинология представляет собой раздел палинологии, изучающий пыльцевой состав мёда. Пыльцевые зёрна, попадающие в мёд из нектара и других компонентов растительного происхождения, образуют устойчивый спектр, по которому можно судить о

©Д.К. Задабек, Ш.Н. Ахметсадыкова, Ш.С. Аманова, С.Е. Ибраимова, Н.А. Серикбаева, 2026

флористическом источнике продукта. Это позволяет рассматривать мелиссопалинологический анализ не только как метод ботанической диагностики, но и как инструмент пищевой безопасности, обеспечивающий прослеживаемость происхождения продукции [3, 4].

Цель статьи – обосновать значение мелиссопалинологического анализа как инструмента обеспечения пищевой безопасности и выявления фальсификации мёда в Республике Казахстан.

Научная новизна работы состоит в обосновании подхода, согласно которому мелиссопалинологический анализ должен рассматриваться не как вспомогательная процедура, а как ключевой компонент интегрированной системы контроля мёда в Казахстане. Практическая значимость статьи заключается в возможности использования её выводов лабораториями контроля качества, органами ветеринарно-санитарной экспертизы, производителями и надзорными структурами при формировании доказательной базы подлинности мёда и снижении рисков пищевой фальсификации.

Условия и методы исследования

Работа выполнена в формате обзорно-аналитического исследования. Методическую основу составили сравнительный анализ, систематизация и интерпретация данных международных стандартов и научных публикаций, посвящённых подлинности мёда, мелиссопалинологическому анализу и современным методам верификации ботанического состава.

В качестве основного нормативного ориентира использован международный стандарт Codex Standard for Honey, определяющий базовые требования к натуральному мёду, его составу, качеству и допустимым технологическим воздействиям [1]. Теоретико-методической базой для характеристики мелиссопалинологического анализа послужили классические работы по методам мелиссопалинологии и их гармонизации в международной лабораторной практике [4, 5].

При подготовке статьи были рассмотрены современные обзорные и прикладные исследования, в том числе публикации, посвящённые оценке качества и подлинности мёда, сочетанию мелиссопалинологического анализа с ДНК-метабаркодингом, а также оценке соответствия маркировки казахстанских и импортных образцов мёда [2, 3, 6]. В аналитической части обобщались данные о диагностических возможностях метода, его ограничениях и практической применимости в системе контроля качества пищевой продукции. Исследование 2025 года по образцам казахстанского и импортного мёда особенно важно для темы статьи, поскольку напрямую оценивало соответствие заявленной маркировки фактическому ботаническому составу с помощью мелиссопалинологического анализа и ДНК-метабаркодинга.

Результаты исследований

Анализ литературы показывает, что мелиссопалинологический анализ выполняет несколько взаимосвязанных функций в системе контроля качества мёда.

Во-первых, он позволяет устанавливать ботаническое происхождение продукта. При исследовании пыльцевого состава определяется соотношение доминирующих, сопутствующих и единичных пыльцевых типов, что даёт возможность судить о том, какие растения формировали нектарную базу мёда [4, 5, 9]. Для монофлорных сортов мёда это имеет принципиальное значение, поскольку подтверждение ботанического происхождения непосредственно влияет на достоверность маркировки, потребительскую ценность и рыночную стоимость продукции [2, 3].

Во-вторых, мелиссопалинологический анализ позволяет выявлять несоответствие между заявленным и фактическим происхождением мёда. Наиболее показательны в этом отношении данные работы S. Daugaliyeva и соавт., где исследовались казахстанские и импортные образцы мёда. Авторы установили, что соответствие маркировке по данным мелиссопалинологического анализа было подтверждено у 64,7% казахстанских и 62,5% импортных образцов. Следовательно, примерно треть изученных образцов имела расхождения между заявленным ботаническим происхождением и фактическим пыльцевым составом [6]. Это свидетельствует о высокой практической значимости метода в выявлении неверной маркировки и потенциальной фальсификации происхождения.

В-третьих, мелиссопалинологический анализ может использоваться как скрининговый этап в многоуровневой системе аутентификации мёда. Современные обзоры подчёркивают, что ни один метод не способен в одиночку полностью решить задачу подтверждения подлинности мёда во всех случаях. Наиболее надёжный результат достигается при сочетании пыльцевого анализа, физико-химических показателей и молекулярных методов [2, 3]. При этом именно мелиссопалинология нередко служит отправной точкой, так как позволяет быстро определить, соответствует ли образец заявленной ботанической категории.

Таблица 1 – Обобщённые результаты оценки соответствия маркировки мёда по ботаническому происхождению

№	Показатель	Казахстанский мёд	Импортный мёд	Интерпретация
1	Число исследованных образцов, n	17	16	Сравнительный анализ двух групп
2	Подтверждение маркировки по данным мелиссопалино-логического анализа, %	64,7	62,5	Заявленное происхождение подтверждено примерно у 2/3 образцов
4	Несоответствие маркировке по данным мелиссопалино-логического анализа, %	35,3	37,5	Около 1/3 образцов требуют дополнительной проверки
5	Подтверждение маркировки методом ДНК-метабаркодинга ITS2, %	58,8	31,25	Молекулярный метод уточняет ботанический состав, но результаты зависят от маркера
6	Подтверждение маркировки методом ДНК-метабаркодинга rbcL, %	29,4	31,25	Разрешающая способность метода ограничена для части образцов

Примечание: Составлено автором по данным [6]

Приведённые данные подтверждают, что мелиссопалинологический анализ способен выявлять значимую долю несоответствий маркировки даже в тех случаях, когда продукция позиционируется как натуральная. Иными словами, метод важен не только для определения «натуральный/ненатуральный» продукт, но и для установления корректности указания его ботанического происхождения, что является частью общей системы пищевой безопасности и добросовестного оборота пищевой продукции [2, 6].

Обсуждение научных результатов

Результаты анализа позволяют сделать вывод о том, что мелиссопалинологический анализ обладает двойной научно-практической ценностью. С одной стороны, он даёт информацию о природном происхождении мёда и тем самым обеспечивает его прослеживаемость. С другой стороны, он позволяет выявлять формы фальсификации, связанные не столько с прямым добавлением посторонних веществ, сколько с информационным и торговым искажением характеристик продукта [1, 2, 7].

Необходимо учитывать, что фальсификация мёда может иметь разные формы. К ним относятся добавление сахарных сиропов, чрезмерная технологическая обработка, фильтрация, приводящая к снижению или удалению пыльцевых включений, а также неправильное указание ботанического или географического происхождения. Последняя форма особенно сложна для контроля без применения палинологических методов, поскольку внешние и даже часть физико-химических показателей могут не выявлять такого несоответствия [1-3]. Codex отдельно подчёркивает, что пыльца является присущим мёду компонентом, а её удаление не должно осуществляться произвольно, что усиливает значение пыльцевого анализа в экспертной практике.

Преимуществами мелиссопалинологического анализа являются сравнительная доступность, высокая информативность для оценки ботанического происхождения и возможность использования в качестве доказательного метода при экспертном контроле. Вместе с тем метод имеет и ограничения. Они связаны с тем, что у разных растений пыльца может быть представлена в мёде неравномерно, а точность интерпретации зависит от качества эталонных пыльцевых коллекций и квалификации специалиста [4, 5, 8]. По этой

причине современные исследования предлагают использовать мелиссопалинологию в сочетании с ДНК-метабаркодингом и физико-химическими тестами, а не в качестве полностью автономного решения [2, 6, 11].

Для Республики Казахстан представляется целесообразным внедрение интегрированной модели контроля мёда. На первом этапе должен проводиться обязательный мелиссопалинологический анализ как базовый скрининг для всех партий мёда, маркируемых по ботаническому происхождению. На втором этапе необходимо определять физико-химические показатели качества: влажность, содержание гидроксиметилфурфурола, диастазное число, электрическую проводимость, кислотность, сахарный профиль. На третьем этапе, в спорных случаях или при экспортной сертификации, следует использовать молекулярные методы верификации ботанического состава. Такая схема представляется рациональной с точки зрения затрат, доказательности и соответствия международным тенденциям в сфере аутентификации мёда [2, 3, 6, 10].

Дополнительным направлением развития системы контроля в Казахстане может стать создание национальной базы пыльцевых профилей мёда по основным природно-климатическим регионам страны. Формирование такой референсной базы позволит повысить воспроизводимость исследований, стандартизировать экспертные заключения и укрепить позиции казахстанского мёда на внутреннем и внешнем рынках. Этот вывод является авторским обобщением проанализированных источников и логически вытекает из международной практики гармонизации методов мелиссопалинологии [5, 6].

Заключение

Таким образом, мелиссопалинологический анализ является значимым инструментом обеспечения пищевой безопасности и выявления фальсификации мёда в Республике Казахстан. Его научная и практическая ценность определяется тем, что пыльцевой спектр мёда выступает естественным маркером ботанического происхождения и одновременно критерием достоверности маркировки [1, 4].

В ходе исследования установлено, что мелиссопалинологический анализ позволяет подтверждать ботаническую принадлежность мёда, выявлять несоответствие между заявленным и фактическим происхождением, а также служить эффективным первичным этапом контроля качества. По опубликованным данным, около одной трети исследованных казахстанских и импортных образцов мёда имели расхождения между маркировкой и фактическим пыльцевым составом, что подтверждает практическую значимость метода для противодействия недобросовестной маркировке [6].

Список литературы

1. Codex Alimentarius Commission. Standard for Honey. CXS 12-1981. Revised in 1987, 2001.
2. Żak N. The Importance of Testing the Quality and Authenticity of Food Products: The Example of Honey / N. Żak, A. Wilczyńska // Foods. – 2023. – Vol. 12, № 17, Article 3210.
3. A comprehensive review of the current trends and recent advancements on the authenticity of honey / X.-H. Zhang et al // Food Chemistry. – 2023.
4. Louveaux J. Methods of Melissopalynology / J. Louveaux, A. Maurizio, G. Vorwohl // Bee World. – 1978. – Vol. 59, № 4. – P. 139-157.
5. Harmonized methods of melissopalynology / W. von der Ohe et al // Apidologie. – 2004. – Vol. 35, Suppl. 1. – P. S18-S25.
6. Identifying Honey Species Composition and Verifying Label Accuracy Using Melissopalynological Analysis and DNA Metabarcoding / S. Daugaliyeva et al // Food Analytical Methods. – 2025.
7. Ruoff K. Authenticity of honey and other bee products / K. Ruoff, S. Bogdanov // Apiacta. – 2004. – Vol. 38. – P. 317-327.
8. Shakoori Z. Assessing the quality of bee honey on the basis of melissopalynology as well as chemical analysis / Z. Shakoori, A. Mehrabian, F. Salmanpour // PLoS ONE. – 2023.
9. Song X.Y. Pollen Analysis of Natural Honeys from the Central Region of Shanxi, North China / X.Y. Song, Y.F. Yao, W.D. Yang // PLoS ONE. – 2012. – Vol. 7, № 11. – e49545.

10. Melissopalynological Analysis of Honey from French Guiana / W. Jiang et al // Foods. – 2024. – Vol. 13, № 7.
11. Özkök A. Comparing the melissopalynological and next generation sequencing methods to identify botanical origin of honey / A. Özkök, M.A. Doke, S. Silici // Food Control. – 2023.
12. Palynological analysis of honey with determination of botanical origin / G.A. Moldakhmetova et al // Bulletin of Science of S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University. – 2023.

Д.Қ. Задабек*, Ш.Н. Ахметсадыкова, Ш.С. Аманова, С.Е. Ибраимова, Н.А. Серікбаева
Алматы технологиялық университеті,
050012, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Төле би көшесі, 100
*e-mail: danazadabek@gmail.com

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНДА БАЛДЫҢ ТАҒАМДЫҚ ҚАУІПСІЗДІГІН ҚАМТАМАСЫЗ ЕТУ ЖӘНЕ ЖАЛҒАН ӨНІМДІ АНЫҚТАУ ҚҰРАЛЫ РЕТІНДЕГІ МЕЛИССОПАЛИНОЛОГИЯЛЫҚ ТАЛДАУ

Мақалада Қазақстан Республикасындағы балдың тағамдық қауіпсіздігін қамтамасыз ету және оның түпнұсқалығын растау жүйесіндегі мелиссопалинологиялық талдаудың рөлі қарастырылған. Зерттеудің өзектілігі тағам өнімдерінің сапасына қойылатын талаптардың күшеюімен, балдың ботаникалық шығу тегін дәлелдеудің қажеттілігімен және өнімді бұрмалап таңбалау тәуекелдерімен түсіндіріледі. Жұмыстың мақсаты - мелиссопалинологиялық талдаудың балдың шығу тегін анықтаудағы және фальсификацияны айқындаудағы тиімділігін негіздеу. Зерттеу халықаралық нормативтік құжаттар мен мелиссопалинология, бал аутентификациясы және ботаникалық құрамды верификациялау мәселелеріне арналған ғылыми еңбектерді шолу және талдау негізінде орындалды. Тозаңдық спектрдің балдың табиғи маркері екені және мелиссопалинологиялық талдаудың ботаникалық шығу тегін анықтауға, таңбалану сәйкессіздігін табуға және сапаны бағалауда дәлелді база қалыптастыруға мүмкіндік беретіні көрсетілді. Әдебиеттерді талдау нәтижесінде Қазақстан үшін мелиссопалинологиялық, физика-химиялық және молекулалық деңгейлерді біріктіретін бал сапасын бақылаудың ықпалдастырылған моделі ұсынылды. Зерттеу нәтижелері зертханалық тәжірибеде, ветеринариялық-санитариялық сараптамада және мемлекеттік бақылау жүйесінде қолдануға ұсынылады.

Түйін сөздер: *бал, мелиссопалинология, тағамдық қауіпсіздік, фальсификация, ботаникалық шығу тегі, тозаңдық талдау, аутентификация, Қазақстан.*

D.K. Zadabek*, Sh.N. Akhmetsadykova, Sh.S. Amanova, S.E. Ibraimova, N.A. Serikbayeva
Almaty Technological University,
100 Tole Bi Street, Almaty 050012, Republic of Kazakhstan

MELISSOPALYNOLOGICAL ANALYSIS AS A TOOL FOR FOOD SAFETY ASSURANCE AND HONEY ADULTERATION DETECTION IN THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

This article examines the role of melissopalynological analysis in food safety assurance and honey authenticity control in the Republic of Kazakhstan. The relevance of the study is associated with increasing quality requirements for food products, the need to verify the botanical origin of honey, and the risks of adulteration related to mislabeling and alteration of the natural composition of the product. The aim of the work is to substantiate the significance of melissopalynological analysis as an effective tool for identifying the origin of honey and detecting signs of adulteration. The study is based on an analytical review of international regulatory documents and modern domestic and foreign publications on melissopalynology, honey authentication, and methods for verifying botanical composition. It is shown that the pollen spectrum is an important natural marker of honey origin and that melissopalynological analysis makes it possible to confirm botanical origin, identify discrepancies in labeling, and form an evidence base in quality assessment. Based on the literature analysis, an integrated model of honey control for Kazakhstan is proposed, combining melissopalynological, physicochemical, and molecular levels of verification. The results may be used in laboratory practice, veterinary and sanitary expertise, and state quality control systems.

Key words: *honey, melissopalynology, food safety, adulteration, botanical origin, pollen analysis, authenticity, Kazakhstan.*

Сведения об авторах

Дана Куатовна Задабек* – магистрант кафедры «Безопасность и качество пищевых продуктов»; Алматинский технологический университет, г. Алматы, Республика Казахстан; e-mail: danazadabek@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-6494-0327.

Шынар Нурлановна Ахметсадыкова – PhD, ассистент-профессор кафедры «Безопасность и качество пищевых продуктов», Алматинский технологический университет, Республика Казахстан; e-mail: shynar.akhmetsadykova0@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8906-9922.

Шолпан Сапаровна Аманова – PhD, «Тағам өнімдерінің сапасы және қауіпсіздігі» кафедрасының сениор-лекторы, Алматы технологиялық университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: amanova_sh@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5560-5144.

Сания Ерболатовна Ибраимова – PhD, ассистент-профессор кафедры «Безопасность и качество пищевых продуктов», Алматинский технологический университет, Республика Казахстан; e-mail:canek21@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9439-7461.

Аяна Нургалиевна Серикбаева – PhD, ассистент-профессор кафедры «Безопасность и качество пищевых продуктов», Алматинский технологический университет, Республика Казахстан; email: ayana-sn@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8252-1034.

Авторлар туралы мәліметттер

Дана Куатовна Задабек* – «Тағам өнімдерінің қауіпсіздігі және сапасы» кафедрасының магистранты, Алматы технологиялық университеті, Алматы қаласы, Қазақстан Республикасы; e-mail: danazadabek@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-6494-0327.

Шынар Нурлановна Ахметсадыкова – PhD; «Тағам өнімдерінің қауіпсіздігі және сапасы» кафедрасының ассистент-профессоры, Алматы технологиялық университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: shynar.akhmetsadykova0@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8906-9922.

Шолпан Сапаровна Аманова – PhD, «Тағам өнімдерінің сапасы және қауіпсіздігі» кафедрасының сениор-лекторы, Алматы технологиялық университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: amanova_sh@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5560-5144.

Сания Ерболатовна Ибраимова – PhD, «Тағам өнімдерінің сапасы және қауіпсіздігі» кафедрасының ассисент-профессоры, Алматы технологиялық университеті, Алматы, Қазақстан Республикасы; e-mail: canek21@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9439-7461.

Аяна Нургалиевна Серикбаева – PhD, «Тағам өнімдерінің сапасы және қауіпсіздігі» кафедрасының ассисент-профессоры, Алматы технологиялық университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: ayana-sn@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8252-1034.

Information about the authors

Dana Kuatovna Zadabek* – Master's student at the Department of «Food Safety and Quality»; Almaty Technological University, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: danazadabek@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-6494-0327.

Shynar Nurlanovna Akhmetsadykova – PhD, Assistant Professor at the Department of «Food Safety and Quality», Almaty Technological University, Republic of Kazakhstan; e-mail: shynar.akhmetsadykova0@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8906-9922.

Sholpan Saparovna Amanova – PhD, Senior Lecturer, Department of «Food Safety and Quality», Almaty Technological University, Republic of Kazakhstan; e-mail: amanova_sh@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5560-5144.

Saniya Yerbolatovna Ibraimova – PhD, Assistant Professor, Department of «Food Safety and Quality», Almaty Technological University, Republic of Kazakhstan; e-mail: canek21@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9439-7461.

Ayana Nurgalievna Serikbaeva – Assistant Professor, Department of Food Safety and Quality, Almaty Technological University, Republic of Kazakhstan; e-mail: ayana-sn@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000- 0001-8252-1034.

Поступила в редакцию 30.03.2026
Поступила после доработки 03.05.2026
Принята к публикации 04.05.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-41

CC BY 4.0
Check for updates

МРНТИ: 579.8.06

Г.С. Рысбаева[1], Д.Е. Кудасова[*], Г.Б. Алпамысова[1], Қ.Ш. Нұрғазы[2]
[1]Южно-Казахстанский университет имени М. Ауэзова,
160000, Республика Казахстан, г. Шымкент, пр. Тауке хана 5,
[2]ТОО «Восточно-Казахстанская сельскохозяйственная опытная станция»,
Восточно-Казахстанская область, Глубоковский район, село Опытное поле
*e-mail: dariha_uko@mail.ru

РОЛЬ ДРОЖЖЕЙ И МОЛОЧНОКИСЛЫХ БАКТЕРИЙ В ХЛЕБОПЕКАРНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ И ФОРМИРОВАНИИ КАЧЕСТВА ХЛЕБА

Аннотация: *В статье рассматривается роль микроорганизмов в хлебопекарном производстве, являющихся ключевыми участниками процессов ферментации. Особое внимание уделяется дрожжам и молочнокислым бактериям, их взаимодействию и влиянию на формирование структуры, вкуса, аромата и пищевой ценности хлеба. Проанализированы современные научные данные о метаболической активности микроорганизмов в тесте, а также факторы, влияющие на их рост и развитие, включая температуру, состав среды и технологические параметры. Рассматриваются современные подходы к применению пробиотических культур в хлебопечении, направленные на повышение функциональной ценности продукции.*

Также уделено внимание методам контроля микробиологической контаминации сырья и готовой продукции, что имеет важное значение для обеспечения безопасности и стабильного качества хлебобулочных изделий. Показано, что использование управляемых микробиологических процессов позволяет не только улучшать технологические характеристики, но и повышать биологическую ценность продукта.

Таким образом, развитие хлебопекарного производства тесно связано с углублённым пониманием роли микроорганизмов. Современные достижения в области микробиологии и биотехнологии создают условия для совершенствования технологий, повышения качества и безопасности продукции, что особенно важно в условиях растущих требований к пищевой продукции.

Ключевые слова: *микроорганизмы, хлебопекарное производство, дрожжи, молочнокислые бактерии, микробиологическая безопасность, микробиологическое загрязнение.*

Введение

Хлебопекарное производство представляет собой одну из важнейших отраслей пищевой промышленности, в основе которой лежат сложные биохимические и микробиологические процессы. Хлеб на протяжении тысячелетий является неотъемлемой частью рациона человека и сохраняет своё значение в современных условиях благодаря высокой питательной ценности и доступности.

Ключевым фактором, определяющим качество хлебобулочных изделий, является деятельность микроорганизмов, прежде всего дрожжей и молочнокислых бактерий. Их метаболическая активность влияет на формирование структуры, вкуса, аромата и пищевой ценности продукта [1, 2]. Современные исследования направлены на углублённое изучение микробиоты теста и разработку методов управления ферментационными процессами.

Основные микроорганизмы хлебопечения

Дрожжи рода *Saccharomyces*, в частности *Saccharomyces cerevisiae*, являются основным компонентом хлебопекарного процесса. Они обеспечивают спиртовое брожение, в ходе которого сахара превращаются в углекислый газ и этанол [3].

Выделяющийся углекислый газ является ключевым фактором, определяющим формирование пористой структуры теста, что напрямую влияет на объем, пористость и эластичность мякиша – основные показатели качества хлебобулочных изделий. Как отмечает Н.С. Егоров [4], эффективность газообразования тесно связана с активностью ферментативных систем дрожжевых клеток, в частности ферментов, участвующих в

©Г.С. Рысбаева, Д.Е. Кудасова, Г.Б. Алпамысова, Қ.Ш. Нұрғазы, 2026

расщеплении сахаров (гликолиз), что приводит к образованию этанола и CO_2. Интенсивность данных процессов определяется как физиологическим состоянием дрожжей, так и условиями среды (температура, pH, осмотическое давление).

Кроме того, на газообразующую способность дрожжей влияет наличие питательных субстратов и продуктов метаболизма, включая аминокислоты и витамины, которые могут как стимулировать, так и ингибировать их активность. При оптимальных условиях дрожжи обеспечивают равномерное распределение газовых пузырьков, что способствует формированию однородной пористой структуры теста и предотвращает его разрушение [4].

Современные технологии хлебопекарного производства ориентированы на использование селекционированных штаммов дрожжей с заданными физиолого-биохимическими характеристиками [5]. Такие штаммы обладают повышенной устойчивостью к осмотическому давлению, что особенно важно при работе с тестом с высоким содержанием сахара и соли, а также характеризуются высокой скоростью брожения и стабильной ферментативной активностью.

Использование селекционированных культур позволяет стандартизировать технологический процесс, обеспечивая воспроизводимость качества продукции независимо от колебаний сырьевых и технологических факторов. Кроме того, применение специализированных штаммов способствует улучшению газоудерживающей способности теста, повышению объема хлеба и улучшению его органолептических характеристик, включая вкус и аромат.

В целом, управление процессами газообразования и подбор эффективных штаммов дрожжей являются важнейшими инструментами оптимизации хлебопекарного производства и обеспечения стабильного качества готовой продукции.Молочнокислые бактерии

Молочнокислые бактерии (МКБ) рода Lactobacillus играют ключевую роль в заквасочном хлебопечении, участвуя в формировании структурно-функциональных свойств теста. В процессе метаболизма они осуществляют молочнокислое (гомоферментативное) и смешанное (гетероферментативное) брожение, в ходе которого образуются органические кислоты, преимущественно молочная и уксусная [6]. Corsetti и Settanni [6] подчеркивают, что накопление органических кислот приводит к снижению pH теста, что не только формирует характерный кисловатый вкус, но и ингибирует развитие нежелательной микрофлоры.

Кроме того, метаболиты МКБ, включая органические кислоты, перекись водорода и бактериоцины, обладают выраженными антимикробными свойствами, что способствует естественной консервации хлебобулочных изделий [7]. Эти соединения подавляют рост плесневых грибов и патогенных бактерий, увеличивая срок хранения продукции без применения химических консервантов.

С точки зрения физиологии, МКБ подразделяются на гомоферментативные и гетероферментативные штаммы, различающиеся по путям метаболизма углеводов [8]. Гомоферментативные бактерии преимущественно продуцируют молочную кислоту, тогда как гетероферментативные образуют также уксусную кислоту, этанол и углекислый газ. Это разнообразие метаболических путей оказывает значительное влияние на кислотность теста, ароматический профиль и пористость мякиша.

Взаимодействие дрожжей и молочнокислых бактерий представляет собой сложную симбиотическую систему, в которой микроорганизмы взаимно дополняют метаболическую активность друг друга. Дрожжи (Saccharomyces cerevisiae) обеспечивают основное газообразование за счет спиртового брожения, способствуя разрыхлению теста и формированию пористой структуры [9]. В свою очередь, МКБ создают кислую среду, которая оптимизирует условия для дрожжей, стабилизирует ферментативные процессы и подавляет развитие посторонней микрофлоры.

Согласно Cauvain и Young [10], именно кооперативное взаимодействие дрожжей и молочнокислых бактерий определяет формирование комплексного вкусоароматического профиля хлеба. При этом образуются летучие соединения, органические кислоты и продукты протеолиза, которые в совокупности формируют уникальные органолептические характеристики заквасочного хлеба. Баланс между этими микроорганизмами напрямую влияет на структуру клейковинного каркаса, газоудерживающую способность теста и стабильность конечного продукта.Факторы, влияющие на ферментацию

На активность микроорганизмов влияют следующие факторы:

- температура;
- влажность;
- состав муки;
- концентрация соли и сахара;
- длительность брожения.

Оптимальные параметры технологического процесса являются ключевым фактором стабильного качества хлебопекарной продукции. Как отмечает Н.А. Тихомирова [11], даже незначительные отклонения температурного режима приводят к изменению кинетики брожения, что отражается на структуре теста, газоудерживающей способности и органолептических характеристиках готового продукта.

Регуляция ферментационной активности дрожжей и молочнокислых бактерий во многом определяется рецептурными компонентами. Соль оказывает ингибирующее воздействие на дрожжевые клетки, снижая их ферментативную активность и замедляя газообразование, тогда как сахара выступают дополнительным субстратом для дрожжей, ускоряя процессы спиртового брожения [12]. Баланс этих компонентов обеспечивает оптимальное развитие микробиоты теста и формирование структуры мякиша.

В процессе ферментации происходят значительные биохимические преобразования, повышающие пищевую ценность хлеба. В частности, под действием микробных ферментов осуществляется гидролиз фитиновой кислоты, что способствует высвобождению ионов кальция, магния, железа и цинка и, как следствие, увеличивает их биодоступность [13]. Minervini и соавт. [14] установили, что метаболическая активность молочнокислых бактерий способствует синтезу витаминов группы В, включая тиамин, рибофлавин и фолиевую кислоту, что значительно повышает биологическую ценность конечного продукта.

Современные биотехнологические подходы позволяют глубже изучать микробиологические процессы, протекающие в тесте. Методы молекулярной биологии, такие как ПЦР и высокопроизводительное секвенирование, дают возможность идентифицировать и количественно оценивать микробное разнообразие заквасок и теста, что создает предпосылки для направленного управления процессами ферментации [15]. Использование пробиотических штаммов молочнокислых бактерий рассматривается как перспективное направление, поскольку такие культуры способны оказывать благоприятное влияние на микробиоту кишечника человека и улучшать функциональные свойства хлеба [16].

Биоконсервация представляет собой эффективный способ повышения микробиологической безопасности хлебобулочных изделий. Данный подход основан на использовании антагонистически активных микроорганизмов, продуцирующих органические кислоты, бактериоцины и другие ингибирующие соединения, подавляющие рост патогенной и условно-патогенной микрофлоры [17]. Это позволяет сократить применение химических консервантов и повысить экологическую безопасность продукции. Контроль микробиологической безопасности включает комплекс санитарно-гигиенических мероприятий, а также постоянный мониторинг микробиоты на всех этапах производства [18].

Современные исследования подтверждают фундаментальную роль микроорганизмов в формировании качества хлеба. Работы И.А. Рогова [19] раскрывают общие биотехнологические аспекты пищевых производств, подчеркивая значение направленного использования микроорганизмов для управления технологическими процессами, повышения эффективности переработки сырья и формирования заданных свойств готовой продукции. В частности, биотехнологический подход рассматривает микроорганизмы как инструмент модификации структуры, пищевой ценности и безопасности пищевых продуктов за счёт их ферментативной активности и способности синтезировать биологически активные соединения.

Исследования Н.А. Артемьевой [20] посвящены характеристике микрофлоры зерна как исходного сырья хлебопекарного производства. Установлено, что зерновая микробиота представлена разнообразными группами микроорганизмов, включая бактерии, дрожжи и плесневые грибы, которые могут оказывать как положительное, так и отрицательное влияние на качество муки и готового продукта. Наличие определённых микроорганизмов в зерне способствует формированию ферментативной активности сырья, тогда как избыточное развитие нежелательной микрофлоры может приводить к снижению технологических свойств, ухудшению структуры теста и накоплению токсичных метаболитов.

Особое значение имеет контроль микробиологического состояния зерна на этапах хранения и переработки, поскольку исходная микрофлора во многом определяет последующее развитие микробиоты в тесте. В процессе подготовки сырья важную роль играют условия хранения, уровень влажности и температурный режим, которые влияют на активность микроорганизмов и сохранность зерна.

Таким образом, результаты, представленные в работах Рогова [19] и Артемьевой [20], подчеркивают необходимость комплексного подхода к управлению микробиологическими процессами в хлебопекарной отрасли, начиная с этапа сырья и заканчивая стадией готовой продукции. Это позволяет не только повысить качество хлеба, но и обеспечить его безопасность и стабильность при хранении.Katina [21] и De Vuyst [22] подробно изучают микробную экосистему заквасок и её влияние на свойства теста. Дальнейшие исследования микробиоты заквасок показывают, что сложность микробного сообщества оказывает существенное влияние на стабильность технологического процесса. По данным De Vuyst [22], экосистема заквасок представляет собой динамическую систему, в которой молочнокислые бактерии и дрожжи находятся в постоянном метаболическом взаимодействии. При этом устойчивость микробного сообщества зависит от условий ферментации, состава сырья и продолжительности брожения.

Формирование ароматического профиля хлеба напрямую связано с метаболической активностью микроорганизмов. Hansen и Schieberle [23] установили, что в процессе брожения образуются летучие соединения, включая альдегиды, спирты и эфиры, которые формируют характерный аромат хлеба. Эти соединения являются продуктами метаболизма как дрожжей, так и молочнокислых бактерий, а их соотношение определяется видом используемой закваски и условиями ферментации.

Физиологические и генетические особенности молочнокислых бактерий также играют важную роль в технологическом процессе. Hammes и Gänzle [24] показали, что различные штаммы МКБ обладают специфическими ферментативными системами, обеспечивающими адаптацию к кислой среде теста и конкурентоспособность по отношению к другим микроорганизмам. Vogel [25] дополнительно отметил, что генетические механизмы регуляции метаболизма у МКБ позволяют им эффективно использовать доступные углеводы и обеспечивать стабильность ферментации.

В процессе ферментации существенное значение имеет протеолитическая активность микроорганизмов. Gobbetti [26] установил, что протеолиз белков клейковины под действием ферментов МКБ и эндогенных ферментов зерна приводит к образованию пептидов и свободных аминокислот, которые участвуют в формировании вкуса и аромата хлеба. De Angelis [27] показал, что продукты протеолиза также влияют на текстурные свойства теста, улучшая его эластичность и растяжимость.

Di Cagno [28] подчеркивает, что процессы ферментации в закваске представляют собой сложный комплекс биохимических реакций, включающих углеводный и белковый метаболизм, что в совокупности определяет функциональные свойства хлеба.

Кроме того, Arendt [29] отмечает, что микробиологические процессы в зерновых заквасках оказывают значительное влияние на структурные характеристики теста и конечного продукта. Leroy и De Vuyst [30] дополняют, что молочнокислые бактерии не только формируют кислотность, но и участвуют в синтезе антимикробных веществ, что повышает микробиологическую безопасность и срок хранения хлеба (табл. 1).

Таблица 1 –Классификация молочнокислых бактерий (по Шпихеру)

Группа	Вид	%	Темп., °С
1	L. delbrueckii	4,0	40-55
2	L. leichmannii	1,8	35-40
3	L. plantarum	41,1	30-35
4	L. casei	7,1	35-40
5	L. brevis	24,8	30-35
6	L. fermentum	14,1	35-40
7	L. pastorianus	4,9	30-35
8	L. buchneri	2,2	30

Заключение

Таким образом, дрожжи и молочнокислые бактерии являются основой хлебопекарного производства, обеспечивая протекание ключевых биохимических и микробиологических процессов. Их взаимодействие формирует структуру теста, влияет на реологические свойства, вкусоароматические характеристики и пищевую ценность хлеба. Синергизм данных микроорганизмов способствует оптимальному развитию брожения, стабилизации кислотности и формированию пористой структуры мякиша, что является определяющим фактором качества конечного продукта.

Современные технологии хлебопекарного производства позволяют целенаправленно управлять микробиологическими процессами за счёт применения селекционированных штаммов микроорганизмов, функциональных заквасок и биотехнологических методов контроля ферментации. Это обеспечивает стандартизацию производственного процесса, повышение стабильности качества продукции и расширение ассортимента хлебобулочных изделий с заданными свойствами.

Анализ приведённой научной литературы показывает, что современные подходы к хлебопечению основаны на глубоком понимании микробиологических и биохимических процессов, протекающих в тесте. Особое значение приобретает управление микрофлорой сырья и заквасок, что позволяет регулировать процессы брожения, улучшать органолептические характеристики и повышать пищевую ценность продукции.

Использование комплексных заквасочных систем, включающих дрожжи и молочнокислые бактерии, способствует не только улучшению качества хлеба, но и повышению его микробиологической безопасности за счёт биоконсервационных эффектов. Это позволяет снижать применение химических добавок и создавать экологически безопасные продукты питания.

Таким образом, современные технологии хлебопекарного производства неразрывно связаны с управлением микробиологическими процессами и развитием биотехнологий. Перспективным направлением является дальнейшее изучение взаимодействия микроорганизмов, разработка новых функциональных заквасок и внедрение инновационных методов контроля ферментации, что будет способствовать повышению качества, безопасности и функциональной ценности хлебобулочной продукции.

Список литературы

1. Берёзкина А.Д. Микробиологические аспекты качества хлеба / А.Д. Берёзкина // Евразийское научное объединение. – 2018. – № 12. – С. 153-156.
2. Матвеева И.В. Биотехнология хлебопекарного производства / И.В. Матвеева, С.Я. Корячкина. – М.: КолосС, 2012. – 320 с.
3. Гвасалия Т.С. Дрожжи хлебопекарные / Т.С. Гвасалия, Т.П. Якименко // Современная наука и инновации. – 2016. – № 4. – С. 144-158.
4. Егоров Н.С. Промышленная микробиология / Н.С. Егоров. – М.: Рипол Классик, 1989. – 688 с.
5. Волова Т.Г. Биотехнология / Т.Г. Волова. – Красноярск, 1999. – 252 с.
6. Corsetti A. Lactobacilli in sourdough fermentation / A. Corsetti, L. Settanni // Food Research International. – 2007. – Vol. 40. – P. 539-558.
7. Axel C. Ecofriendly control of microorganisms in bread / C. Axel, E. Zannini, E.K. Arendt // Applied Microbiology and Biotechnology. – 2017. – Vol. 101. – P. 489-499.
8. Кузнецова Л.И. Заквасочные культуры в хлебопечении / Л.И. Кузнецова, Л.Н. Шатнюк. – М.: Пищевая промышленность, 2014. – 256 с.
9. Скурихин И.М. Всё о хлебе / И.М. Скурихин, А.П. Нечаев.– М.: ДеЛи принт, 2011. – 368 с.
10. Cauvain S.P. Technology of Breadmaking / S.P. Cauvain, L.S. Young– Springer, 2020. – 412 p.
11. Тихомирова Н.А. Технология хлеба / Н.А. Тихомирова. – СПб.: ГИОРД, 2015. – 416 с.
12. Алешина Е.С. Культивирование микроорганизмов / Е.С. Алешина. – Оренбург, 2017. – 120 с.
13. Poutanen K., Flander L. Sourdough fermentation / K. Poutanen, L. Flander // Food Microbiology. – 2009. – Vol. 26. – P. 693-699.

14. Minervini F. Influence of sourdough microbiota / F. Minervini // Applied Microbiology. – 2012. – Vol. 78. – P. 5328-5340.
15. Gobbetti M. Sourdough microbiology / M. Gobbetti // Food Microbiology. – 2016. – Vol. 37. – P. 30-40.
16. Settanni L. Functional sourdough bacteria / L. Settanni // Int. J. Food Microbiology. – 2014. – Vol. 186. – P. 65-73.
17. Axel C. Biopreservation in bread / C. Axel // Food Control. – 2017. – Vol. 73. – P. 102-110.
18. Лисицын А.Б. Микробиологическая безопасность / А.Б. Лисицын, В.А. Тутельян. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2010. – 512 с.
19. Рогов И.А. Пищевая биотехнология / И.А. Рогов. – М.: КолосС, 2004. – 440 с.
20. Артемьева Н.А. Микробиология зерна / Н.А. Артемьева. – М.: КолосС, 2013. – 280 с.
21. Katina K. Sourdough technology / K. Katina // Trends Food Sci. – 2006. – Vol. 17. – P. 104-112.
22. De Vuyst L. Microbial ecology of sourdough / L. De Vuyst // Food Microbiology. – 2014. – Vol. 37. – P. 30-40.
23. Hansen Å. Generation of aroma compounds / Å. Hansen, P. Schieberle // J. Agric. Food Chem. – 2006. – Vol. 54. – P. 5488-5495.
24. Hammes W.P. Sourdough breads / W.P. Hammes, M.G. Gänzle // Microbiology. – 1998. – Vol. 55. – P. 45-60.
25. Vogel R.F. Genetics of LAB / R.F. Vogel // Int. J. Food Microbiology. – 1997. – Vol. 36. – P. 179-186.
26. Gobbetti M. Italian sourdough / M. Gobbetti // Food Microbiology. – 2005. – Vol. 22. – P. 321-331.
27. De Angelis M. Proteolysis in sourdough / M. De Angelis // J. Proteome Research. – 2007. – Vol. 6. – P. 333-345.
28. Di Cagno R. Sourdough fermentation / R. Di Cagno // Trends Food Sci. – 2013. – Vol. 29. – P. 23-34.
29. Arendt E.K. Cereal fermentation / E.K. Arendt // Food Microbiology. – 2007. – Vol. 24. – P. 165-174.
30. Leroy F. Lactic acid bacteria / F. Leroy, L. De Vuyst // Trends Food Sci. – 2004. – Vol. 15. – P. 67-78.

References

1. Berezkina A.D. Mikrobiologicheskie aspekty kachestva khleba / A.D. Berezkina // Evraziiskoe nauchnoe ob"edinenie. – 2018. – № 12. – S. 153-156. (In Russian).
2. Matveeva I.V. Biotekhnologiya khlebopekarnogo proizvodstva / I.V. Matveeva, S.Ya. Koryachkina. – M.: KolosS, 2012. – 320 s. (In Russian).
3. Gvasaliya T.S. Drozhzhi khlebopekarnye / T.S. Gvasaliya, T.P. Yakimenko // Sovremennaya nauka i innovatsii. – 2016. – № 4. – S. 144-158. (In Russian).
4. Egorov N.S. Promyshlennaya mikrobiologiya / N.S. Egorov. – M.: Ripol Klassik, 1989. – 688 s. (In Russian).
5. Volova T.G. Biotekhnologiya / T.G. Volova. – Krasnoyarsk, 1999. – 252 s. (In Russian).
6. Corsetti A. Lactobacilli in sourdough fermentation / A. Corsetti, L. Settanni // Food Research International. – 2007. – Vol. 40. – P. 539-558. (In English).
7. Axel C. Ecofriendly control of microorganisms in bread / C. Axel, E. Zannini, E.K. Arendt // Applied Microbiology and Biotechnology. – 2017. – Vol. 101. – P. 489-499. (In English).
8. Kuznetsova L.I. Zakvasochnye kul'tury v khlebopechenii / L.I. Kuznetsova, L.N. Shatnyuk. – M.: Pishchevaya promyshlennost', 2014. – 256 s. (In Russian).
9. Skurikhin I.M. Vse o khlebe / I.M. Skurikhin, A.P. Nechaev.– M.: DeLi print, 2011. – 368 s. (In Russian).
10. Cauvain S.P. Technology of Breadmaking / S.P. Cauvain, L.S. Young– Springer, 2020. – 412 p. (In English).
11. Tikhomirova N.A. Tekhnologiya khleba / N.A. Tikhomirova. – SPb.: GIORD, 2015. – 416 s. (In Russian).
12. Aleshina E.S. Kul'tivirovanie mikroorganizmov / E.S. Aleshina. – Orenburg, 2017. – 120 s. (In Russian).

13. Poutanen K., Flander L. Sourdough fermentation / K. Poutanen, L. Flander // Food Microbiology. – 2009. – Vol. 26. – P. 693-699. (In English).
14. Minervini F. Influence of sourdough microbiota / F. Minervini // Applied Microbiology. – 2012. – Vol. 78. – P. 5328-5340. (In English).
15. Gobbetti M. Sourdough microbiology / M. Gobbetti // Food Microbiology. – 2016. – Vol. 37. – P. 30-40. (In English).
16. Settanni L. Functional sourdough bacteria / L. Settanni // Int. J. Food Microbiology. – 2014. – Vol. 186. – P. 65-73. (In English).
17. Axel C. Biopreservation in bread / C. Axel // Food Control. – 2017. – Vol. 73. – P. 102-110. (In English).
18. Lisitsyn A.B. Mikrobiologicheskaya bezopasnost' / A.B. Lisitsyn, V.A. Tutel'yan. – M.: GEHOTAR-Media, 2010. – 512 s. (In Russian).
19. Rogov I.A. Pishchevaya biotekhnologiya / I.A. Rogov. – M.: KolosS, 2004. – 440 s. (In Russian).
20. Artem'eva N.A. Mikrobiologiya zerna / N.A. Artem'eva. – M.: KolosS, 2013. – 280 s. (In Russian).
21. Katina K. Sourdough technology / K. Katina // Trends Food Sci. – 2006. – Vol. 17. – P. 104-112. (In English).
22. De Vuyst L. Microbial ecology of sourdough / L. De Vuyst // Food Microbiology. – 2014. – Vol. 37. – P. 30-40. (In English).
23. Hansen Å. Generation of aroma compounds / Å. Hansen, P. Schieberle // J. Agric. Food Chem. – 2006. – Vol. 54. – P. 5488-5495. (In English).
24. Hammes W.P. Sourdough breads / W.P. Hammes, M.G. Gänzle // Microbiology. – 1998. – Vol. 55. – P. 45-60. (In English).
25. Vogel R.F. Genetics of LAB / R.F. Vogel // Int. J. Food Microbiology. – 1997. – Vol. 36. – P. 179-186. (In English).
26. Gobbetti M. Italian sourdough / M. Gobbetti // Food Microbiology. – 2005. – Vol. 22. – P. 321-331. (In English).
27. De Angelis M. Proteolysis in sourdough / M. De Angelis // J. Proteome Research. – 2007. – Vol. 6. – P. 333-345. (In English).
28. Di Cagno R. Sourdough fermentation / R. Di Cagno // Trends Food Sci. – 2013. – Vol. 29. – P. 23-34. (In English).
29. Arendt E.K. Cereal fermentation / E.K. Arendt // Food Microbiology. – 2007. – Vol. 24. – P. 165-174. (In English).
30. Leroy F. Lactic acid bacteria / F. Leroy, L. De Vuyst // Trends Food Sci. – 2004. – Vol. 15. – P. 67-78. (In English).

Г.С. Рысбаева[1], Д.Е. Кудасова[1*], Г.Б. Алпамысова[1], Қ.Ш. Нұрғазы[2]
[1]М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті,
160000, Қазақстан Республикасы, г.Шымкент, Тауке хан даңғылы 5
[2]«Шығыс Қазақстан ауыл шаруашылығы Тәжірибелік станциясы» ЖШС,
Шығыс Қазақстан облысы, Глубокое ауданы, Попытное поле ауылы
*e-mail: dariha_uko@mail.ru

АШЫТҚЫЛАР МЕН СҮТҚЫШҚЫЛДЫ БАКТЕРИЯЛАРДЫҢ НАН ПІСІРУ ӨНДІРІСІНДЕГІ РӨЛІ ЖӘНЕ НАН САПАСЫНЫҢ ҚАЛЫПТАСУЫНА ӘСЕРІ

Мақалада ашыту үдерістерінің негізгі қатысушылары болып табылатын микроорганизмдердің нан пісіру өндірісіндегі рөлі қарастырылады. Ашытқылар мен сүтқышқылды бактерияларға, олардың өзара әрекеттесуіне және нанның құрылымын, дәмін, иісін және тағамдық құндылығын қалыптастыруға әсеріне ерекше назар аударылады. Тестідегі микроорганизмдердің метаболикалық белсенділігі туралы заманауи ғылыми деректер талданды, сондай-ақ олардың өсуі мен дамуына әсер ететін факторлар, соның ішінде температура, орта құрамы және технологиялық параметрлер қарастырылды. Нан пісіруде пробиотикалық дақылдарды қолданудың заманауи тәсілдері өнімнің функционалдық құндылығын арттыруға бағытталған.

Сонымен қатар, шикізат пен дайын өнімнің микробиологиялық контаминациясын бақылау әдістеріне назар аударылады, бұл нан-тоқаш өнімдерінің қауіпсіздігі мен тұрақты сапасын қамтамасыз етуде маңызды рөл атқарады. Басқарылатын микробиологиялық үдерістерді қолдану технологиялық сипаттамаларды жақсартып қана қоймай, өнімнің биологиялық құндылығын арттыруға мүмкіндік беретіні көрсетілген.

Осылайша, нан пісіру өндірісінің дамуы микроорганизмдердің рөлін терең түсінумен тығыз байланысты. Микробиология және биотехнология саласындағы заманауи жетістіктер технологияларды жетілдіруге, өнімнің сапасы мен қауіпсіздігін арттыруға жағдай жасайды, бұл тағам өнімдеріне қойылатын талаптардың өсуі жағдайында ерекше маңызды.

Түйін сөздер: *микроорганизмдер, нан пісіру өндірісі, ашытқылар, сүтқышқылды бактериялар, микробиологиялық қауіпсіздік, микробиологиялық ластану.*

G.S. Rysbayeva[1], D.E. Kudasova[1]*, G.B. Alpamyssova[1], Q.Sh. Nurgazy[2]
[1]M.Auezov South Kazakhstan University,
160000, Republic of Kazakhstan, Shymkent, 5 Tauke Khan Avenue
[2]LLP «East Kazakhstan Agricultural Experimental Station»,
East Kazakhstan Region, Glubokovsky District, Opytnoye Pole Village
*e-mail: dariha_uko@mail.ru

THE ROLE OF YEASTS AND LACTIC ACID BACTERIA IN BREADMAKING AND THEIR IMPACT ON BREAD QUALITY FORMATION

This article examines the role of microorganisms in breadmaking, as key participants in fermentation processes. Special attention is given to yeasts and lactic acid bacteria, their interaction, and their influence on the formation of bread structure, taste, aroma, and nutritional value. Modern scientific data on the metabolic activity of microorganisms in dough are analyzed, as well as factors affecting their growth and development, including temperature, medium composition, and technological parameters. Contemporary approaches to the use of probiotic cultures in bread production are also considered, aimed at enhancing the functional value of the final product.

Particular attention is paid to methods of controlling microbiological contamination of raw materials and finished products, which is essential for ensuring the safety and consistent quality of bakery products. It is shown that the use of controlled microbiological processes not only improves technological characteristics but also enhances the biological value of the product.

Thus, the development of breadmaking is closely linked to a deeper understanding of the role of microorganisms. Advances in microbiology and biotechnology create opportunities for improving technologies, enhancing product quality, and ensuring safety, which is especially important in the context of increasing demands for food products.

Key words: *microorganisms, bakery production, yeasts, lactic acid bacteria, microbiological safety, microbial contamination.*

Сведения об авторах

Гульнара Султанбековна Рысбаева – старший преподаватель кафедры «Биотехнология», Южно-Казахстанский университет имени М. Ауэзова, Шымкент, Республика Казахстан; e-mail: rysbaeva.62@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-7316-6901.

Дариха Ерадиловна Кудасова* – преподаватель кафедры «Биотехнология», Южно-Казахстанский университет имени М. Ауэзова, Шымкент, Республика Казахстан; e-mail: kudasova.darikha@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8530-3443.

Гулжайна Байгонысовна Алпамысова – заведующий кафедрой «Биотехнология», кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, Южно-Казахстанский университет имени М.Ауэзова, Шымкент, Республика Казахстан; e-mail: Хар68@ mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1533-0366.

Қуат Шайполлаұлы Нұрғазы – доктор сельскохозяйственных наук, профессор и.о. заведующий отдела кормопроизводства ТОО «Восточно-Казахстанская сельскохозяйственная опытная станция» Глубоковский район, с. Опытное поле;e-mail: n.k.sh@bk.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3153-3083.

Авторлар туралы мәлімет

Гүлнара Сұлтанбекқызы Рысбаева – «Биотехнология» кафедрасының аға оқытушысы, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент, Қазақстан Республикасы; e-mail: rysbaeva.62@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-7316-6901.

Дариха Ерадиловна Кудасова* – «Биотехнология» кафедрасының оқытушысы, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент, Қазақстан Республикасы; e-mail: kudasova.darikha@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8530-3443.

Гулжайна Байгонысовна Алпамысова – «Биотехнология» кафедрасының меңгерушісі, ауыл шаруашылығы ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент, Қазақстан Республикасы; e-mail: Хар68@ mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1533-0366.

Қуат Шайполлаұлы Нұрғазы – ауыл шаруашылығы ғылымдарының докторы, профессор, «Шығыс Қазақстан ауыл шаруашылығы Тәжірибелік станциясы» ЖШС жемшөп өндіру бөлімінің меңгерушісі М.А. Глубокое ауданы, тәжірибелік алаң ауылы; e-mail:n.k.sh@bk.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3153-3083.

Information about the authors

Gulnara Sultanbekovna Rysbayeva – Senior Lecturer at the Department of Biotechnology, South Kazakhstan University named after M. Auezov, Shymkent, Republic of Kazakhstan; e-mail: rysbaeva.62@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-7316-6901.

Darikha Yeradilovna Kudasova* – Lecturer at the Department of Biotechnology, South Kazakhstan University named after M. Auezov, Shymkent, Republic of Kazakhstan; e-mail: kudasova.darikha@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8530-3443.

Gulzhaina Baigonysovna Alpamyssova – Head of the Department of Biotechnology, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, M. Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Republic of Kazakhstan; e-mail: Xap68@ mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1533-0366.

Kuat Shaipollayevich Nurgazy – Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Acting Head of the Feed Production Department of East Kazakhstan Agricultural Experimental Station LLP Glubokovsky district, village of Experimental Field; e-mail:n.k.sh@bk.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3153-3083.

Поступила в редакцию 01.04.2026
Поступила после доработки 30.04.2026
Принята к публикации 04.05.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-42

CC BY 4.0
Check for updates

МРНТИ: 62.13.27

С.С. Каримова*, А.У. Исаева[2], А.Е. Тлеукеева[1]
[1]Южно-Казахстанский университет имени М. Ауэзова,
160012, Республика Казахстан, г. Шымкент, проспект Тауке хана, 5
[2]Шымкентский Университет,
160031, Республика Казахстан, г. Шымкент, Каратауский район, Тассайский подрайон, улица Жибек жолы, земельный участок №6
*e-mail: saulet_ka@mail.ru

МИКРОБИОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАСТИТЕЛЬНЫХ ОСТАТКОВ ТУРКЕСТАНСКОЙ ОБЛАСТИ И ИХ БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ В ПРОЦЕССАХ ПЕРЕРАБОТКИ ЛИГНОЦЕЛЛЮЛОЗНОГО СЫРЬЯ

Аннотация: *Растительные остатки являются важным компонентом экосистемы и источником органического вещества для почв, играя ключевую роль в круговороте углерода и формировании гумуса. В условиях Туркестанской области, характеризующейся аридным климатом, изучение микробного разнообразия растительных остатков особенно актуально для оценки процессов разложения целлюлозы и полисахаридов.*

Цель исследования заключалась в изучении состава целлюлозолитических микроорганизмов в растительных остатках и оценке их функционального потенциала для биотехнологического применения. Основные направления работы включали выделение бактерий и грибов, их морфологическую и количественную характеристику, идентификацию методом MALDI-TOF, а также анализ их роли в разложении целлюлозы и формировании почвенного гумуса.

Научная значимость исследования заключается в уточнении структуры микробного сообщества растительных остатков аридного региона и выявлении видов с высокой ферментативной активностью, что расширяет знания о целлюлозолитических бактериях и грибах. Практическая значимость работы заключается в использовании полученных данных для разработки биотехнологических подходов переработки растительных остатков и повышения плодородия почв.

©С.С. Каримова, А.У. Исаева, А.Е. Тлеукеева, 2026

В качестве методологии использовалось выделение микроорганизмов на стандартных питательных средах, морфологическая оценка колоний, количественное определение в КОЕ/г, а также видовая идентификация бактерий и грибов методом MALDI-TOF, что обеспечило высокую точность определения микроорганизмов.

В ходе исследования были выделены бактерии Bacillus cereus, Bacillus megaterium, Acinetobacter lwoffii. Bacillus spp. обеспечивают первичное разрушение клетчатки и полисахаридов, грибы участвуют в разложении более структурированной целлюлозы и лигнина, а Acinetobacter lwoffii перерабатывает побочные продукты разложения и поддерживает функциональное разнообразие микробного сообщества.

Проведенное исследование внесло вклад в понимание функционального разнообразия целлюлозолитических микроорганизмов в аридных экосистемах и подчеркнуло их роль в биотехнологии. Практическое значение работы заключается в возможности создания ферментных препаратов, биоконверсии сельхозотходов и разработки биоудобрений, способствующих устойчивому развитию агроэкологических систем региона.

Ключевые слова: *целлюлозолитические микроорганизмы, растительные остатки, Туркестанская область.*

Введение

Микробиологическое разнообразие растительных остатков играет ключевую роль в биогеохимических циклах экосистем, влияя на процессы разложения органического вещества, минерализации питательных элементов и поддержания плодородия почв. Разложение растительных остатков является ключевым процессом в почвенных экосистемах, который регулирует круговорот углерода, азота и других элементов, а также поддерживает плодородие почв. В аридных и полусухих регионах, таких как Туркестанская область, данные процессы проходят медленно из-за экстремальных климатических условий, что повышает значимость изучения микробиологических аспектов разложения литтера, особенно целлюлозолитических микроорганизмов. Несмотря на глобальный интерес к процессам разложения, информация о микробиоте растительных остатков в аридных регионах остается ограниченной. Для Туркестанской области характерны резко континентальный климат, высокая инсоляция, низкое количество атмосферных осадков (150-300 мм в год), продолжительные засушливые периоды и высокая летняя температура почвы, достигающая 45-60°C на поверхности. Почвы региона представлены преимущественно сероземами с низким содержанием органического вещества и ограниченной влагоудерживающей способностью, что существенно влияет на активность микробных сообществ и скорость разложения растительных остатков. Исследования казахстанских ученых в области микробиологии почв аридных территорий показывают, что в условиях южных регионов Казахстана преобладают устойчивые спорообразующие бактерии рода *Bacillus*, обладающие высокой адаптацией к дефициту влаги и температурному стрессу. Однако данные о целлюлозолитических микроорганизмах именно растительных остатков Туркестанской области остаются ограниченными, особенно в аспекте их биотехнологического потенциала.

Исследовательские работы авторов продемонстрировали, что структура микробного сообщества напрямую влияет на скорость разложения растительных остатков, показывая важность учета разнообразия бактерий и грибов в исследованиях литтера [1, 2]. Авторы работ подчеркнули значимость листового литтера для поддержания плодородия почв и формирования микробного разнообразия, отмечая различия между видами растений и качеством органического материала [3, 4]. Исследователи показали, что разнообразие микробов оказывает большее влияние на скорость разложения, чем «домашняя» среда происхождения литтера, что подчеркивает универсальность микробных сообществ в процессах минерализации [5, 6]. Zhang et al. продемонстрировали, что смешение литтера разных видов ускоряет разложение и изменяет состав микробного сообщества, что важно учитывать при оценке функциональной роли микроорганизмов [7]. Li et al. выявили, что состав и качество листового литтера влияют на численность и активность бактерий, ответственных за разложение полисахаридов [8]. Другие исследования подтвердили, что микробиальные сообщества определяют скорость минерализации и эффективность переработки органического вещества в почвах с различным уровнем антропогенной нагрузки [9-12]. Работы авторов показали, что добавление экзогенной целлюлазы и высококачественного

литтера увеличивает активность ферментов и ускоряет разложение, что указывает на потенциал биотехнологического применения микробов [13, 14]. Климатическое потепление усиливает сложность микробных сетей за счет увеличения разнообразия бактерий и усиления взаимодействия грибов, подчеркивая влияние экологических факторов на микробиоту [15, 16]. Исследования выявили ключевую роль целлюлозолитических бактерий, таких как *Bacillus spp*., *Lysobacter* и *Cellulomonas*, в разложении растительных остатков и производстве ферментов, а также возможность использования этих штаммов в биоконверсии сельхозотходов [17, 18]. Agroforestry-системы и управление литтером существенно влияют на популяции бактерий [19-21]. Предварительная обработка грибами *Ganoderma* и *Trichoderma* улучшает скорость разложения и качество компоста [22]. Моделирование глобальной вариабельности разложения литтера позволяет прогнозировать динамику микробных сообществ и функциональных процессов в почвах [23]. Анализ зарубежных исследований показывает, что методы метагеномного и метапротеомного анализа, оценка ферментативной активности и учет микробного разнообразия являются ключевыми для понимания разложения литтера [24, 25]. Однако пробелы остаются в изучении целлюлозолитических микроорганизмов в аридных условиях, их адаптации и практического применения, особенно в контексте Туркестанской области.

Объект исследования – растительные остатки (листья, стебли, корни) сельскохозяйственных и природных растений Туркестанской области. Предмет исследования – микробные сообщества, выделенные из этих остатков, с акцентом на целлюлозолитические бактерии и грибы, их видовой состав, численность и функциональный потенциал.

Цель исследования – изучить состав и функциональные характеристики целлюлозолитических микроорганизмов растительных остатков Туркестанской области и оценить их биотехнологический потенциал. Задачи включают: выделение и количественную оценку микроорганизмов; идентификацию с помощью MALDI-TOF; описание морфологических характеристик; анализ роли микроорганизмов в разложении целлюлозы; оценку их применения в биотехнологии.

Гипотеза работы заключается в том, что среди микроорганизмов растительных остатков Туркестанской области присутствуют адаптированные целлюлозолитические бактерии и грибы с высоким ферментативным потенциалом, способные к использованию в биотехнологических процессах. Значение исследования заключается в расширении научных знаний о микробиоте литтера аридных экосистем и создании базы для биотехнологического применения локальных штаммов.

Материалы и методы

Объектом исследования являлись растительные остатки (листья, стебли, корни) сельскохозяйственных культур и дикорастущих растений, собранные на территории Туркестанской области в период с апреля по октябрь 2025 года. Для анализа отбирались фрагменты с различной степенью разложения. Масса каждой пробы составляла 50–100 г. Влажность определяли методом сушки до постоянной массы, а pH измеряли цифровым pH-метром HI 98103 («Hanna Instruments», Италия). Для количественного анализа использовались пробы массой 10 г, для качественного анализа – весь доступный литтер. Растительные остатки предварительно промывали дистиллированной водой и сушили при комнатной температуре до 7-15 % влажности.

Для выделения бактерий использовалась стандартная питательная среда МПА (мясо-пептонный агар), для грибов – среда Чапека, для целлюлозолитических микроорганизмов – среда Гетчинсона. Посев проводили методом последовательных разведений и сплошного высева на поверхность агаровых сред. Колонии инкубировали при 28°C в течение 48-72 часов. Морфологические признаки колоний (форма, цвет, текстура, края) регистрировали визуально. Для количественного определения численности микроорганизмов рассчитывали КОЕ/г растительного материала, проводя три параллельные повторности каждого образца.

Идентификацию бактерий выполняли методом MALDI-TOF (Matrix-Assisted Laser Desorption/Ionization Time-of-Flight) с использованием системы Microflex LT («Bruker», Германия). Для подготовки проб клетки выделяли с агаровой поверхности, обрабатывали экстракционным буфером (α-цианокавалиновая кислота, «Sigma», США) и наносили на металлическую пластину. Спектры анализировали с помощью программного обеспечения FlexControl и сравнивали с базой данных MALDI Biotyper.

Целлюлозолитическая активность бактерий оценивалась на агаре с карбоксиметилцеллюлозой (CMC, «Sigma», США). После инкубации 48-72 часов колонии окрашивали раствором йода 1 %, измеряли зоны гидролиза в мм. Также проводилось количественное определение деградации целлюлозы путем измерения потери массы субстрата после инкубации с выделенными штаммами в течение 7 дней при 28 °C. Для оценки ферментативной активности грибов использовались аналогичные агаровые планшеты с целлюлозой, с регистрацией зон гидролиза и качественной оценки скорости разложения полисахаридов.

Все измерения проводились в трех параллельных повторностях. Статистическую обработку данных выполняли с использованием программы Microsoft Excel 2021 («Microsoft», США) и Statistica 12 («TIBCO Software», США). Результаты представлены в виде среднего арифметического и стандартного отклонения.

Исследовательский вопрос заключался в том, чтобы определить какие целлюлозолитические микроорганизмы преобладают в растительных остатках Туркестанской области, и какова их функциональная активность. Выдвинута гипотеза о том, что среди микроорганизмов растительных остатков региона присутствуют адаптированные целлюлозолитические микроорганизмы с высокой ферментативной активностью, которые могут быть использованы в биотехнологических процессах переработки органического сырья. Этапы исследования включают в себя: сбор и предварительная подготовка растительных остатков, разделение образцов на фракции по степени разложения, изоляция микробных культур с использованием питательных сред для бактерий и грибов, качественная и количественная оценка выделенных микроорганизмов, идентификация штаммов с помощью метода MALDI-TOF, морфологическая характеристика и описание колоний (форма, цвет, текстура), определение численности микроорганизмов в кое/г, оценка ферментативного потенциала целлюлозолитических микроорганизмов для разложения целлюлозы. Идентификация бактериальных штаммов проводилась методом MALDI-TOF MS с использованием системы Microflex LT («Bruker», Германия) и базы данных MALDI Biotyper Library. Для грибных культур применялась предварительная морфологическая идентификация на основании макро- и микроморфологических признаков колоний (цвет, структура мицелия, характер спороношения). MALDI-TOF использовался преимущественно для подтверждения идентификации бактериальных культур, поскольку базы данных для почвенных и фитосубстратных грибов имеют ограниченную репрезентативность и требуют дополнительной морфологической верификации. Применение MALDI-TOF для идентификации бактерий растительных остатков в аридной зоне Туркестанской области является новым подходом в локальных исследованиях микробиоты. Кроме того, комплексная оценка морфологических, количественных и ферментативных характеристик позволяет выявить наиболее активные штаммы для дальнейшего использования в биотехнологии. Предварительные результаты показали преобладание бактерий *Bacillus cereus, Bacillus megaterium* и *Acinetobacter lwoffii* среди выделенных культур. Колониальная морфология штаммов разнообразна, а численность микроорганизмов колебалась от 10^5 до 10^7 КОЕ/г. Все выделенные штаммы проявляли целлюлозолитическую активность, что подтверждает их потенциал для биоконверсии растительных остатков.

Результаты и обсуждения

В результате проведенных исследований из растительных остатков Туркестанской области были выделены три ключевых вида бактерий с целлюлозолитической активностью: Bacillus cereus, Bacillus megaterium и Acinetobacter lwoffii. Все выделенные штаммы характеризовались способностью расщеплять целлюлозу и адаптацией к условиям аридной зоны. Морфологические особенности колоний варьировали в зависимости от вида и стадии разложения материала, что отражало широкий спектр экологических стратегий микроорганизмов. Для наглядного представления процессов их участия в биоконверсии растительного сырья разработана схема (рис. 1).

Выбор и доминирование именно Bacillus cereus, Bacillus megaterium и Acinetobacter lwoffii обусловлены их адаптацией к экстремальным условиям аридного климата Туркестанской области.

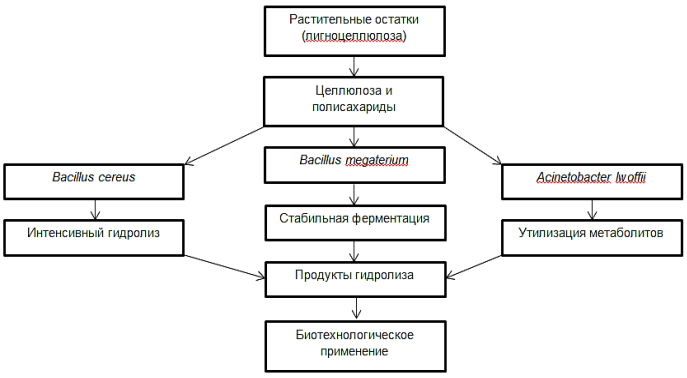


Рисунок 1 – Схема биоконверсии растительных остатков с участием целлюлозолитических микроорганизмов и получением продуктов, перспективных для пищевой и биотехнологической промышленности

Представители рода Bacillus обладают способностью к спорообразованию, устойчивостью к высушиванию, температурным колебаниям и дефициту питательных веществ, что обеспечивает их выживание в засушливых почвах и растительных остатках. Bacillus megaterium известен как активный продуцент гидролитических ферментов, включая целлюлазы, а Bacillus cereus часто встречается в целлюлозосодержащих субстратах и участвует в первичной деструкции органического материала. Acinetobacter lwoffii характеризуется метаболической пластичностью и способностью участвовать в деградации промежуточных продуктов распада органического вещества, поддерживая стабильность микробного консорциума в стрессовых экологических условиях. Количественный анализ показал различия в численности микроорганизмов, определяемой в КОЕ/г растительного материала. Bacillus cereus был преобладающим штаммом с численностью 6,2 × 10^6 КОЕ/г, что соответствует высокой степени заселенности и интенсивной ферментативной активности. Bacillus megaterium продемонстрировал умеренную численность (4,8 × 10^6 КОЕ/г) и стабильную целлюлозолитическую активность, а Acinetobacter lwoffii имел наименьшую численность (3,5 × 10^5 КОЕ/г), однако играл важную роль в синергетических взаимодействиях с другими микроорганизмами. Таблица 1 суммирует морфологические, количественные и ферментативные характеристики выделенных микроорганизмов (табл. 1).

Таблица 1 – Морфологические, количественные и ферментативные характеристики выделенных микроорганизмов

Микроорганизм	Форма колонии	Цвет	Текстура	Численность (КОЕ/г)	Зона гидролиза целлюлозы (мм)
Bacillus cereus	Круглая, гладкая	Кремовая	Мучнистая	6,2 × 10^6	15
Bacillus megaterium	Круглая, слегка бугристая	Белая	Мягкая	4,8 × 10^6	12
Acinetobacter lwoffii	Неровная, выпуклая	Желтоватая	Глянцевая	3,5 × 10^5	8

Полученные результаты подтверждают выдвинутую гипотезу о наличии адаптированных целлюлозолитических микроорганизмов в растительных остатках Туркестанской области. *Bacillus cereus* и *Bacillus megaterium* демонстрируют высокий ферментативный потенциал, что делает их перспективными для применения в биотехнологических процессах, таких как переработка растительных отходов в биотопливо, производство компоста и органических удобрений. Следует отметить, что отдельные штаммы *Bacillus cereus* могут обладать патогенными свойствами и продуцировать токсические метаболиты, что требует обязательной оценки биобезопасности при промышленном применении, особенно в пищевой биотехнологии. В настоящем исследовании рассматривается исключительно ферментативный и целлюлозолитический потенциал выделенного штамма. На следующем этапе исследования для оценки возможности практического применения выделенных штаммов планируется проведение дополнительных исследований, направленных на изучение их токсигенности, генетической стабильности и соответствия требованиям

биобезопасности, что позволит обосновать перспективы их использования в биотехнологических процессах. *Acinetobacter lwoffii*, несмотря на сравнительно низкую численность, выполняет функцию стабилизатора микробных сообществ и может быть включен в состав консорциумов для комплексной переработки органического сырья.

Морфологические признаки колоний, численность и зоны гидролиза целлюлозы могут служить индикаторами ферментативного потенциала штаммов. Высокая адаптация микроорганизмов к местным условиям позволяет рассматривать их использование в локальных биотехнологических решениях, оптимизированных для климатических и почвенных условий Туркестанской области.

Кроме того, выделенные микроорганизмы демонстрируют потенциал для интеграции в промышленные процессы биоконверсии, включая биоразложение сельскохозяйственных остатков, производство ферментов и создание устойчивых микробных консорциумов. Использование локальных адаптированных штаммов повышает эффективность процессов переработки и снижает экологическую нагрузку на почвенные экосистемы.

Таким образом, результаты исследования показывают, что растительные остатки Туркестанской области являются источником целлюлозолитических микроорганизмов с высоким биотехнологическим потенциалом. Комплексная характеристика микроорганизмов, включающая морфологию, численность и ферментативную активность, позволяет формировать базу для дальнейшего отбора наиболее эффективных штаммов для промышленного и экологически ориентированного использования.

Заключение

В результате проведенного исследования был выполнен комплексный анализ микробиологического разнообразия растительных остатков, собранных на территории Туркестанской области. Выделенные микроорганизмы, включая *Bacillus cereus, Bacillus megaterium* и *Acinetobacter lwoffii*, характеризуются высокой адаптацией к аридным условиям региона и проявляют выраженную целлюлозолитическую активность. Количественные показатели численности микроорганизмов в сочетании с морфологическими особенностями колоний и зонами гидролиза целлюлозы позволяют оценить функциональный потенциал каждого штамма, а также их роль в процессах разложения растительных остатков.

Анализ полученных данных подтверждает гипотезу исследования о существовании локально адаптированных целлюлозолитических бактерий, способных эффективно расщеплять целлюлозу и участвовать в биотехнологических процессах. *Bacillus cereus* проявил наибольшую ферментативную активность и численность, что делает его перспективным кандидатом для промышленных применений, включая производство органических удобрений и биотоплива. *Bacillus megaterium*, обладая устойчивостью к различным условиям среды и стабильной ферментативной активностью, также может быть интегрирован в биоконверсии растительных остатков. *Acinetobacter lwoffii*, несмотря на сравнительно низкую численность, играет важную роль в синергетических взаимодействиях внутри микробного сообщества и обеспечивает функциональную стабильность микробных консорциумов.

Полученные результаты демонстрируют высокую научную и практическую значимость работы. Во-первых, они дополняют глобальные данные о микробиоте растительных остатков аридных регионов, расширяя представление о разнообразии и функциональной активности целлюлозолитических микроорганизмов. Во-вторых, работа предоставляет экспериментально подтвержденные данные о потенциале локальных микроорганизмов для биотехнологических процессов переработки сельскохозяйственных отходов. Эти штаммы могут быть использованы в создании экологически безопасных технологий биоконверсии, способствующих снижению нагрузки на почвенные экосистемы и повышению эффективности утилизации органического сырья.

Особое значение имеет выявление корреляции между морфологическими характеристиками колоний, численностью микроорганизмов и их ферментативной активностью, что позволяет использовать данные показатели в качестве индикаторов биотехнологического потенциала штаммов при первичном отборе для дальнейших исследований и промышленных применений. Исследование также открывает перспективы для формирования локальных микробных консорциумов с высокой эффективностью

переработки целлюлозосодержащих растительных остатков, а также для изучения взаимодействия бактерий и грибов в естественных и индустриальных системах.

Таким образом, проведенная работа вносит существенный вклад в развитие микробиологии и биотехнологии, подтверждает возможность использования адаптированных микроорганизмов Туркестанской области для биоконверсии растительных отходов и создания устойчивых экологически ориентированных процессов. Полученные данные создают фундамент для дальнейших исследований функциональной активности целлюлозолитических микроорганизмов и разработки локально адаптированных биотехнологических решений.

Список литературы

1. Pairing litter decomposition with microbial community structures / A. Daebeler et al // SOIL. – 2022. – Vol. 8. – P. 163-176.
2. Liang K.W. The role of leaf litter in forest soil fertility and microbial diversity / K.W. Liang // Molecular Soil Biology. – 2024. – Vol. 15, № 3. – P. 99-108.
3. Microbial Diversity Drives Decomposition More than Advantage of Home Environment – Evidence from a Manipulation Experiment with Leaf Litter / M.M. Ardestani et al // Microorganisms. – 2025. – Vol. 13, № 2. – P. 351.
4. Litter mixing promoted decomposition and altered microbial decomposer communities / L. Zhang et al // BMC Microbiology. – 2023. – Vol. 23. – P. 148.
5. Leaf litter mixtures alter decomposition rate, nutrient retention, and bacterial community composition in a temperate forest / K. Li et al // Forestry Research. – 2023. – Vol. 3. – P. 22.
6. Impacts of plant domestication on soil microbial and nematode communities during litter decomposition / J. Palomino et al // Plant and Soil. – 2023. – Vol. 487. – P. 419-436.
7. High-Quality Litter and Exogenous Cellulase Enhance Soil Nutrient Cycling and Enzymatic Activities / L. Xiao et al // Agriculture. – 2024. – Vol. 14, № 12. – P. 2162.
8. Climate warming enhances microbial network complexity by increasing bacterial diversity and fungal interaction strength in litter decomposition / G. Liu et al // Wetland/Elsevier. – 2023.
9. Impacts of litter microbial community on litter decomposition in the absence of soil microorganisms / J. Liu et al // Environmental Microbiology Reports. – 2024.
10. Identification and comprehensive genomic characterization of cellulolytic Bacillus species reveal unique CAZyme profiles for leaf litter degradation and compost production / AK. Singh et al // World J Microbiol Biotechnol. – 2025. – Vol 3, № 41(7). – P. 245.
11. Arfarita N. The impact of different management on pine-based agroforestry system and litter accumulation on the population and activity of cellulolytic bacteria / N. Arfarita // Biodiversitas – Journal of Biological Diversity. – 2024. – Vol. 25. – P. 924-936.
12. Decomposition Characteristics of Lignocellulosic Biomass in Subtropical Rhododendron Litters under Artificial Regulation / P. Zhang et al // Metabolites. – 2023. – Vol. 13, № 2. – P. 279.
13. The use of cellulolytic Aspergillus sp. inoculum to improve the quality of pineapple compost / B. Irawan et al // Journal unspecified. – 2023.
14. Fungal pretreatment methods for organic wastes: advances and challenges in biomass valorization / P.K. Chaurasia et al // RSC Sustainability. – 2025.
15. The microbial contribution to litter decomposition and plant growth / C. Zhang et al // Environmental Microbiology Reports. – 2023.
16. Rahma Dini I. The Cellulase Enzyme Activity of Several Cellulolytic Bacteria and their Ability to Decompose Organic Waste / I. Rahma Dini // Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery. – 2024. – Vol. 55, № 12.
17. Samingan SAMINGAN. Kemampuan Ganoderma dan Trichoderma Mendekomposisi Serasah Acacia mangium (The Ability of Ganoderma and Trichoderma to Decompose Acacia mangium Litter). Biospecies. – 2015. – Vol. 8, № 1.
18. Leaf litter decomposition – Estimates of global variability based on Yasso07 model / M. Tuomi et al // J. Liski. arXiv preprint. – 2009.
19. Forest litter decomposition and microbial functional diversity: comparative analyses of bacterial and fungal communities / P. Baldrian et al // Soil Biology & Biochemistry. – 2022. – Vol. 170. – P. 108666.

20. Cellulolytic bacterial consortia isolated from forest leaf litter and their enzymatic potentials / Y. Liu et al // Frontiers in Microbiology. – 2023. – Vol. 14. – P. 1189731.
21. Microbial decomposition of plant litter under contrasting soil nutrient conditions / J. Wang et al // Applied Soil Ecology. – 2024. – Vol. 187. – P. 104698.
22. Functional diversity of litter-inhabiting bacteria in temperate forests / X. Chen et al // Ecological Indicators. – 2023. – Vol. 150. – P. 107217.
23. Interactions between cellulolytic bacteria and fungi in leaf litter decomposition / M. Zhao et al // Microbial Ecology. – 2024. – Vol. 87. – P. 1011-1025.
24. Leaf litter quality and decomposition dynamics: microbial drivers and nutrient cycling / P. Martínez-García et al // Soil Biology & Biochemistry. – 2023. – Vol. 178. – P. 108995.
25. Biotechnological applications of cellulolytic bacteria in lignocellulosic waste management / R. Singh et al // Bioresource Technology Reports. – 2024. – Vol. 18. – P. 101123.

Источник финансирования

Данная исследовательская работа была профинансирована Министерством науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках грантового финансирования исследований молодых ученых по проекту «Жас ғалым» на 2025-2027 годы по ИРН AP25794005 «Разработка микробной композиции для получения ксилита из целлюлозы топинамбура».

С.С. Каримова[1]*, А.У. Исаева[2], А.Е. Тлеукеева[1]
[1]М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті,
160012, Қазақстан Республикасы, Шымкент қаласы, Тәуке хан даңғылы, 5
[2]Шымкент Университеті,
160031, Қазақстан Республикасы, Шымкент қаласы, Қаратау ауданы, Тассай шағын ауданы,
Жібек жолы көшесі, № 6 жер учаскесі
*e-mail: saulet_ka@mail.ru

ТҮРКІСТАН ОБЛЫСЫНЫҢ ӨСІМДІК ҚАЛДЫҚТАРЫНЫҢ МИКРОБИОЛОГИЯЛЫҚ СИПАТТАМАСЫ ЖӘНЕ ОЛАРДЫҢ ЛИГНОЦЕЛЛЮЛОЗА ШИКІЗАТЫН ӨҢДЕУ ПРОЦЕСТЕРІНДЕГІ БИОТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ ӘЛЕУЕТІ

Өсімдік қалдықтары көміртегі айналымында және гумустың түзілуінде шешуші рөл атқаратын экожүйенің маңызды құрамдас бөлігі және топырақ үшін органикалық заттардың көзі болып табылады. Құрғақ климатпен сипатталатын Түркістан облысының жағдайында өсімдік қалдықтарының микробтық әртүрлілігін зерттеу әсіресе целлюлоза мен полисахаридтердің ыдырау процестерін бағалауға қатысты.

Зерттеудің мақсаты өсімдік қалдықтарындағы целлюлозолитикалық микроорганизмдердің құрамын зерттеу және олардың биотехнологиялық қолдану үшін функционалдық әлеуетін бағалау болды. Жұмыстың негізгі бағыттарына бактериялар мен саңырауқұлақтарды оқшаулау, олардың морфологиялық және сандық сипаттамалары, MALDI-TOF идентификациясы және целлюлозаның ыдырауындағы және топырақ гумусының түзілуіндегі рөлін талдау кірді.

Зерттеудің ғылыми маңыздылығы құрғақ аймақтың өсімдік қалдықтарының микробтық қауымдастығының құрылымын нақтылау және целлюлозолитикалық бактериялар мен саңырауқұлақтар туралы Білімді кеңейтетін ферментативті белсенділігі жоғары түрлерді анықтау болып табылады. Жұмыстың практикалық маңыздылығы алынған деректерді өсімдік қалдықтарын өңдеудің биотехнологиялық тәсілдерін әзірлеу және топырақтың құнарлылығын арттыру үшін пайдалану болып табылады.

Әдістеме ретінде стандартты қоректік орталарда микроорганизмдерді оқшаулау, колонияларды морфологиялық бағалау, Коэ/г-да сандық анықтау, сондай-ақ микроорганизмдерді анықтаудың жоғары дәлдігін қамтамасыз ететін maldi-tof арқылы бактериялар мен саңырауқұлақтарды түрлерді анықтау қолданылды.

Зерттеу барысында Bacillus Cereus, Bacillus megaterium, Acinetobacter lwoffii бактериялары оқшауланды. Bacillus spp. талшықтар мен полисахаридтердің бастапқы ыдырауын қамтамасыз етіңіз, саңырауқұлақтар құрылымдық целлюлоза мен лигниннің ыдырауына қатысады, ал Acinetobacter lwoffii ыдыраудың жанама өнімдерін өңдейді және микробтық қауымдастықтың функционалды әртүрлілігін қолдайды.

Зерттеу аридті экожүйелердегі целлюлозолитикалық микроорганизмдердің функционалдық әртүрлілігін түсінуге үлес қосты және олардың Биотехнологиядағы рөлін атап өтті. Жұмыстың практикалық маңыздылығы ферменттік препараттарды құру, ауылшаруашылық қалдықтарын биоконверсиялау және аймақтың агроэкологиялық жүйелерінің тұрақты дамуына ықпал ететін био тыңайтқыштарды әзірлеу мүмкіндігі болып табылады.

Түйін сөздер: *целлюлозолитикалық микроорганизмдер, өсімдік қалдықтары, Түркістан облысы.*

S.S. Karimova[*], A.U. Issayeva[2], A.Ye. Tleukeyeva[1]
[1]M. Auezov South Kazakhstan University,
160012, Republic of Kazakhstan, Shymkent, 5 Tauke Khan Avenue,
[2]Shymkent University,
160031, Republic of Kazakhstan, Shymkent, Karatau district, Tassai subdistrict,
Zhibek Zholy street, land plot № 6
[*]e-mail: saulet_ka@mail.ru

MICROBIOLOGICAL CHARACTERISTICS OF PLANT RESIDUES OF THE TURKESTAN REGION AND THEIR BIOTECHNOLOGICAL POTENTIAL IN THE PROCESSING OF LIGNOCELLULOSE RAW MATERIALS

Plant remains are an important component of the ecosystem and a source of organic matter for soils, playing a key role in the carbon cycle and the formation of humus. In the conditions of the Turkestan region, characterized by an arid climate, the study of the microbial diversity of plant residues is especially important for assessing the decomposition processes of cellulose and polysaccharides.

The aim of the study was to study the composition of cellulolytic microorganisms in plant residues and to assess their functional potential for biotechnological applications. The main areas of work included the isolation of bacteria and fungi, their morphological and quantitative characteristics, identification by the MALDI-TOF method, as well as analysis of their role in the decomposition of cellulose and the formation of soil humus.

The scientific significance of the study lies in clarifying the structure of the microbial community of the plant remains of the arid region and identifying species with high enzymatic activity, which expands knowledge about cellulolytic bacteria and fungi. The practical significance of the work lies in using the data obtained to develop biotechnological approaches for processing plant residues and increasing soil fertility.

The methodology used was the isolation of microorganisms on standard nutrient media, morphological assessment of colonies, quantitative determination in CFU/g, as well as species identification of bacteria and fungi by the MALDI-TOF method, which ensured high accuracy in the determination of microorganisms.

The bacteria Bacillus cereus, Bacillus megaterium, and Acinetobacter lwoffii were isolated during the study. Bacillus spp. they provide the primary destruction of fiber and polysaccharides, fungi participate in the decomposition of more structured cellulose and lignin, and Acinetobacter lwoffii processes decomposition byproducts and supports the functional diversity of the microbial community.

The study has contributed to the understanding of the functional diversity of cellulolytic microorganisms in arid ecosystems and highlighted their role in biotechnology. The practical significance of the work lies in the possibility of creating enzyme preparations, bioconversion of agricultural waste and the development of biofertilizers that contribute to the sustainable development of the agroecological systems of the region.

Key words: *cellulolytic microorganisms, plant residues, Turkestan region.*

Сведения об авторах

Саулет Сабитхановна Каримова* – постдокторант, старший научный сотрудник, Южно-Казахстанский университет им. М. Ауезова, г. Шымкент, Республика Казахстан; e-mail: saulet_ka@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8231-1982.

Акмарал Умирбековна Исаева – доктор биологических наук, профессор, директор НИИ Экологии и биологии, Шымкентский Университет, г. Шымкент, Республика Казахстан; e-mail: akissayeva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8323-3982.

Асель Ержановна Тлеукеева – PhD, старший научный сотрудник, Южно-Казахстанский университет им. М. Ауезова, г. Шымкент, Республика Казахстан; e-mail: aseltleukeyeva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8821-8845.

Авторлар туралы мәліметтер

Саулет Сабитхановна Каримова* – постдокторант, аға ғылыми қызметкер, Оңтүстік Қазақстан университеті. М. Әуезова, Шымкент қ., Қазақстан Республикасы, e-mail: saulet_ka@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8231-1982

Акмарал Умирбековна Исаева – биология ғылымдарының докторы, профессор. Экология және биология ҒЗИ директоры, Шымкент университеті, Шымкент қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: akissayeva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8323-3982.

Асель Ержановна Тлеукеева – PhD, аға ғылыми қызметкер, Оңтүстік Қазақстан университеті. М. Әуезова, Шымкент қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: aseltleukeyeva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8821-8845.

Information about the authors

Saulet Sabitkhanovna Karimova* – postdoctoral researcher, Senior Researcher, M. Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Republic of Kazakhstan; e-mail: saulet_ka@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8231-1982.

Akmaral Umirbekovna Issayeva – Doctor of Biological Sciences, Professor. Director of the Research Institute of Ecology and Biology, Shymkent University, Shymkent, Republic of Kazakhstan; e-mail: akissayeva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8323-3982.

Assel Yerzhanovna Tleukeyeva – PhD, Senior Researcher, M. Auyezov South Kazakhstan University, Shymkent, Republic of Kazakhstan; e-mail: aseltleukeyeva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8821-8845.

Поступила в редакцию 30.03.2026
Поступила после доработки 17.05.2026
Принята к публикации 18.05.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-43

CC BY 4.0
Check for updates

ҒТАХР: 65.59.03

А.М. Муратбаев*, А.К. Какимов, М.М. Джумажанова
Шәкәрім университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинки к-сі, 20 А
*e-mail: great_mister@mail.ru

ТАУЫҚТЫҢ ЫСТАЛЫП – КЕПТІРІЛГЕН ТӨС ЕТІН QFD ӘДІСІ НЕГІЗІНДЕ ТАЛДАУ: САПА ҮЙІН ҚҰРУ ЖӘНЕ ӨНІМДІ ЖЕТІЛДІРУДІҢ БАСЫМ БАҒЫТТАРЫН АЙҚЫНДАУ

Аңдатпа: *Мақалада ысталып-кептірілген тауықтың төс етінің сапасын жүйелі талдау және жетілдіру мақсатында QFD (Quality Function Deployment) әдіснамасын қолдану нәтижелері ұсынылған. Зерттеудің өзектілігі ет өнімдері нарығындағы бәсекелестіктің күшеюімен, сондай-ақ тұтынушылардың өнім қауіпсіздігіне, табиғилығына және органолептикалық көрсеткіштерінің тұрақтылығына қоятын талаптарының артуымен негізделеді. Жұмыс барысында сауалнама жүргізу әдісін пайдалану арқылы маркетингтік зерттеу жүзеге асырылып, тұтынушылардың негізгі талаптары айқындалып, сандық тұрғыда бағаланды. Алынған деректер негізінде тұтынушылар талаптары мен өнімнің техникалық сипаттамалары арасындағы өзара байланыстарды көрсететін «Сапа үйі» матрицасы құрылды. Жүргізілген QFD-талдау ысталып-кептірілген тауықтың төс етінің техникалық сипаттамаларының тұтынушылар қанағаттануына ықпалын жүйелі түрде бағалауға мүмкіндік берді. Салмақталған коэффициенттер әдісін қолдану арқылы технологиялық параметрлердің салыстырмалы басымдылығы есептелді. Зерттеу нәтижесінде тұтынушылар қанағаттануына ең жоғары әсер ететін көрсеткіштер ретінде ылғалдың массалық үлесі (26,65%), рецептуралық құрам (25,48%) және сақтау параметрлері (18,26%) анықталды. Өнімнің қауіпсіздігі мен органолептикалық көрсеткіштеріне ықпал ететін ылғалдылық, ақуыз мөлшері және сақтау шарттары арасындағы технологиялық өзара тәуелділіктер айқындалды. Зерттеудің практикалық маңыздылығы нәтижелерді рецептураларды оңтайландыруда, технологиялық режимдерді жетілдіруде және ет өңдеу кәсіпорындарының бәсекеге қабілеттілігін арттыруда қолдану мүмкіндігімен сипатталады.*

Түйін сөздер: *QFD, сапа үйі, ысталып-кептірілген тауықтың төс еті, сапаны басқару, ет өнімдері, тұтынушылар талаптары.*

1. Кіріспе

Қазіргі заманғы ет деликатестері нарығы жоғары бәсекелестік деңгейімен және өнім сапасы мен қауіпсіздігіне қойылатын талаптардың күшеюімен сипатталады. Ысталып-

©А.М. Муратбаев, А.К. Какимов, М.М. Джумажанова, 2026

кептірілген тауықтың төс еті жоғары тағамдық құндылыққа ие өнімдер санатына жатады және ақуыз мөлшерінің жоғары болуына, майлылығының төмендігіне әрі айқын органолептикалық сипаттамаларына байланысты тұрақты сұранысқа ие [1-3].

Аталған өнім түрінің сапасы келесі факторлар кешенінің ықпалымен қалыптасады:

• шикізаттың қасиеттері;
• тұздау және ыстау режимдері;
• жетілу параметрлері;
• микробиологиялық қауіпсіздік;
• сақтау және қаптау шарттары.

Тағам өнімдерінің қауіпсіздігіне, қадағалануына және табиғилығына қойылатын талаптардың күшеюі, сондай-ақ ет өнімдері нарығындағы бәсекелестіктің артуы жағдайында тұтынушыға бағдарланған сапаны басқарудың жүйелі әдістерін енгізу қажеттілігі өсуде. Қазіргі өндірістік кәсіпорындар тек нормативтік талаптарға сәйкестікті қамтамасыз етіп қана қоймай, сонымен қатар табиғи құрамға, органолептикалық көрсеткіштердің тұрақтылығына және микробиологиялық қауіпсіздіктің кепілдігіне қатысты сатып алушылардың өзгермелі талғамдарын ескеруі тиіс. Осы жағдайларда «тұтынушы даусын» құрылымдауға және сандық тұрғыдан интерпретациялауға мүмкіндік беретін, оны өндіріс үдерісінде бақылауға және басқаруға болатын нақты технологиялық параметрлерге түрлендіретін құралдардың маңыздылығы ерекше артады [4-7].

Осындай құралдардың ішіндегі ең тиімділерінің бірі – өнімді жобалау кезеңінің өзінде тұтынушылар талаптарын өлшенетін техникалық сипаттамаларға жүйелі түрде түрлендіруге бағытталған QFD (Quality Function Deployment) әдіснамасы болып табылады. QFD әдісін қолдану тұтынушылардың күтулері мен шикізат параметрлері, рецептура, технологиялық режимдер және сақтау шарттары арасындағы себеп-салдарлық байланыстарды анықтауға, өнімді жетілдірудің басым бағыттарын белгілеуге, сондай-ақ дайын өнімнің нарықтық күтулерге сәйкес келмеу тәуекелін төмендетуге мүмкіндік береді. Осылайша, QFD әдіснамасын пайдалану басқарушылық шешімдерді қабылдаудың ғылыми негізделген жүйесін қалыптастыруға және тағам өнімдері нарығының қарқынды дамуы жағдайында кәсіпорынның бәсекеге қабілеттілігін арттыруға ықпал етеді [8-11].

Зерттеудің мақсаты – ысталып-кептірілген тауықтың төс етіне QFD-талдау жүргізу, Сапа үйін құру және технологияны жетілдірудің басым бағыттарын айқындау.

Зерттеудің ғылыми жаңалығы QFD әдіснамасын құс етінен өндірілетін өнімдерге сандық тұрғыда бейімдеуде және ысталып-кептірілген тауықтың төс еті бойынша тұтынушылық талаптар мен технологиялық параметрлер арасындағы өзара байланыстарды формализациялауда көрінеді; сапа факторларының салыстырмалы маңыздылығын есептеу негізінде олардың құрылымдық басымдылығын айқындауда; техникалық сипаттамалардың тұтынушылар қанағаттануы деңгейіне әсерін сипаттайтын сандық көрсеткіштерді анықтауда; сондай-ақ ылғалдың массалық үлесі, рецептуралық құрам және сақтау шарттары арасындағы технологиялық ымыраларды айқындап, өнімді жетілдірудің оңтайлы бағыттарын ғылыми тұрғыда негіздеуде айқындалады.

2. Зерттеу әдістемесі

Жұмысты орындау барысында тұтынушылар талаптарын қалыптастыруға және сандық өңдеуге, сондай-ақ QFD матрицасын («Сапа үйі») құруға бағытталған теориялық, социологиялық, статистикалық және аналитикалық әдістер кешені қолданылды.

2.1 Маркетингтік және социологиялық әдістер

Ысталып-кептірілген тауықтың төс етіне қатысты тұтынушылар талаптарын анықтау мақсатында сауалнама жүргізу әдісі қолданылды [12-13].

Сауалнама 2026 жылы Семей қаласында (Абай облысы) ет деликатестерін тұрақты сатып алатын тұтынушылар арасында жүргізілді. Зерттеу нысанасы ретінде қаладағы ірі сауда нүктелерінен ысталып-кептірілген құс еті өнімдерін сатып алушылардың мақсатты тобы алынды. Іріктеме көлемі зерттеу кезеңінде анықталған 1200 әлеуетті тұтынушының 10 %-ын құрап, 120 респонденттті қамтыды. Бұл көлем тұтынушылардың негізгі талаптарын салыстырмалы бағалау, орташа мәндерді есептеу және алынған нәтижелерді QFD матрицасында маңыздылық коэффициенттері ретінде қолдану үшін және бірінші жалпы көрініс көру үшін жеткілікті деп қабылданды.

Респонденттер жасы, жынысы және өнімді сатып алу жиілігі бойынша квоталық тәсілмен іріктелді, бұл мақсатты тұтынушылар тобының құрылымын теңгерімді көрсетуге мүмкіндік берді. Зерттеу нәтижелерін кеңейту мақсатында болашақта сауалнама географиясын басқа өңірлерге тарату және респонденттер санын арттыру көзделеді.

Сауалнама өнімнің органолептикалық, функционалдық, технологиялық және экономикалық сипаттамаларының маңыздылығын бағалауға бағытталған сұрақтарды қамтыды.

Талаптардың маңыздылығын бағалау бес балдық шкала бойынша жүргізілді (1 – ең төменгі маңыздылық, 5 – ең жоғары маңыздылық). Одан кейін әрбір талап бойынша орташа салмақталған баға есептелді.

2.2 QFD әдіснамасы

«Тұтынушы даусын» өнімнің техникалық параметрлеріне түрлендіру мақсатында QFD (Quality Function Deployment) әдіснамасы қолданылды. «Сапа үйін» құру келесі кезеңдерді қамтыды:

Тұтынушылар талаптарының тізбесін қалыптастыру (WHATs).

Өнімнің техникалық сипаттамаларын айқындау (HOWs).

Талаптар мен параметрлер арасындағы өзара байланыстарды белгілеу.

Техникалық сипаттамалардың салыстырмалы маңыздылығын есептеу.

Техникалық параметрлер арасындағы корреляцияны талдау.

Тұтынушылар талаптары мен техникалық сипаттамалар арасындағы өзара байланыс сараптамалық шкала бойынша бағаланды:

• 9 – күшті байланыс;

• 3 – орташа байланыс;

• 1 – әлсіз байланыс;

2.3 Техникалық параметрлердің салыстырмалы маңыздылығын есептеу

Әрбір техникалық параметрдің салыстырмалы маңыздылығы тұтынушылық талаптың маңыздылық коэффициенті мен сәйкес техникалық көрсеткішпен өзара байланыс дәрежесінің көбейтінділерінің қосындысы ретінде анықталды:

Әрбір техникалық сипаттама бойынша жиынтық баға келесі формула арқылы есептелді:

$$Sj=\sum(Wi\times Rij),$$

Мұндағы:

Wi – і-ші тұтынушылық талаптың маңыздылығы,

Rij – і-ші талап пен j-ші техникалық сипаттама арасындағы байланыс дәрежесі.

Одан кейін өнімді жетілдірудің стратегиялық бағыттарын айқындауға мүмкіндік беретін салыстырмалы басымдылық көрсеткіші (%) есептелді.

2.4 Деректерді статистикалық өңдеу

Сауалнама нәтижелерін статистикалық өңдеу сипаттамалық статистика әдістері арқылы жүргізілді. Алынған бастапқы деректер Microsoft Excel бағдарламасына енгізіліп, әрбір тұтынушылық талап бойынша орташа арифметикалық мән, стандартты ауытқу, стандартты қате және салыстырмалы үлестер есептелді. Бұл көрсеткіштер респонденттердің өнім сапасына қатысты талаптарының маңыздылық деңгейін сандық тұрғыда бағалауға мүмкіндік берді.

Әрбір көрсеткіш бойынша орташа мән бес балдық бағалау шкаласы негізінде анықталды. Орташа мән тұтынушылар үшін белгілі бір талаптың жалпы маңыздылығын сипаттаса, стандартты ауытқу мен стандартты қате жауаптардың шашырау деңгейін және алынған бағалардың тұрақтылығын бағалау үшін қолданылды. Сонымен қатар орташа мәндердің сенімділігін нақтылау мақсатында 95 % сенімділік интервалы есептелді.

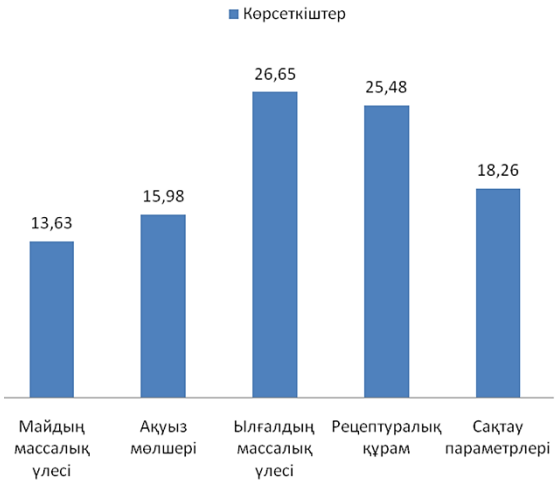
Сараптамалық және тұтынушылық бағалардың келісімділігін тексеру үшін вариация коэффициенті қолданылды:

$$V = (SD/M) \times 100\ \%,$$

мұндағы SD – стандартты ауытқу, M – орташа арифметикалық мән. Егер вариация коэффициенті 33%-дан төмен болса, жауаптардың біртектілігі қанағаттанарлық деп есептелді. Статистикалық өңдеу нәтижесінде алынған маңыздылық деңгейлері кейіннен QFD

матрицасында салмақталған коэффициенттер ретінде пайдаланылып, тұтынушылар талаптарын өнімнің техникалық сипаттамаларына түрлендіруге негіз болды.

Нәтижені визуализациялау үшін деректерді Сурет 1 көрсетілді.



Сурет 1 – QFD-талдау негізінде техникалық сипаттамалардың салыстырмалы басымдылығы

Диаграммада QFD-талдау нәтижелері бойынша ысталып-кептірілген тауықтың төс етінің сапасына әсер ететін техникалық сипаттамалардың салыстырмалы басымдылығы көрсетілген.

2.5 Зерттеудің нормативтік-құқықтық базасы

Техникалық сипаттамаларды қалыптастыру барысында қолданыстағы нормативтік құжаттардың талаптары ескерілді:

МЕМСТ 31476-2012 «Шикілей ысталып дайындалған ет өнімдері» [14];

МЕМСТ 32951-2014 «Ет өнімдері. Жалпы техникалық шарттар» [15];

«Ет және ет өнімдерінің қауіпсіздігі туралы» (Кеден одағының техникалық регламенті ТР ТС 034/2013) [16].

3.Зерттеу нәтижелері мен талқылау

QFD әдісі 1960-жылдары Жапонияда әзірленіп, алғашында машина жасау саласында кеңінен қолданылды, кейіннен тағам өнеркәсібінде де тарала бастады. Әдістің негізгі мақсаты – өнімді жобалау кезеңінде оның тұтынушылардың күтулеріне сәйкестігін қамтамасыз ету [17].

Тәжірибелік және бақылау үлгілерінің рецептурасы мен химиялық құрамын салыстыру кесте 1 берілген:

Кесте 1 – Тәжірибелік және бақылау үлгілерінің рецептурасы мен химиялық құрамын салыстыру

Көрсеткіш	Тәжірибелік үлгі	Бақылау (негізгі) үлгі
Шикізат көзі	Абай облысында өндірілген тауықтың төс еті	Астана қаласының сауда желісінен алынған үлгі
Рецептуралық бағыт	Табиғи дәмдеуіштерге және рецептуралық құрамды оңтайландыруға негізделген үлгі	Дәстүрлі өндірістік рецептура бойынша дайындалған үлгі
Майдың массалық үлесі, %	6	8
Ақуыз мөлшері, %	28	30
Ылғалдың массалық үлесі, %	52	50
Қаптама түрі	Вакуумдық қаптама	Вакуумдық қаптама
Мақсатты технологиялық мәндер	Май – 7%, ақуыз – 32%, ылғал – 55 %	Салыстыру базасы ретінде қолданылды

«Сапа үйін» құру үдерісі бірнеше дәйекті кезеңдерді қамтыды:

Бірінші кезең – тұтынушылар талаптарын қалыптастыру. Нарықты талдау және сауалнама нәтижелері негізінде ысталып-кептірілген тауықтың төс етіне қатысты тұтынушылардың негізгі талаптары айқындалды (кесте 2).

Кесте 2 – Талаптар тізбесі (WHATs)

№	Көрсеткіштер	Бағалау
1	Дәмі/иісі	5
2	Түсі және сыртқы көрінісі	4
3	Консистенциясы	4
4	Қауіпсіздігі	5
5	Бағасы	3

Ең жоғары маңыздылық көрсеткіштері ретінде дәмі мен қауіпсіздігі анықталды.

Екінші кезең – техникалық сипаттамаларды анықтау (HOWs). Өнімнің техникалық параметрлері ретінде келесілер айқындалды: майдың массалық үлесі, ақуыз мөлшері, ылғалдың массалық үлесі, рецептуралық құрам (табиғи ингредиенттер), сақтау шарттары (температура, қаптама, сақтау мерзімі).

Үшінші кезең – өзара байланыстар матрицасын құру және техникалық параметрлер арасындағы жетілдіру дәрежесі мен абсолюттік салмақтылығын есептеу. Талаптар мен техникалық сипаттамалар арасындағы байланыс келесі шкала бойынша бағаланды:

9 – күшті байланыс;

3 – орташа байланыс;

1 – әлсіз байланыс.

Өзара байланыстар матрицасы қалыптастырылды, ал алынған деректер кейіннен «Сапа үйіне» енгізіледі.

Жүргізілген QFD-талдау ысталып-кептірілген тауықтың төс етіне қатысты техникалық сипаттамалардың тұтынушылар қанағаттануына ықпалын жүйелі түрде бағалауға мүмкіндік берді. Құрылған өзара байланыстар матрицасы (3-кесте) негізінде өнім қауіпсіздігін қамтамасыз етуге қатысты параметрлердің, рецептуралық құрамның және ылғал көрсеткіштерінің ең жоғары жиынтық маңыздылыққа ие екендігі анықталды.

Кесте 3 – Өзара байланыс матрицасы

Параметрлер	Майдың массалық үлесі	Ақуыз мөлшері	Ылғалдың массалық үлесі	Рецептуралық құрам (табиғи ингредиенттер)	Сақтау (температура, қаптама, сақтау мерзімі)
Дәмі/иісі	9	3	3	9	3
Түсі және сыртқы көрінісі	3	1	9	3	3
Консистенциясы	3	9	9	1	3
Қауіпсіздігі	1	3	9	9	9
Бағасы	1	1	1	9	3

Өзара байланыс коэффициенттерін талдау нәтижесінде мыналар анықталды:

• «Қауіпсіздік» көрсеткіші сақтау параметрлері мен рецептуралық құраммен күшті байланысқа (9 балл) ие, сондай-ақ ылғалдың массалық үлесімен де елеулі өзара байланыс байқалады;

• органолептикалық сипаттамалар (дәмі/иісі) ең жоғары дәрежеде майдың массалық үлесіне және құрамның табиғилығына тәуелді;

• консистенция ақуыз бен ылғалдың массалық үлестерінің үйлесімімен анықталады, бұл жетілу және кептіру режимдерінің технологиялық маңыздылығын растайды;

• өнім бағасы негізінен рецептуралық құраммен және сақтау шарттарымен корреляцияланады.

Техникалық сипаттамалардың салыстырмалы басымдылығын есептеу нәтижелері (2-сурет) өнім сапасы құрылымында ең жоғары үлеске ие көрсеткіштерді анықтады:

Ылғалдың массалық үлесі – 26,65%;

Рецептуралық құрам (табиғи ингредиенттер) – 25,48%;

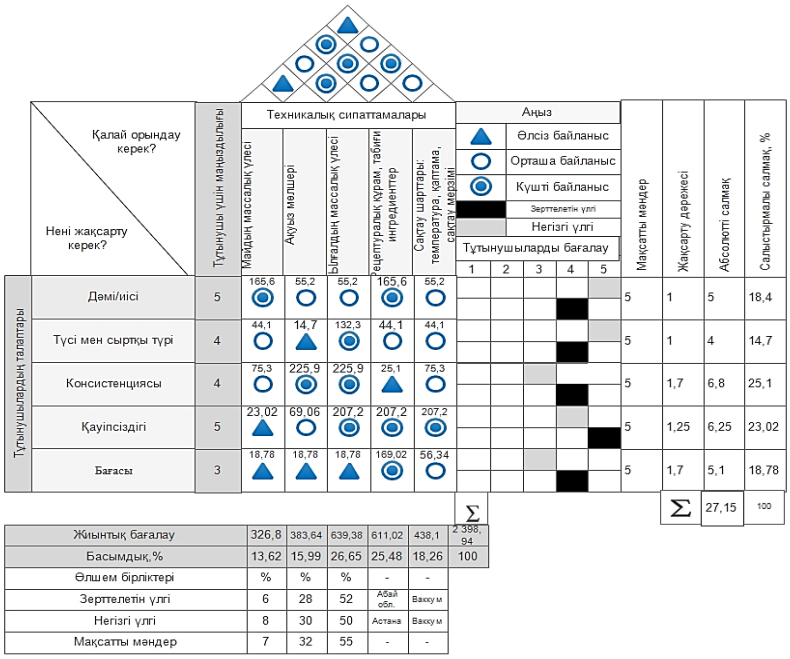
Сақтау параметрлері (температуралық режим, қаптама, сақтау мерзімі) – 18,26%;

Ақуыз мөлшері – 15,99%;

Майдың массалық үлесі – 13,62%.

Алынған нәтижелер тұтынушылардың ең алдымен өнімнің қауіпсіздігі мен табиғилығына бағдарланатынын көрсетеді, сонымен қатар органолептикалық көрсеткіштер бәсекеге қабілеттіліктің негізгі факторлары болып қала береді.

Төртінші кезең – «Сапа үйін» құру және техникалық параметрлер арасындағы корреляцияны талдау. Есептеу нәтижелері 2-суретте ұсынылған дайын «Сапа үйінде» көрсетілген.



Сурет 2 – QFD-талдау негізінде құрылған «Сапа үйі» матрицасы

«Сапа үйі» «шатырына» жүргізілген талдау техникалық сипаттамалар арасында оң, сондай-ақ ықтимал қайшылықты корреляциялардың бар екенін көрсетті. Мысалы:

• ылғалдың массалық үлесін төмендету сақтау мерзіміне оң әсер етеді, алайда консистенция мен шырындылықтың нашарлауына әкелуі мүмкін;

• ақуыз мөлшерін арттыру өнімнің құрылымын (текстурасын) жақсартуға ықпал етеді, бірақ өнімнің өзіндік құнының өсуіне себеп болуы ықтимал;

• қаптамаға қойылатын талаптарды күшейту (вакуумдық немесе модификацияланған газдық орта) қауіпсіздік пен сақтау мерзімін арттырады, дегенмен өндірістік шығындардың ұлғаюына әкеледі.

Зерттеудің практикалық маңыздылығы алынған нәтижелерді ысталып-кептірілген тауықтың төс еті рецептураларын әзірлеу және түзету кезінде, тұздау, кептіру және ыстау технологиялық режимдерін оңтайландыруда, өндірістік сапа бақылау жүйесін жетілдіруде және өнім қауіпсіздігін қамтамасыз етуде, сондай-ақ ассортиментті стратегиялық жоспарлау мен ет өңдеу саласы кәсіпорындарының бәсекеге қабілеттілігін арттыруда қолдану мүмкіндігімен айқындалады.

Нәтижелерді халықаралық зерттеулермен салыстыру QFD әдіснамасының тағам өнеркәсібінде, соның ішінде ет өнімдерін жобалау мен сапасын жетілдіруде тиімді құрал екенін көрсетеді. Шетелдік ғылыми еңбектерде QFD әдісі тұтынушы талаптарын өнімнің нақты техникалық сипаттамаларына түрлендіруге мүмкіндік беретін жүйелі әдіс ретінде қарастырылады [4, 5, 17]. Бұл әдіс өнім сапасын тек дайын өнім деңгейінде бақылауға емес, оны жобалау кезеңінен бастап тұтынушы сұранысына бейімдеуге бағытталған.

Deepu және Ravi еңбектерінде QFD тәсілі тұтынушы талаптары мен жобалау параметрлері арасындағы басымдықтарды анықтауда тиімді екені көрсетілген [4]. Авторлар тұтынушы үшін маңызды сипаттамаларды техникалық көрсеткіштермен байланыстыру арқылы өнімді жетілдірудің нақты бағыттарын белгілеуге болатынын атап өтеді. Осы тұрғыдан алғанда, біздің зерттеу нәтижелері аталған халықаралық тұжырымдармен сәйкес келеді, себебі ысталып-кептірілген тауықтың төс еті бойынша тұтынушы талаптары – дәмі, сыртқы

көрінісі, консистенциясы, қауіпсіздігі және бағасы – өнімнің май, ақуыз, ылғал мөлшері, рецептуралық құрамы және сақтау параметрлері сияқты техникалық сипаттамаларымен байланыстырылды.

Wang және Xiong зерттеуінде тағам өнімдері сапасын басқаруда QFD әдісінің маңыздылығы өнім қауіпсіздігі, сақтау тұрақтылығы және тұтынушы қанағаттануы арасындағы байланысты жүйелеумен түсіндіріледі [5]. Бұл тұжырым біздің зерттеу нәтижелерімен толық үйлеседі. Жүргізілген QFD-талдау нәтижесінде тұтынушылар қанағаттануына ең жоғары әсер ететін техникалық көрсеткіштер ретінде ылғалдың массалық үлесі – 26,65%, рецептуралық құрам – 25,48% және сақтау параметрлері – 18,26% анықталды. Бұл көрсеткіштер тағам өнімдерінде қауіпсіздік пен сақтау шарттарының шешуші рөл атқаратынын дәлелдейтін халықаралық зерттеулермен сәйкес келеді [5].

Ет өнімдеріне қатысты зерттеулерде QFD әдісін қолдану көбінесе жаңа өнім рецептурасын әзірлеу, органолептикалық көрсеткіштерді оңтайландыру, сақтау мерзімін ұзарту және қауіпсіздік көрсеткіштерін жақсарту мақсатында пайдаланылады [10, 11]. Зерттеуде де ылғалдың массалық үлесін төмендету сақтау мерзіміне оң әсер етуі мүмкін, алайда өнімнің шырындылығы мен консистенциясына кері ықпал ету қаупі бар. Сол сияқты ақуыз мөлшерін арттыру өнім құрылымын жақсартқанымен, өзіндік құнның өсуіне әкелуі мүмкін. Бұл ет өнімдерін жетілдіруге арналған зерттеулерде сипатталған технологиялық ымыралармен сәйкес келеді [10, 11].

Халықаралық зерттеулермен салыстырғанда, бұл жұмыстың өзіндік ерекшелігі – QFD әдіснамасының нақты бір өнімге, яғни ысталып-кептірілген тауықтың төс етіне бейімделуі. Көптеген зерттеулерде QFD жалпы тағам өнімдері немесе қызмет көрсету сапасы аясында қарастырылса [4, 5, 7], бұл жұмыста құс етінен дайындалатын ет деликатесінің сапасын қалыптастыратын нақты технологиялық факторлар талданды. Атап айтқанда, ылғал мөлшері, рецептуралық құрам және сақтау параметрлері тұтынушы қанағаттануына тікелей әсер ететін негізгі көрсеткіштер ретінде анықталды.

Осылайша, зерттеу нәтижелері халықаралық ғылыми еңбектердегі негізгі тұжырымдарды растайды: QFD әдісі тұтынушы талаптарын жүйелеуге, оларды өлшенетін техникалық сипаттамаларға түрлендіруге және өнімді жетілдірудің басым бағыттарын анықтауға мүмкіндік береді [4, 5, 17]. Сонымен қатар жүргізілген зерттеу QFD әдіснамасын Қазақстан жағдайында құс етінен өндірілетін ысталып-кептірілген өнімдерге қолданудың практикалық мүмкіндігін көрсетеді. Бұл әдіс ет өңдеу кәсіпорындарына өнім сапасын тұтынушы сұранысына бейімдеуге, сақтау тұрақтылығын арттыруға, рецептураны оңтайландыруға және бәсекеге қабілеттілікті жоғарылатуға мүмкіндік береді.

Осылайша, QFD-талдау нәтижелері технологиялық параметрлер, экономикалық факторлар және тұтынушылар күтулері арасындағы ұтымды тепе-теңдікті айқындауға мүмкіндік береді.

QFD әдіснамасын қолдану ет өңдеу саласында сапаны стратегиялық басқару құралы ретінде өзінің тиімділігін көрсетті, интуитивтік тәсілден формализацияланған шешім қабылдау жүйесіне көшуге жағдай жасайды.

Зерттеу шектеулері және болашақ зерттеу бағыттары

Зерттеу нәтижелерін интерпретациялау кезінде бірқатар шектеулерді ескеру қажет. Біріншіден, сауалнама бір өңірдегі, яғни Семей қаласындағы тұтынушылар пікіріне негізделгендіктен, алынған тұтынушылық басымдықтар барлық өңірлер мен нарық сегменттерін толық сипаттамауы мүмкін. Екіншіден, QFD матрицасындағы тұтынушылар талаптары мен техникалық сипаттамалар арасындағы байланыс коэффициенттері сараптамалық бағалауға сүйенеді, сондықтан оларды өндірістік сынақтар, сондай-ақ физика-химиялық, микробиологиялық және сенсорлық көрсеткіштер арқылы қосымша валидациялау қажет. Үшіншіден, зерттеу негізінен өнімді жобалау және жетілдіру басымдықтарын анықтау кезеңіне бағытталған.

Болашақ зерттеулерде респонденттер географиясын кеңейту, әртүрлі тұтынушылар сегменттері бойынша жеке QFD матрицаларын құру және алынған нәтижелерді өндірістік жағдайда тексеру көзделеді. Сонымен қатар ылғалдың массалық үлесі мен ақуыз мөлшерінің өнімнің органолептикалық қасиеттеріне, құрылымдық-механикалық сипаттамаларына және микробиологиялық тұрақтылығына әсерін эксперименттік жолмен анықтау маңызды бағыт

болып табылады. Бұл өнім рецептурасын нақтылау және технологиялық режимдерді ғылыми негізде оңтайландыруға мүмкіндік береді.

Қорытынды

Маркетингтік зерттеу нәтижесінде ысталып-кептірілген тауықтың төс етіне қатысты тұтынушылардың негізгі талаптары қалыптастырылып, сандық тұрғыда бағаланды, бұл ретте қауіпсіздік, дәм және құрамның табиғилығы көрсеткіштері ең жоғары маңыздылыққа ие болды.

Өнімнің техникалық сипаттамаларының тұтынушылар қанағаттануына әсер ету дәрежесін анықтауға мүмкіндік берген «Сапа үйі» өзара байланыстар матрицасы құрылды.

Салыстырмалы басымдылықты есептеу нәтижесінде өнімді жетілдірудің стратегиялық бағыттары ретінде мыналар айқындалды:

сақтау және қаптау шарттарын оңтайландыру;

рецептуралық құрамды табиғилыққа басымдық бере отырып бақылау;

ылғалдың массалық үлесін реттеу;

микробиологиялық көрсеткіштердің тұрақтылығын қамтамасыз ету.

Техникалық параметрлер арасындағы корреляциялық тәуелділіктер анықталды, бұл өнімді жобалау кезінде ықтимал технологиялық ымыраларды ескеруге мүмкіндік береді.

Ысталып-кептірілген тауықтың төс етін өндіруде QFD әдіснамасын қолдану өнімнің бәсекеге қабілеттілігін арттыруға, нормативтік құжаттар талаптарына сәйкессіздік тәуекелін төмендетуге және тұтынушылар қанағаттануын жоғарылатуға ықпал етеді.

Жалпы алғанда, QFD-талдауды қолдану ет өңдеу өнеркәсібі кәсіпорындарының сапаны басқару жүйесіне енгізудің мақсатқа сай екендігін дәлелдейді.

Әдебиеттер тізімі

1. Toldrá F. New insights into meat by-product utilization / F. Toldrá, L. Mora, M. Reig // Meat Science. – 2020. – Vol. 160. – P. 107-115.
2. FAO. The State of Food and Agriculture 2022. – Rome : FAO, 2022.
3. Забашта А.Г. Обеспечение безопасности мясной продукции в условиях современных требований / А.Г. Забашта, А.А. Кочеткова // Пищевая промышленность. – 2022. – № 7. – С. 12-16.
4. Deepu T. An integrated ANP–QFD approach for prioritization of customer and design requirements / T. Deepu, V. Ravi // Benchmarking: An International Journal. – 2020. – Vol. 28, № 4. – P. 1213-1246.
5. Wang X. Application of QFD in food industry quality management / X. Wang, Y. Xiong // Food Control. – 2021. – Vol. 123. – P. 107-118.
6. Нанның сапасын QFD әдісі арқылы жоғарлату / Ә.М. Мұратбаев және т.б. // Вестник ГУ имени Шакарима города Семей. – 2015. – № 4(72). – С. 46-49.
7. Altuntas S. An innovative and integrated approach based on SERVQUAL, QFD and FMEA for service quality improvement: A case study / S. Altuntas, S. Kansu // Kybernetes. – 2020. – Vol. 49, № 10. – P. 2419-2453. https://doi.org/10.1108/K-04-2019-0269.
8. Mardiyana E. Application of Quality Function Deployment Method for Tourism's City Branding Analysis / E. Mardiyana, S. Zakiah, D. Gusnadi // International Journal of Economics Development Research (IJEDR). – 2024. – Vol. 5, № 6. – P. 5064-5076. https://doi.org/10.37385/ijedr.v5i6.6880.
9. Natee S. Quality function deployment for buildable and sustainable construction / S. Natee, S.P. Low, E.A.L. Teo // Cham : Springer, 2016. https://doi.org/10.1007/978-3-319-17124-2.
10. Губер Н.Б. Разработка новых мясопродуктов с помощью QFD-методологии / Н.Б. Губер, Я.А. Глухова // Инновационные технологии в пищевой промышленности: наука, образование и производство: материалы конференции. – 2013. – С. 762-766.
11. Повышение качества вареных колбасных изделий с помощью QFD-методологии / О.В. Зинина и др. // Вопросы экономики и управления. – 2015. – № 1(1). – С. 35-38.
12. Добреньков В.И. Методы социологического исследования: учебник / В.И. Добреньков, А.И. Кравченко. – М.: ИНФРА-М, 2009. – 768 с.
13. Бабосов Е.М. Прикладная социология / Е.М. Бабосов. – Минск: ТетраСистемс, 2016. – 496 с.
14. ГОСТ 31476-2012. Продукты мясные сырокопченые. Общие технические условия. – Введ. 2013-07-01. – М.: Стандартинформ, 2013. – 16 с.

15. ГОСТ 32951-2014. Продукты мясные. Общие технические условия. – Введ. 2016-01-01. – М.: Стандартинформ, 2015. – 20 с.
16. ТР ТС 034/2013. О безопасности мяса и мясной продукции : технический регламент Таможенного союза. – Утв. Решением Совета Евразийской экономической комиссии от 09.10.2013 № 68. – Введ. 01.05.2014. – М., 2013.
17. Hauser J.R. The House of Quality / J.R. Hauser, D. Clausing // Harvard Business Review. – 1988. – Vol. 66, № 3. – P. 63-73.

References

1. Toldrá F. New insights into meat by-product utilization / F. Toldrá, L. Mora, M. Reig // Meat Science. – 2020. – Vol. 160. – P. 107-115. (In English).
2. FAO. The State of Food and Agriculture 2022. – Rome : FAO, 2022. (In English).
3. Zabashta A.G. Obespechenie bezopasnosti myasnoi produktsii v usloviyakh sovremennykh trebovanii / A.G. Zabashta, A.A. Kochetkova // Pishchevaya promyshlennost'. – 2022. – № 7. – S. 12-16. (In Russian).
4. Deepu T. An integrated ANP–QFD approach for prioritization of customer and design requirements / T. Deepu, V. Ravi // Benchmarking: An International Journal. – 2020. – Vol. 28, № 4. – P. 1213-1246. (In English).
5. Wang X. Application of QFD in food industry quality management / X. Wang, Y. Xiong // Food Control. – 2021. – Vol. 123. – P. 107-118. (In English).
6. Nannyn sapasyn QFD adisi arkyly zhogarlatu / Ә.M. Muratbaev zhane t.b. // Vestnik GU imeni Shakarima goroda Semei. – 2015. – № 4(72). – S. 46-49. (In Kazakh).
7. Altuntas S. An innovative and integrated approach based on SERVQUAL, QFD and FMEA for service quality improvement: A case study / S. Altuntas, S. Kansu // Kybernetes. – 2020. – Vol. 49, № 10. – P. 2419-2453. https://doi.org/10.1108/K-04-2019-0269. (In English).
8. Mardiyana E. Application of Quality Function Deployment Method for Tourism's City Branding Analysis / E. Mardiyana, S. Zakiah, D. Gusnadi // International Journal of Economics Development Research (IJEDR). – 2024. – Vol. 5, № 6. – P. 5064-5076. https://doi.org/10.37385/ijedr.v5i6.6880. (In English).
9. Natee S. Quality function deployment for buildable and sustainable construction / S. Natee, S.P. Low, E.A.L. Teo // Cham : Springer, 2016. https://doi.org/10.1007/978-3-319-17124-2. (In English).
10. Guber N.B. Razrabotka novykh myasoproduktov s pomoshch'yu QFD-metodologii / N.B. Guber, Ya.A. Glukhova // Innovatsionnye tekhnologii v pishchevoi promyshlennosti: nauka, obrazovanie i proizvodstvo: materialy konferentsii. – 2013. – S. 762-766. (In Russian).
11. Povyshenie kachestva varenykh kolbasnykh izdelii s pomoshch'yu QFD-metodologii / O.V. Zinina i dr. // Voprosy ehkonomiki i upravleniya. – 2015. – № 1(1). – S. 35-38. (In Russian).
12. Dobren'kov V.I. Metody sotsiologicheskogo issledovaniya: uchebnik / V.I. Dobren'kov, A.I. Kravchenko. – M.: INFRA-M, 2009. – 768 s. (In Russian).
13. Babosov E.M. Prikladnaya sotsiologiya / E.M. Babosov. – Minsk: TetraSistems, 2016. – 496 s. (In Russian).
14. GOST 31476-2012. Produkty myasnye syrokopchenye. Obshchie tekhnicheskie usloviya. – Vved. 2013-07-01. – M.: Standartinform, 2013. – 16 s. (In Russian).
15. GOST 32951-2014. Produkty myasnye. Obshchie tekhnicheskie usloviya. – Vved. 2016-01-01. – M.: Standartinform, 2015. – 20 s. (In Russian).
16. TR TS 034/2013. O bezopasnosti myasa i myasnoi produktsii : tekhnicheskii reglament Tamozhennogo soyuza. – Utv. Resheniem Soveta Evraziiskoi ehkonomicheskoi komissii ot 09.10.2013 № 68. – Vved. 01.05.2014. – M., 2013. (In Russian).
17. Hauser J.R. The House of Quality / J.R. Hauser, D. Clausing // Harvard Business Review. – 1988. – Vol. 66, № 3. – P. 63-73. (In English).

Қаржыландыру туралы ақпарат

Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғарғы білім министрлігінің Ғылым комитеті (Грант No BR24992938 «Құс ұшаларын кешенді өңдеудің прогрессивті технологиялық процестерін, әдістері мен шешімдерін ғылыми негіздеу, әзірлеу және енгізу») қаржыландырды.

А.М. Муратбаев*, А.К. Какимов, М.М. Джумажанова
Шәкәрім университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинки к-сі, 20 А
*e-mail: great_mister@mail.ru

QFD-АНАЛИЗ СЫРОКОПЧЕНЫХ КУРИНЫХ ГРУДОК: ПОСТРОЕНИЕ ДОМА КАЧЕСТВА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИОРИТЕТОВ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОДУКЦИИ

В статье представлены результаты применения методологии QFD (Quality Function Deployment) для системного анализа и совершенствования качества сырокопченой куриной грудки.. Актуальность исследования обусловлена усилением конкуренции на рынке мясной продукции, а также ростом требований потребителей к безопасности продукции, её натуральности и стабильности органолептических показателей.В ходе работы было проведено маркетинговое исследование с использованием метода анкетирования, что позволило выявить и количественно оценить основные требования потребителей. На основе полученных данных построена матрица «Дом качества», отражающая взаимосвязи между требованиями потребителей и техническими характеристиками продукции. Проведённый QFD-анализ позволил системно оценить влияние технических характеристик сырокопченой куриной грудки на удовлетворённость потребителей. С применением метода взвешенных коэффициентов была рассчитана относительная приоритетность технологических параметров. В результате исследования установлено, что наибольшее влияние на удовлетворённость потребителей оказывают следующие показатели: массовая доля влаги (26,65%), рецептурный состав (25,48%) и параметры хранения (18,26%). Выявлены технологические взаимозависимости между влажностью, содержанием белка и условиями хранения, оказывающие влияние на безопасность и органолептические характеристики продукта. Практическая значимость исследования заключается в возможности использования полученных результатов при оптимизации рецептур, совершенствовании технологических режимов и повышении конкурентоспособности предприятий мясоперерабатывающей отрасли.

Ключевые слова: *QFD, Дом качества, сырокопченые куриные грудки, управление качеством, мясная продукция, потребительские требования.*

A. Muratbayev*, A. Kakimov, M. Dzhumazhanova
Shakarim University,
071412, Republic of Kazakhstan, Semey, 20A Glinki St.
*e-mail: great_mister@mail.ru

QFD ANALYSIS OF DRY-CURED SMOKED CHICKEN BREAST: CONSTRUCTION OF THE HOUSE OF QUALITY AND IDENTIFICATION OF PRODUCT IMPROVEMENT PRIORITIES

The article presents the results of applying the QFD (Quality Function Deployment) methodology for the systematic analysis and improvement of the quality of dry-cured smoked chicken breast. The relevance of the study is обусловлена increasing competition in the meat products market, as well as the growing consumer demands for product safety, naturalness, and stability of organoleptic characteristics. In the course of the research, a marketing study was conducted using a questionnaire survey method, which made it possible to identify and quantitatively assess the key consumer requirements. Based on the obtained data, a House of Quality matrix was constructed, reflecting the relationships between consumer requirements and the technical characteristics of the product. The conducted QFD analysis enabled a systematic evaluation of the impact of the technical characteristics of dry-cured smoked chicken breast on consumer satisfaction. Using the weighted coefficient method, the relative priorities of technological parameters were calculated. The results showed that the indicators having the greatest influence on consumer satisfaction are moisture content (26.65%), formulation composition (25.48%), and storage parameters (18.26%). Technological interdependencies between moisture content, protein content, and storage conditions that affect product safety and organoleptic properties were identified. The practical significance of the study lies in the possibility of applying the obtained results to optimize formulations, improve technological regimes, and enhance the competitiveness of meat processing enterprises.

Key words: *QFD, House of Quality, dry-cured smoked chicken breast, quality management, meat products, consumer requirements.*

Авторлар туралы мәліметтер

Алибек Манарбекович Муратбаев* – PhD, «Биоинженерлік жүйелер» кафедрасының постдокторанты; Шәкәрім университеті, Қазақстан; e-mail:Great-mister@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0830-5007.

Айтбек Калиевич Какимов – техника ғылымдарының докторы, «Биоинженерлік жүйелер» кафедрасының профессоры, Шәкәрім университеті, Қазақстан; e-mail: bibi.53@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9607-1684.

Мадина Муратовна Джумажанова – PhD, «Биоинженерлік жүйелер» кафедрасының қауымдастырылған профессоры м.а., Шәкәрім университеті, Қазақстан; e-mail: madina.omarova.89@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9169-6722.

.

Сведения об авторах

Алибек Манарбекович Муратбаев* – PhD, постдокторант кафедры «Биоинженерных систем»; Шәкәрім университет, Казахстан; e-mail: Great-mister@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0830-5007.

Айтбек Калиевич Какимов – доктор технических наук, профессор кафедры «Биоинженерных систем», Шәкәрім университет, Казахстан; e-mail: bibi.53@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9607-1684.

Мадина Муратовна Джумажанова – PhD, и.о.ассоциированного профессора кафедры «Биоинженерных систем», Шәкәрім университет, Казахстан; e-mail: madina.omarova.89@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9169-6722.

Information about the authors

Alibek Muratbayev* – PhD, Postdoctoral Researcher, Department of Bioengineering Systems; Shakarim University, Kazakhstan; e-mail:Great-mister@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0830-5007.

Aitbek Kakimov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Bioengineering Systems, Shakarim University, Kazakhstan; e-mail: bibi.53@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9607-1684.

Madina Jumazhanova – PhD, Acting Associate Professor, Department of Bioengineering Systems, Shakarim University, Kazakhstan; e-mail: madina.omarova.89@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9169-6722.

Редакцияға енуі 30.03.2026
Өңдеуден кейін түсуі 03.05.2026
Жариялауға қабылданды 12.05.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-44

CC BY 4.0
Check for updates

ҒТАХР: 65.13.13

М.М. Какимов[1], А.Л. Касенов[1], М.Т. Мурсалыкова[2*], А.Д. Жолжаксина[2], Ж.Ж. Мустафин[1]
[1]С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті,
010000, Қазақстан Республикасы, Астана қаласы, Жеңіс даңғылы, 62
[2]Шәкәрім университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинки көшесі, 20 А
*e-mail: maigul_85@mail.ru

МАҚСАРЫ ДАҚЫЛДАРЫН ҚАУЫЗДАУ МАЙДЫҢ САПАЛЫҚ КӨРСЕТКІШТЕРІНЕ ӘСЕРІ

Аңдатпа: *Ұсынылған жұмыста мақсары дақылдарын қауыздау сатысының майдың сапасына, физика-химиялық көрсеткіштеріне, органолептикалық қасиеттері мен биохимиялық құрамына әсері зерттелді. Қауызсыздандырылмаған дақылдар мен қауыздалған ядродан алынған майдың қышқылдық және асқын тотығу сандары, ылғалдың массалық үлесі, тотығу тұрақтылығының динамикасы, май қышқылдарының құрамы мен минорлы компоненттердің (токоферолдар, фитомелан, хлорофиллдер) мөлшері салыстырмалы түрде талданды.*

Зерттеу нәтижелері қабықты алып тастау майдың органолептикалық қасиеттерін (дәмі, иісі, түсі, мөлдірлігі) айтарлықтай жақсартатынын, қышқылдық және асқын тотығу сандарын төмендететінін, ылғал мөлшерін азайтатынын және тотығуға төзімділігін арттыратынын көрсетті. Биохимиялық талдау линол және олеин қышқылдарының үлесінің артқанын, токоферол концентрациясының өскенін және фитомелан сияқты антинутриенттердің болмауын растады.

©М.М. Какимов, А.Л. Касенов, М.Т. Мурсалыкова, А.Д. Жолжаксина, Ж.Ж. Мустафин, 2026

Осылайша, дақылдарды қабықтан тазалау технологиясы майдың сапасы мен тағамдық құндылығын кешенді түрде жақсартып, оны қосымша қарқынды рафинацияны қажет етпейтін, тұтынуға дайын жоғары класс өнімге айналдырады. Зерттеу нәтижелері жоғары сапалы өсімдік майларын өндірудің технологиялық процестерін оңтайландыру үшін пайдаланылуы мүмкін. Зерттеу барысында алынған деректер қауыздау процесін оңтайландыру арқылы шикізатты кешенді өңдеудің тиімділігін арттыруға болатынын көрсетті. Ұсынылған технологиялық тәсілдер экологиялық тұрғыдан қауіпсіз, экономикалық жағынан тиімді және өндірістік жағдайда қолдануға бейімделген. Осы нәтижелер өсімдік майларын өндіру саласында инновациялық шешімдерді енгізуге және отандық өнімнің бәсекеге қабілеттілігін арттыруға негіз бола алады.

Түйін сөздер: *мақсары майы, қауыздау, физика-химиялық көрсеткіштер, органолептикалық қасиеттер, май қышқылдарының құрамы, токоферолдар, тотығу тұрақтылығы.*

Кіріспе

Мақсары майы (*Carthamus tinctorius L.*) құрамында көп мөлшерде көпқанықпаған май қышқылдары, токоферолдар, каротиноидтар және басқа да биологиялық белсенді компоненттер бар, тағам өнеркәсібі мен диетологияда кеңінен қолданылатын құнды өсімдік өнімі болып табылады. Ол айқын антиоксиданттық қасиеттерге ие, липидтік алмасуды қалыпқа келтіруге, жүрек-қантамыр жүйесінің қызметін жақсартуға және ағзаның жалпы иммундық қорғанысын қолдауға ықпал етеді [1, 2].

Май сапасы дақылдын сорттық және агротехникалық ерекшеліктерімен қатар, шикізатты өңдеу технологиясына да тәуелді. Дақылды өңдеуге дайындаудың негізгі сатыларының бірі – қабықтан тазалау, бұл процесс тұқымды ядро мен қабыққа бөлуге мүмкіндік береді. Дақыл қабығы құрамында талшық, ащы фенолдық қосылыстар, пигменттер және майдың органолептикалық қасиеттеріне, тотығу тұрақтылығына және биологиялық құндылығына теріс әсер етуі мүмкін ферменттер бар. Қабықты алып тастау майдың дәмінің тазалығын арттырады, ащылығын және мөлдір еместігін азайтады, пайдалы липидтер мен токоферолдардың концентрациясын көбейтеді, сондай-ақ дайын өнімнің сақтау мерзімін ұзартады [3, 4].

Қазіргі тағам өнеркәсібінің даму үрдістері жоғары тағамдық құндылығы бар, органолептикалық қасиеттері жақсарған және сақтау кезінде тұрақтылығы жоғары майларды өндіруге бағытталған. Сонымен қатар, тұқымдарды қабықтан тазалаудың мақсары майының физика-химиялық көрсеткіштеріне, биохимиялық құрамына және тағамдық құндылығына әсері жөніндегі кешенді деректер әлі де жеткіліксіз [4-6].

Осыған байланысты зерттеудің мақсаты – қауыздандырылмаған дақылдар мен қауыздалған ядродан алынған майды кешенді бағалау болып табылады. Бағалау барысында майдың органолептикалық қасиеттері, қышқылдық және асқын тотығу сандары, ылғалдың массалық үлесі, жеделдетілген сақтау кезінде тотығу тұрақтылығының динамикасы, май қышқылдарының құрамы және минорлы биологиялық белсенді компоненттердің (токоферолдар, фитомелан, хлорофиллдер) мөлшері талданды [7-9].

Зерттеу нәтижелері қауыздау технологиясының шикізатты бастапқы тазалау мен тұрақтандыру әдісі ретіндегі тиімділігін бағалауға, сондай-ақ жоғары сапалы және тағамдық құндылығы жоғары май өндіру үшін технологиялық процесті оңтайландыру бойынша ұсынымдар әзірлеуге мүмкіндік береді.

Зерттеу нысандары мен әдістері.

Зерттеу нысаны ретінде мақсары дақылдары пайдаланылды. Талдау үшін екі түрлі шикізат қолданылды: қауыздандырылмаған дақылдар – ядро мен қабықтан тұратын бүтін тұқымдар және қауыздалған дақылдар (ядро) – қабықтан тазалау және сепарациялау операциялары арқылы қабығы алдын ала алынған дақылдар [10].

Технологиялық өңдеу. Май алу үшін суық сығымдау әдісі кейінгі сүзу кезеңімен қолданылды. Негізгі өңдеу сатыларына мыналар кірді:

1. Қауыздау және сепарация – тұқымдарды ядро мен қабыққа бөлу;
2. Жоғары сапалы май алу мақсатында ядроны сығымдау;
3. Салыстыру үшін қауыздандырылмаған дақылдарды сығымдау, алынған май бақылау үлгісі ретінде пайдаланылды;
4. Механикалық қоспалар мен қатты бөлшектердің бір бөлігін кетіру үшін майды сүзу.

Органолептикалық бағалау. Майдың органолептикалық қасиеттері төрт көрсеткіш бойынша бағаланды: түсі, мөлдірлігі, иісі және дәмі, сондай-ақ жиынтық бағасы есепке алынды. Бағалау 10 балдық шкала бойынша жүргізілді, мұнда 10 балл – ащы дәмсіз, жағымсыз иіссіз, ашық түсті, мөлдір, таза жаңғақ дәмді майға сәйкес келді, ал 1 балл – күңгірт түсті, лайлы, айқын ащы және көгерген иісті майға берілді. Бағалау тәуелсіз сарапшылар тобы (n = 5) тарапынан жүргізіліп, нәтижелердің орташа мәні есептелді [11].

Физика-химиялық көрсеткіштер. Майдың тотығу тұрақтылығын және сапасын сипаттау мақсатында келесі параметрлер анықталды: қышқылдық саны (ҚС), мг КОН/г; асқын тотығу саны (АТС), ммоль O_2/кг; ылғалдың массалық үлесі, %; сондай-ақ асқын тотығу санының өсу кинетикасын бағалау үшін 60 °С температурада жеделдетілген тотығу сынағы жүргізілді [12].

Қышқылдық саны МемСТ 9172-2017 бойынша анықталды. Әдіс гидролизденген май қышқылдарын сілтімен титрлеуге негізделген. Май сынамасы этанол мен диэтил эфирінің қоспасында ерітіліп, фенолфталеин индикаторы қосылды және тұрақты ашық қызғылт түс пайда болғанға дейін 0,1 М калий гидроксиді ерітіндісімен титрленді.

Пероксид саны МемСТ 26616-2012 бойынша анықталды. Әдіс липидтердің асқын тотығуларын йодид-ионмен әрекеттесу нәтижесінде сандық анықтауға негізделген. Май сынамасы хлороформ мен калий йодидінің глюкозалы ерітіндісінің қоспасында ерітілді, содан кейін бөлінген йод крахмал индикаторының қатысуымен түсі жойылғанға дейін натрий тиосульфатының ерітіндісімен титрленді. Нәтижелер майдың бір килограмына шаққандағы ммоль O_2 түрінде өрнектелді.

Ылғалдың массалық үлесі МемСТ 6629-88 бойынша анықталды. Әдіс Карл Фишер титрлеуіне немесе май сынамасын бақыланатын температурада эксикаторда тұрақты массаға дейін кептіруге негізделген. Ылғалдың массалық үлесі алынған судың массасының сынама массасына қатынасы бойынша есептеліп, пайызбен өрнектелді [9].

Майдың тотығу кинетикасын бағалау үшін МемСТ 15527-2014-ке ұқсас жеделдетілген сынақ әдісі қолданылды. Май сынамасы 60 °С температурада термостатқа орналастырылып, асқын тотығу санының өзгерісі бірдей уақыт аралығында (0, 2, 4, 6, 8, 10 тәулік) өлшенді. Пероксид санының өсу динамикасы тотығудың индукциялық кезеңін бағалауға және қауыздандырылмаған дақылдар мен қауыздалған ядродан алынған майдың тұрақтылығын салыстыруға мүмкіндік берді.

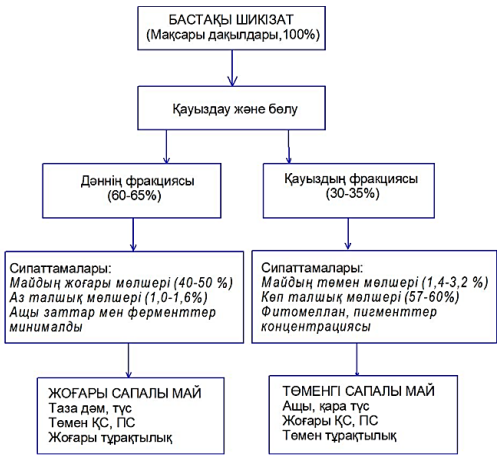
Биохимиялық талдау. Майдың тағамдық құндылығын бағалау үшін май қышқылдарының құрамы газдық хроматография әдісімен МемСТ 31779-2012 «Өсімдік майлары. Май қышқылдарының құрамын анықтау» стандартына сәйкес анықталды. қосымша компоненттер, соның ішінде токоферолдар, фитомелан және хлорофиллдер, спектрофотометрия және жоғары тиімді сұйық хроматография (ЖТСХ) әдістерімен МемСТ 32119-2013 бойынша зерттелді [13].

Эксперименттік деректерді статистикалық өңдеу (*Minitab* / *SPSS* / *Statistica* бағдарламаларының көмегімен) жүргізілді. Барлық тәжірибелер үш рет қайталанды (n = 3). Нәтижелер орташа мән ± стандарттық ауытқу (Mean ± SD) түрінде ұсынылды. Айырмашылықтардың маңыздылығын бағалау үшін бірфакторлы дисперсиялық талдау (ANOVA) және Тьюки тесті қолданылды. Айырмашылықтар $p < 0,05$ болған жағдайда статистикалық мәнді деп қабылданды.

Нәтижелер

Жүргізілген салыстырмалы талдау нәтижесінде қауыздандырылмаған және қауыздалған дақылдардан алынған мақсары майының негізгі сапа көрсеткіштері бойынша статистикалық тұрғыда мәнді айырмашылықтар анықталды. Алынған деректер қауыздау технологиясының тиімділігін көрнекі түрде көрсету мақсатында егжей-тегжейлі талқылауды және нәтижелерді визуализациялауды қажет етеді.

1-суретке сәйкес, қабықтан тазалау және сепарациялау операциясының нәтижесінде мақсары дақылдары екі негізгі фракцияға – ядро мен қабық (қалдық) фракцияларына бөлінетіні көрінеді.



Сурет 1 – Қабықтан тазалау сатысының өнделетін шикізаттың құрамына және дайын майдың қасиеттеріне әсері

Бастапқы шикізат майлы ядродан және талшыққа, пигменттер мен ферменттерге бай тығыз қабықтан тұратын бүтін мақсары дақылдарынан құралған. Қабықтан тазалау процесінен кейін дақылдар физика-химиялық қасиеттері мен технологиялық мақсаты әртүрлі екі бөлікке бөлінеді.

Ядро фракциясы (60-65%) майдың негізгі бөлігін (59-64%) құрайды, талшық мөлшері төмен (1,0-1,6%) және ащы заттар мен ферменттер аз мөлшерде болады. Осы фракциядан алынған май келесі сипаттамалармен ерекшеленеді:

· дәмі мен түсінің тазалығы;

· қышқылдық (ҚС) және переоксид (ПС) сандарының төмендігі;

· тотығуға жоғары төзімділік.

Мұндай май жоғары сапалы тағамдық майлар санатына жатады және қарқынды рафинациясыз қолдануға жарамды.

Қабық фракциясы (қалдық, 30-35%) майдың небәрі 1,4-3,2%-ын құрайды, алайда ол талшыққа (57-60%) өте бай және құрамында фитомелан, пигменттер, ферменттер мен басқа да қоспалар шоғырланған. Қауыздандырылмаған дақылдардан немесе қалдықтан сығымдалған май қою түсті, ащы дәмді, қышқылдық (ҚС) және переоксид (ПС) сандары жоғары, сондай-ақ сақтау кезінде тұрақтылығы төмен болып сипатталады.

Осылайша, бұл сызба қабықтан тазалау операциясының шикізатты бастапқы тазалау мен тұрақтандырудың шешуші кезеңі ретіндегі маңызды рөлін көрсетеді. Бұл процесс майдың шығымын арттырып қана қоймай, оның органолептикалық және физика-химиялық көрсеткіштерін айтарлықтай жақсартады. Қабықтан тазалау жоғары сапалы мақсары майын өндіру технологиясындағы негізгі буын болып табылады.

Органолептикалық қасиеттер. Қабықтың маңызды рөлі. Қауыздандырылмаған дақылдар мен қауыздалған ядродан алынған мақсары майының сезімдік сипаттамалары талданды. Негізгі мақсат – тұқым қабығының майдың дәміне, иісіне, түсі мен мөлдірлігіне, сондай-ақ тұтынушының жалпы органолептикалық қабылдауына әсерін анықтау.

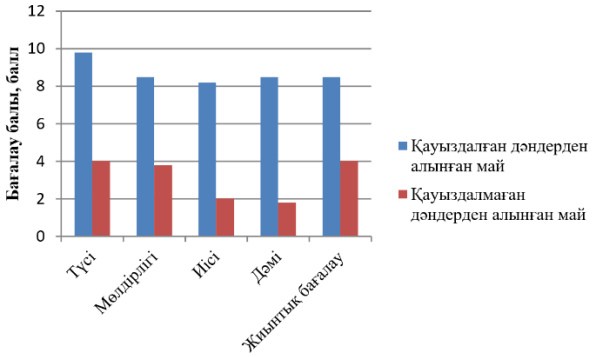
Негізгі назар майлардың органолептикалық бағалаудың негізгі параметрлері бойынша салыстырмалы талдауына аударылды, бұл қабықты алып тастау өнімнің дәмдік және хош иістік қасиеттерін қалай жақсартатынын айқын көрсетеді. Ұсынылған деректер қауыздау технологиясының әсерін және жоғары сапалы май қалыптастырудағы оның шешуші маңызын көрнекі түрде дәлелдейді.

Тұтынушы үшін ең айқын және маңызды айырмашылық сенсорлық сипаттамаларда байқалады. Бүтін дақылдардан алынған май айқын білінетін, жойылуы қиын ащы дәмге және шөп тектес-күңгірт реңкті дәм мен иіске ие. Бұл дақыл қабығынан майға ащы полярлы заттардың, негізінен фитомеланның (қабығында 6,9%-ға дейін) және оған ілесетін фенолдық қосылыстардың өтуінің тікелей салдары болып табылады. Сонымен қатар, қызғылт реңі бар қою сары түс пен бұлыңғырлық майды сығу кезінде қабықтан көп мөлшерде бояғыш пигменттердің (хлорофилдер, каротиноидтар) және балауыз тәрізді заттардың экстракциялануымен түсіндіріледі.

Керісінше, қауызынан тазартылған дәннен алынған май жоғары сапалы өсімдік майларына тән таза, жұмсақ, жаңғақ тәрізді дәм мен иіске және тартымды ашық сары, мөлдір түске ие. Бұл оны қосымша терең тазартусыз-ақ тұтынуға дайын етеді және табиғи биологиялық белсенді заттардың көбірек сақталуына мүмкіндік береді.

Физика-химиялық көрсеткіштер және тотығуға тұрақтылық. Мақсары майының тотығуға және гидролизге тұрақтылық дәрежесін бағалау үшін сапаның негізгі көрсеткіштері – қышқылдық саны (ҚС), переоксид саны (ПС) және ылғалдың массалық үлесі бойынша салыстырмалы талдау жүргізілді.

Бұл параметрлер майдың балғындық көрсеткіштері болып табылады және липидтердің гидролизі мен тотығу процестерінің жүру қарқындылығын көрсетеді, олар дайын өнімнің сақтау мерзімі мен органолептикалық қасиеттеріне едәуір әсер етеді (сурет 2).

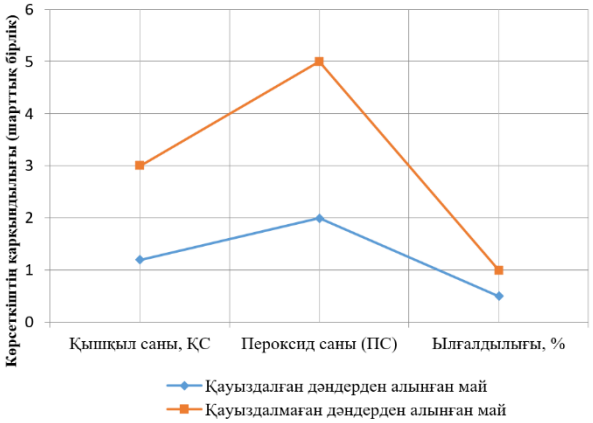


Сурет 2 – Мақсары майының органолептикалық бағалау нәтижелері

Эксперименттік деректер негізінде қауыздалмаған және қауызынан тазартылған тұқымдардан (ядродан) алынған майлардың айырмашылықтарын көрсететін график құрылды.

Мұндай салыстыру қабықты алу сатысының бастапқы тотығу өнімдері мен ылғал жиналу деңгейін төмендетуге әсерін көрнекі түрде көрсетуге, сондай-ақ қабықты жою технологиялық операциясының тұрақтандырушы рөлін растауға мүмкіндік береді.

3-сурет майдың тотығу және гидролиздік бұзылу дәрежесін сипаттайтын негізгі көрсеткіштерге – қышқылдық санына (ҚС), переоксид санына (ПС) және ылғалдылыққа – қауыздан тазарту сатысының әсерін көрнекі түрде көрсетеді.



Сурет 3 – Мақсары майының тотығу арқылы бұзылуының негізгі көрсеткіштерін салыстыру

Қауыздалмаған тұқымдардан алынған май барлық үш параметр бойынша айтарлықтай жоғары мәндерге ие. Қышқылдық саны шамамен ~3,0 мг КОН/г, бұл тұқым қабығында болатын липаз ферменттерінің әсерінен майлардың айқын гидролиздік үдерістерін көрсетеді. Асқын тотығы саны (шамамен 5,0 ммоль O_2/кг) липидтердің тотығуының бастапқы сатыларының дамуын білдіреді. Ылғалдылықтың жоғары болуы (шамамен 1,0 %) өнімнің бұзылуын және тұрақсыздығын жылдамдатады.

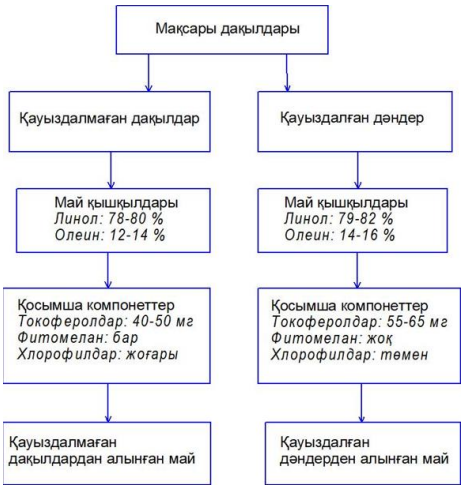
Қауызынан тазартылған тұқымдардан (ядродан) алынған май көрсеткіштердің едәуір төмен мәндерін көрсетеді: ҚС ≈ 1,2 мг КОН/г және АТС ≈ 2,0 ммоль O_2/кг – бұл қауыздалмаған шикізатқа қарағанда шамамен 2,5-3 есе төмен, ал ылғалдылығы ≈ 0,4 %, бұл жақсы сүзілуді және қабықтағы ылғал ұстайтын бөлшектердің болмауын дәлелдейді.

Осылайша, қабықты жою тотығу мен гидролизді туындататын ферменттердің, ылғалдың және пигменттердің негізгі көздерін тиімді түрде жояды.

Зерттеу нәтижелері мақсары тұқымдарын қауызынан тазарту майдың тотығуға тұрақтылығын және сапасын айтарлықтай арттыратынын, сонымен қатар сақтау мен тағамдық қолдануға неғұрлым төзімді және қауіпсіз өнім қалыптастыратынын дәлелдейді.

Биохимиялық құрамы және тағамдық құндылығы. Бұл бөлімде шикізатты алдын ала өңдеу сатысына – қауыздалмаған тұқым мен қауызынан тазартылған ядроға – байланысты мақсары майының биохимиялық құрамындағы өзгерістер қарастырылады. Ерекше назар май қышқылдарының құрамына, минорлы компоненттердің (токоферолдар, фитомелан, хлорофиллдер) концентрациясына және олардың майдың тағамдық құндылығы мен тұрақтылығына әсеріне аударылады.

Биохимиялық көрсеткіштерді талдау қауызын алу операциясының тиімділігін тек қабықты бөлу әдісі ретінде ғана емес, сонымен қатар өнім сапасын арттыру, пайдалы компоненттерді сақтау және дайын өнімнің органолептикалық қасиеттерін жақсарту құралы ретінде бағалауға мүмкіндік береді. Ұсынылған деректер технологиялық өңдеудің май құрамына қалай әсер ететінін және жоғары тағамдық құндылығы бар премиум санатындағы өнім қалыптастыратынын көрнекі түрде көрсетеді.



Сурет 4 – Қауыздалғаннан кейін майдың биохимиялық құрамындағы өзгерістер

Майдың май қышқылдары құрамын талдау көрсеткендей, қауыздан тазарту май қышқылдары профиліне теріс әсер етпейді, кейбір аспектілерде тіпті жақсартады.

Ядродан алынған майда линолеин және олеин қышқылдарының үлесі сәл арту тенденциясы байқалады. Бұл май қабығының (оның құрамында май тек 1,4-3,2%) жойылуымен және ядро липидтерінің салыстырмалы түрде шоғырлануымен түсіндіріледі.

Қауыздан тазартылған тұқымдардан алынған майдағы токоферолдардың мөлшері 25%-дан астам өскен (55–65 мг/100 г қарсы 40–50 мг/100 г) екі себеппен түсіндіріледі: олардың ядродан жоғары шоғырлануы және қабық компоненттері тудыратын тотығуды тежейтін шығынның аз болуы.

Сапалық талдау ядродан алынған майда фитомелан мен ащы фенолдардың мүлде жоқ екенін растады [14].

Алынған нәтижелерді талдау зерттелген үлгілер арасындағы айырмашылықтардың статистикалық тұрғыдан мәнді екенін көрсетті ($p < 0,05$), бұл технологиялық параметрлердің май сапасына әсерін дәлелдейді. Кейбір жағдайларда ($p > 0,05$) айырмашылықтар статистикалық тұрғыдан мәнсіз деп бағаланды.

Талқылау

Жүргізілген зерттеу нәтижелері мақсары тұқымдарын қауыздан ажырату процесінің май сапасына әсері тек механикалық бөлінуімен шектелмей, күрделі физика-химиялық және биохимиялық механизмдермен түсіндірілетінін көрсетті. Бұл нәтижелер өсімдік майларын өңдеу технологиясы саласындағы заманауи зерттеулермен сәйкес келеді [15-17].

Тұқым қабығы құрамында құрылымдық полисахаридтермен қатар фенолдық қосылыстар, фитомелан, пигменттер (хлорофиллдер, каротиноидтар), сондай-ақ липолитикалық ферменттер (липаза, липоксигеназа) болады. Бұл компоненттер майды сығу кезінде экстракцияланып, липидтердің тотығу және гидролиз процестерін жеделдетеді. Липаза ферментінің әсерінен триацилглицеридтердің гидролизі жүреді, нәтижесінде бос май қышқылдары түзіліп, қышқылдық санының өсуіне әкеледі. Сонымен қатар, липоксигеназа көпқанықпаған май қышқылдарының (әсіресе линол қышқылының) тотығуын катализдеп, гидропероксидтердің түзілуіне ықпал етеді [18].

Қабықтағы пигменттік қосылыстардың, әсіресе хлорофиллдердің болуы фотототығу процестерін күшейтеді, себебі олар жарық әсерінен синглетті оттегінің түзілуін белсендіреді. Бұл механизм майдың тотығу тұрақтылығын төмендететін негізгі факторлардың бірі болып табылады [19].

Осылайша, қауыздау процесі прооксиданттық қосылыстар мен ферменттердің негізгі бөлігін жою арқылы майдың бастапқы сапасын арттырады және тотығу тұрақтылығын жоғарылатады. Ұқсас нәтижелер басқа зерттеулерде де көрсетілген, мұнда тұқымды қабықтан тазалау май сапасының жақсаруына әкелетіні дәлелденген [20].

Мақсары майының тұрақтылығы бірнеше негізгі факторларға тәуелді. Біріншіден, оның құрамында линол қышқылының жоғары болуы (70-80%) майды тотығуға бейім етеді. Сонымен қатар, токоферолдар табиғи антиоксидант ретінде әрекет етсе, хлорофиллдер мен металл иондары прооксиданттық әсер көрсетуі мүмкін. Ылғалдың болуы гидролитикалық процестерді жеделдетіп, қышқылдық санының артуына әкеледі. Ал ферменттердің болуы (әсіресе липаза мен липоксигеназа) тотығу реакцияларын катализдейді. Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, қауыздалған шикізаттан алынған майда қышқылдық және переоксид сандарының төмендеуі осы факторлардың кешенді түрде әлсіреуімен түсіндіріледі. Дегенмен, қауыздау процесі май тұрақтылығын толық қамтамасыз етпейді. Жоғары температура, қысым немесе оттегімен ұзақ жанасу жағдайында тотығу процестері қайта күшеюі мүмкін [21].

Осыған байланысты қауыздау технологиясын басқа технологиялық әдістермен үйлестіре қолдану ұсынылады, мысалы, төмен температуралы сығымдау, инертті ортада өңдеу және тиімді сүзу жүйелері [22].

Алынған нәтижелердің өндірістік маңызы жоғары және бірнеше бағытта көрінеді. Біріншіден, қауыздалған ядродан алынған майдың органолептикалық және физика-химиялық көрсеткіштері жоғары болғандықтан, оны терең рафинациясыз қолдануға мүмкіндік бар, бұл өндіріс шығындарын төмендетеді. Екіншіден, қабықтың жойылуы сығымдау процесін жеңілдетіп, май шығымын арттыруға және энергия шығынын азайтуға ықпал етеді. Үшіншіден, тотығу тұрақтылығының жоғарылауы өнімнің сақтау мерзімін ұзартады және оның сапасын ұзақ уақыт сақтауға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, қабық фракциясын қосалқы өнім ретінде пайдалану мүмкіндігі (мал азығы, функционалдық ингредиент) өндірістің экономикалық тиімділігін арттырады [23].

Қазіргі зерттеулер көрсеткендей, қауыздау процесін пневмосепарация және реттелетін қысымы бар престеу жүйелерімен біріктіру жоғары сапалы өсімдік майларын өндірудің перспективалы бағыты болып табылады.

Осылайша, қауыздау процесі май сапасын жақсартудың негізгі технологиялық кезеңдерінің бірі болып табылады. Оның тиімділігі ферменттік белсенділікті төмендету, прооксиданттарды жою және антиоксиданттардың салыстырмалы үлесін арттыру арқылы жүзеге асады. Бұл нәтижелер мақсары майын өндірудің өнеркәсіптік технологиясын оңтайландыруда қауыздауды міндетті кезең ретінде қарастыру қажет екенін көрсетеді және халықаралық зерттеулермен толық сәйкес келеді.

Қорытынды

Жүргізілген зерттеу көрсеткендей, мақсары дақылдарын қауызынан тазарту майдың сапасына кешенді түрде оң әсер етеді. Қауыздан тазартылған ядродан алынған май ашық

сары түсі мен мөлдірлігімен, жұмсақ жаңғақ тәрізді дәмі мен таза иісімен ерекшеленеді, ал қауыздалмаған тұқымнан алынған майда айқын ащы дәм және шөптекті күңгірт рең байқалады. Органолептикалық бағалау көрсеткендей, ядродан алынған майдың жалпы ұпайы бүтін тұқым майымен салыстырғанда екі есе жоғары.

Физика-химиялық көрсеткіштер де жақсарды: қышқылдық және переоксид сандары екі есеге жуық төмендеді, ал ылғалдың массалық үлесі азайды. Жылдамдатылған сынақтар ядродан алынған майдың сақтау кезінде тұрақтылығы жоғары екенін көрсетті. Биохимиялық талдау полиқанықпаған және моноқанықпаған май қышқылдарының үлесінің өскенін, токоферолдардың мөлшерінің артқанын және фитомеланның мүлдем жоқ екенін анықтады.

Қауыздан тазарту технологиясы ащылықты, ылғалдылықты, ферменттерді және прооксиданттарды кетіру арқылы майды кешенді түрде жақсартады, нәтижесінде өнім жоғары санатында, органолептикалық және биохимиялық қасиеттері жақсартылған болып шығады.

Әдебиеттер тізімі

1. Nieto G. Plant source: Vegetable oils. In Food Lipids; Elsevier: Amsterdam / G. Nieto, J.M. Lorenzo // The Netherlands. – 2022. – P. 69-85. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823371-9.00011-3.
2. Edible Plant Oil: Global Status, Health Issues, and Perspectives / Y. Zhou et al // Front. Plant Sci. – 2020. – № 11. – P. 1315. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01315.
3. Ergönül, P.G. Cold pressed safflower (Carthamus tinctorius L.) seed oil. In Cold Pressed Oils / P.G. Ergönül, Z.A. Özbek // Academic Press: Cambridge, MA, USA. – 2020. – P. 323-333. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818188-1.00027-4.
4. Safflower (Carthamus tinctorius) seed. In Oilseeds: Health Attributes and Food Applications / M. Nazir et al // Springer: Cham, Switzerland. – 2021. – P. 427-453. https://doi.org/10.1007/978-3-030-74085-4_17.
5. Shahidi F. Lipid oxidation and improving the oxidative stability / F. Shahidi, Y. Zhong // Chem. Soc. Rev. – 2018. – № 47. – P. 257-278. https://doi.org/10.1039/C7CS00566E.
6. Ramadan M.F. Functional properties, nutritional value, and industrial applications of safflower oil / M.F. Ramadan // Crit. Rev. Food Sci. Nutr. – 2019. – № 59. – P. 227-241. https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1363713.
7. The formation, determination and health implications of polar compounds in edible oils: Current status, challenges and perspectives / J. Chen et al // Food Chem. – 2021. – № 364. – P. 130451. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130451.
8. Gunstone F.D. Vegetable Oils in Food Technology: Composition, Properties and Uses. 2nd ed. / F.D. Gunstone // Wiley-Blackwell. – 2018. https://doi.org/10.1002/9781119015949.
9. Abd El-Baset, W.S.; Almoselhy, R.I.M.Physicochemical characteristics and nutritional value of safflower oil. Nor. Afr. J. Food Nutr. Res., 2024.
10. Shagyn ondiristik tsekhtar zhagdaiynda maksary maiyn ondiruge arnalgan press zhabdygyn zhetildiru / M.T. Mursalykova zhane t.b. // Almaty tekhnologiyalyk universitetinin khabarshysy. – 2022. – № 1. – B. 58-65. (In Kazakh).
11. GOST 18848-2019. Vegetable oils. Determination of organoleptic and physical and chemical indicators. – Introduced. 2020-06-01. – Moscow: Mezhgosstandart Russia: Publishing House of Standards, 2019. – IV, 18C: ill. (In Russian).
12. GOST 5477-93. vegetable oils. The technique of determining the color. – Introduction. 1993-10-21.Moscow:Mezhgosstandart Russia: Publishing House of Standards, 1993. – IV, 8C: ill. (In Russian).
13. GOST 5481-2014.opredelenie massovoi doli osadka i bezmaslyanykh smesei. – Vved. 2016-01-01. – M.: Mezhgosstandart Rossiya: Izd-vo standartov, 2015. – IV, 12S: il. (In Russian).
14. Improving the Technology of Primary Purification of the Safflower Oil Using Secondary Products of Processing on a Biological Basis / B. Iskakov et al // Foods. – 2023. – T. 12, № 17. – P. 3275. https://doi.org/10.3390/foods12173275.
15. Matthäus B. Safflower (Carthamus tinctorius L.) oil: Composition, quality and applications / B. Matthäus, M.M. Özcan, // European Journal of Lipid Science and Technology. – 2019. – № 121(2), 1800322. https://doi.org/10.1002/ejlt.201800322.
16. Ramadan M.F. Functional properties, nutritional value and industrial applications of safflower oil / M.F. Ramadan // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. – 2019. – № 59(14). – P. 227-241. https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1363713.

17. Latif S. Effect of dehulling on oil yield and quality of oilseed crops / S. Latif, F. Anwar // Journal of Food Engineering. – 2018. – № 216. – P. 70-78. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.07.023.
18. Choe E. Mechanisms and factors for edible oil oxidation / E. Choe, D.B. Min // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. – 2018. – № 17(4). – P. 956-980. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12365.
19. Gharby S. Influence of processing on oxidative stability of edible oils / S. Gharby, H. Harhar, Z. Charrouf // Food Chemistry. – 2021. – № 345. – P. 128-140. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128140.
20. Suri K. Impact of seed coat removal on oil properties / K. Suri, B. Singh, A. Kaur // Journal of Food Science and Technology. – 2021. – № 58. – P. 1123-1132. https://doi.org/10.1007/s13197-020-04667-5.
21. Kumar S. Effect of processing conditions on oil stability / S. Kumar, B. Singh, A. Kaur // Food Research International. – 2020. – № 137. – P. 109-120. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109120.
22. Velasco L. Progress in safflower oil quality improvement / L. Velasco, J.M. Fernández-Martínez // Journal of Agricultural Science. – 2019. – № 157(1). – P. 1-14. https://doi.org/10.1017/S0021859619000042.
23. Chew S.C. Cold-pressed oil: A green technology / S.C. Chew // Food Science & Nutrition. – 2020. – № 8(7). – P. 377-392. https://doi.org/10.1002/fsn3.1368.

Қаржыландыру туралы ақпарат

Бұл зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және Жоғары білім министрлігінің 2025-2027 жылдарға арналған ғылыми және (немесе) ғылыми-техникалық жобалар бойынша гранттық қаржыландыру жобасы AP26100145 «Мақсарыны қауызынан ажырату процесін оңтайландыра отырып сапалы мақсары майын алу технологиясын әзірлеу» тақырыбы бойынша гранттық қаржыландыру шеңберінде орындалды.

М.М. Какимов[1], А.Л. Касенов[1], М.Т. Мурсалыкова[2]*, А.Д. Жолжаксина[2], Ж.Ж. Мустафин[1]
[1]Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина,
010000, Республика Казахстан, г. Астана, пр. Жеңіс, 62
[2]Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А
*e-mail: maigul_85@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ШЕЛУШЕНИЯ СЕМЯН САФЛОРА НА КАЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ МАСЛА

В работе проведено исследование влияния стадии шелушения семян сафлора на качество, физико-химические показатели, органолептические свойства и биохимический состав масла. Проведен сравнительный анализ масла, полученного из необрушенных семян и из обрушенного ядра, с оценкой кислотного числа, перекисного числа, массовой доли влаги, динамики окислительной стабильности, состава жирных кислот и содержания дополнительных компонентов (токоферолов, фитомелана, хлорофиллов).

Результаты показали, что удаление оболочки способствует значительному улучшению органолептических свойств масла (вкус, запах, цвет, прозрачность), снижает кислотное и перекисное числа, уменьшает содержание влаги и повышает устойчивость к окислению. Биохимический анализ подтвердил увеличение доли линолевой и олеиновой кислот, рост концентрации токоферолов и отсутствие антинутриентов, таких как фитомелан.

Таким образом, технология шелушения семян обеспечивает комплексное улучшение качества и пищевой ценности масла, делая его продуктом премиум-класса, готовым к потреблению без дополнительной интенсивной рафинации. Результаты исследования могут быть использованы для оптимизации технологических процессов производства растительных масел высокого качества. Полученные в ходе исследования данные показали, что оптимизация процесса шелушения позволяет повысить эффективность комплексной переработки сырья. Предложенные технологические подходы являются экологически безопасными, экономически эффективными и адаптированными к условиям промышленного производства. Данные результаты могут служить основой для внедрения инновационных решений в области производства растительных масел и повышения конкурентоспособности отечественной продукции.

Ключевые слова: *сафлоровое масло, шелушение семян, физико-химические показатели, органолептические свойства, жирнокислотный состав, токоферолы, окислительная стабильность.*

M. Kakimov[1], A. Kassenov[1], M. Mursalykova[2]*, A. Zholzhaksina[2], Zh. Mustafin[1]
[1]S. Seifullin Kazakh Agro Technical Research University,
010000, Republic of Kazakhstan, Astana, ave. Janis, 62
[2]Shakarim University,
071412, Republic of Kazakhstan, Semey, Glinka Street, 20 A
*e-mail: maigul_85@mail.ru

THE EFFECT OF SAFFLOWER SEED SHELLING ON OIL QUALITY INDICATORS

This study investigates the effect of the husking stage of safflower seeds on the quality, physicochemical parameters, organoleptic properties, and biochemical composition of the oil. A comparative analysis of oil obtained from uncrushed seeds and crushed kernels was performed, with an assessment of the acid number, peroxide number, mass fraction of moisture, dynamics of oxidative stability, fatty acid composition, and content of minor components (tocopherols, phytomelan, chlorophylls).

The results showed that removing the shell significantly improves the organoleptic properties of the oil (taste, smell, color, transparency), reduces the acid and peroxide values, decreases the moisture content, and increases resistance to oxidation. Biochemical analysis confirmed an increase in the proportion of linoleic and oleic acids, an increase in the concentration of tocopherols, and the absence of antinutrients such as phytomelan.

Thus, seed hulling technology provides a comprehensive improvement in the quality and nutritional value of the oil, making it a premium product ready for consumption without additional intensive refining. The results of the study can be used to optimize the technological processes of producing high-quality vegetable oils. The data obtained during the study demonstrated that optimizing the dehulling process can enhance the efficiency of comprehensive raw material processing. The proposed technological approaches are environmentally friendly, economically efficient, and well adapted for industrial application. These results can serve as a basis for implementing innovative solutions in the field of vegetable oil production and for increasing the competitiveness of domestic products.

Key words: *safflower oil, seed hulling, physicochemical indicators, organoleptic properties, fatty acid composition, tocopherols, oxidative stability.*

Авторлар туралы мәліметтер

Мухтарбек Муханович Какимов – техника ғылымдарының кандидаты, профессор, «Тамақ өнімдерінің технологиясы» білім беру бағдарламасы тобының жетекшісі, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Қазақстан, Астана; e-mail: muhtarbek@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1190-2195.

Амиржан Леонидович Касенов – техника ғылымдарының докторы, «Тамақ және қайта өңдеу өндірістерінің технологиясы» кафедрасының профессоры, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Қазақстан, Астана; e-mail: amirzhan-1@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7715-1128.

Майгуль Тауржановна Мурсалыкова* – PhD докторы, Шәкәрім университетінің постдокторанты, Қазақстан, Семей; e-mail: maigul_85@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5904-9544.

Аяулым Даулетхановна Жолжаксина – «Биоинженерлік жүйе» кафедрасының докторанты, Шәкәрім университеті, Семей, Қазақстан Республикасы; e-mail: ayau_dau@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-9392-6444.

Жасулан Жарылкаганович Мустафин – техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, «Инжиниринг және азық технологиясы» институтының академиялық мәселелер жөніндегі декан орынбасары, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Қазақстан, Астана; e-mail: mustafin_j80@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-2015-5388.

Сведения об авторах

Мухтарбек Муханович Какимов – кандидат технических наук, профессор, руководитель образовательной программы «Технология пищевых продуктов», Казахский агротехнический исследовательский университет им. С. Сейфуллина, Казахстан, Астана; e-mail: muhtarbek@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1190-2195.

Амиржан Леонидович Касенов – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология продовольственных, пищевых и перерабатывающих производств», Казахский агротехнический исследовательский университет им. С. Сейфуллина, Казахстан, Астана; e-mail: amirzhan-1@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7715-1128.

Майгуль Тауржановна Мурсалыкова* – доктор PhD, постдокторант Шәкәрім университеті, Казахстан, Семей; e-mail: maigul_85@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5904-9544.

Аяулым Даулетхановна Жолжаксина – докторант кафедры «Биоинженерные сети», Шәкәрім университеті, Республика Казахстан, Семей; e-mail: ayau_dau@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-9392-6444.

Жасулан Жарылкаганович Мустафин – кандидат технических наук, ассоцированный профессор, заместитель директора по академическим вопросам института «Инжиниринга и пищевых технологий», Казахский агротехнический исследовательский университет им. С. Сейфуллина, Казахстан, Астана; e-mail: mustafin_j80@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-2015-5388.

Information about the authors

Mukhtarbek Kakimov – Candidate of Technical Sciences, Professor, Head of the Food Technology Educational Program, Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seyfullin, Kazakhstan, Astana; e-mail: muhtarbek@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1190-2195.

Amirzhan Kassenov – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department «Technology of food and processing industries», Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin, Kazakhstan, Astana; e-mail: amirzhan-1@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7715-1128.

Maigul Mursalykova* – PhD, postdoctoral fellow, Shakarim University, Kazakhstan, Semey; e-mail: maigul_85@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5904-9544.

Ayaulym Zholzhaksina – Senior Lecturer, Department of Bioengineering Networks, Shakarim University, Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: ayau_dau@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-9392-6444.

Zhasulan Mustafin – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Deputy Director for Academic Affairs at the Institute of Engineering and Food Technology, Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seyfullin, Kazakhstan, Astana; e-mail: mustafin_j80@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-2015-5388.

Редакцияға енуі 02.04.2026
Өңдеуден кейін түсуі 15.05.2026
Жариялауға қабылданды 18.05.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-45

CC BY 4.0
Check for updates

МРНТИ: 65.29; 65.33.03

Э.У. Майлыбаева[1], А.У. Шингисов[1], А.К. Садибаев[2], У.У. Тастемирова[1]*
[1]Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова,
160000, Республика Казахстан г. Шымкент,пр.Тауке-хана,5
[2]Таразский университет имени М.Х. Дулати,
080000, Республика Казахстан г. Тараз, ул. Толе би, 60
*e-mail: ib_tu@mail.ru

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА И РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МУКИ ПШЕНИЧНОЙ ХЛЕБОПЕКАРНОЙ ПЕРВОГО СОРТА РАЗНЫХ ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ ЮЖНОГО РЕГИОНА КАЗАХСТАНА

Аннотация. *В статье представлены результаты сравнительной оценки физико-химических и реологических свойств пшеничной хлебопекарной муки первого сорта различных производителей южного региона Казахстана. Актуальность исследования обусловлена высокой значимостью мукомольной и хлебопекарной отрасли для агропромышленного комплекса Республики Казахстан, необходимостью обеспечения стабильного качества муки и повышения эффективности хлебопекарного производства. Объектами исследования являлись образцы муки*

©Э.У. Майлыбаева, А.У. Шингисов, А.К. Садибаев, У.У. Тастемирова, 2026

торговых марок «Пионер», «Ордабасы-Нан», «Цесна» и «Кемел», широко представленные на региональном рынке. Исследования проводили с использованием стандартных методов определения влажности, числа падения, содержания и качества сырой клейковины, а также показателей деформации клейковины. Реологические свойства теста оценивали методом альвеографии с определением силы муки, упругости, растяжимости и водопоглотительной способности теста. Установлено, что образец муки «Ордабасы-Нан» характеризовался наилучшими технологическими показателями: высоким содержанием сырой клейковины (36%), максимальной силой муки (W = 492 Дж/10⁻⁴), сбалансированными показателями упругости и растяжимости теста, а также высокой водопоглотительной способностью. Полученные результаты свидетельствуют о высокой технологической пригодности исследуемого образца для производства формового хлеба и лепешек средней толщины. Практическая значимость исследования заключается в возможности использования полученных данных для выбора муки с оптимальными хлебопекарными свойствами и повышения стабильности качества готовой продукции.

Ключевые слова: *пшеничная мука, первый сорт, технологические свойства, реологические свойства, хлебопекарные показатели.*

Введение

По данным отраслевых источников и официальной статистики, в последние годы производство пшеничной муки в Казахстане демонстрирует устойчивый рост, отражая динамику развития агропромышленного комплекса и повышения переработки зерна. Так, отечественные переработчики произвели порядка 3,62 млн тонн муки в 2025 г., что на 8,2% больше, чем в 2024 г., при этом выпуск муки в I квартале 2025 г. составил около 821 тыс. тонн, что на 8% выше уровня прошлого года. Это свидетельствует о положительной тенденции в мукомольной отрасли и повышении объемов переработки зерна в муку. Такие отраслевые показатели отражают устойчивый спрос на казахстанскую муку и зерно как на внутреннем, так и на внешних рынках, и создают экономический контекст для анализа качества и технологических свойств муки отечественного производства [1].

Южный регион Республики Казахстан является одним из ключевых центров переработки зерна и производства муки пшеничной хлебопекарной, что обусловлено как наличием развитой сырьевой базы, так и концентрацией мукомольных и хлебопекарных предприятий. В структуре агропромышленного комплекса региона значительное место занимает переработка зерна пшеницы, ориентированная как на удовлетворение внутреннего спроса, так и на экспортные поставки муки в страны Центральной Азии [2].

Согласно аналитическим материалам и официальным данным за 2022-2024 гг., предприятия южного региона обеспечивают существенную долю производства пшеничной муки в республике, при этом наибольший объём приходится на муку хлебопекарного назначения, включая муку первого сорта. Рост объёмов переработки зерна сопровождается расширением ассортимента продукции и увеличением числа производителей, что, с одной стороны, повышает конкуренцию на рынке, а с другой – усиливает вариативность показателей качества муки, поступающей в хлебопекарное производство [3].

Биохимическая структура зерна и технологические свойства муки являются ключевыми факторами, влияющими на реологические характеристики теста и хлебопекарные свойства конечной продукции [4].

Мука остаётся одним из ключевых продуктов зернопереработки и широко используется как сырьё для производства хлеба, макаронных изделий и других продуктов питания, занимая устойчивое положение на внутреннем рынке Казахстана и активно экспортируясь в страны региона. Это подчёркивает важность устойчивого качества муки пшеничной первого сорта, особенно в контексте технологической пригодности для хлебопекарного производства [5].

Существенное внимание в литературе уделяется роли белково-клейковинного комплекса в формировании реологических свойств муки. По данным современных исследований, качество теста определяется не только общим содержанием белка, но и соотношением и структурой белковых фракций, прежде всего глиадинов и глютенинов, которые определяют баланс вязкости, упругости и газоудерживающей способности. Состав белка пшеницы напрямую связан с конечным назначением муки и качеством готовых изделий, а изменения в белковом комплексе отражаются на силе муки и хлебопекарных свойствах [6].

Наряду с белками, важное значение имеют и другие компоненты муки, включая поврежденный крахмал, липиды, арабиноксиланы и пищевые волокна. Исследования показали, что водопоглотительная способность существенно влияет на такие альвеографические параметры, как сила муки и упругость, тогда как отдельные показатели, связанные с деформацией теста, в большей степени определяются именно глютеновым комплексом. Это подтверждает, что качество муки должно оцениваться как многофакторная система, где химический состав и реология тесно взаимосвязаны [7]. Аналогично исследования установили, что при увеличении выхода муки и содержания волокнистых компонентов возрастает потребность в воде, увеличивается время развития теста, повышается его упругость и снижается деформируемость [8].

Для Казахстана данная тематика имеет особую практическую значимость. Мукомольная отрасль страны характеризуется значительными объемами производства [9], при этом южный регион занимает одну из ведущих позиций по выпуску продукции. Здесь сосредоточено большое количество производителей, что формирует высокую конкуренцию и разнообразие качества выпускаемой муки.

Южные области также выступают важным центром реализации и активного оборота муки. В этих условиях стабильность качества продукции становится ключевым фактором для хлебопекарных предприятий. Это обуславливает необходимость сравнительной оценки муки различных производителей, прежде всего по показателям, непосредственно влияющим на ее технологическую пригодность, таким как физико-химические и реологические характеристики [10].

В этой связи возрастает необходимость объективной оценки качества муки пшеничной хлебопекарной первого сорта, производимой предприятиями южного региона Казахстана, с использованием физико-химических и реологических показателей, позволяющих комплексно охарактеризовать её технологическую пригодность.

Указанные обстоятельства подтверждают актуальность проведения сравнительных исследований качества и реологических свойств муки пшеничной хлебопекарной первого сорта различных производителей южного региона Казахстана в целях повышения эффективности хлебопекарного производства и обеспечения стабильного качества продукции.

Целью данного исследования является сравнительная оценка физико-химических и реологических свойств пшеничной муки первого сорта различных производителей южного региона Казахстана для определения их технологической пригодности в хлебопекарном производстве.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования являлась мука 1 сорта, отечественных производителей:

– мука I сорта «Пионер»;

– мука I сорта «Ордабасы-Нан»;

– мука I сорта «Цесна»;

– мука I сорта «Кемел».

Выбор производителей обусловлен их распространенностью в Южных регионах и потенциальной пригодностью для продовольственного использования, в частности, в хлебопекарной промышленности.

Мукомольные и химические показатели каждой муки оценивали в соответствии с действующими нормативными документами: влажность – по ГОСТ 9404-88, число падения – по ГОСТ 30498-97, содержание и качество сырой клейковины – по ГОСТ 13586.1-2016. Реологические свойства теста, приготовленного из муки с различной дисперсностью, исследовали с использованием прибора Альвеограф (по ГОСТ ISO 27971-2016).

Исследования физико-химических и реологических характеристик пшеничной муки I-сорта разных производителей южного региона проводились в лабораторной базе Muhlenchemie Technology Center ТОО «Synar Group» (г. Алматы).

Результаты исследований и их обсуждение

Для оценки технологической пригодности муки были исследованы четыре образца пшеничной муки первого сорта: «Цесна», «Кемел», «Ордабасы-нан» и «Пионер». Основными параметрами анализа физико-химических показателей выступали влажность (W), число

падения (ЧП), содержание сырой клейковины (Кл), индекс деформации муки (ИДК) и показатель ИСД/ААСС (табл. 1).

Таблица 1 – Физико-химические показатели исследуемых образцов муки

Наименование муки	W, %	ЧП, сек	Кл, %	ИДК	ИСД/ААСС
«Цесна» I сорт	13,5	401	30	58,8	20,2/5,71
«Кемел»I сорт	10,4	364	30	69,7	24,6/7,26
«Ордабасы-Нан»I сорт	10,0	376	36	63,8	22,6/6,51
«Пионер» I сорт	11,8	378	31	62,9	23,1/6,69
Обозначения: W – влажность; ЧП – число падения; Кл – массовая доля сырой клейковины, %; ИДК – индекс деформации муки; ИСД/ААСС – индекс силы теста/ общую способность теста к растяжению и удержанию газа					

Анализ физико-химических показателей исследуемых образцов муки, представленных в таблице 1, показал, что Ордабасы нан I сорт имеет наивысшее содержание сырой клейковины (36%), что обеспечивает формирование прочного клейковинного каркаса и повышает газоудерживающую способность теста. Влажность муки W = 10,0% у Ордабасы Нан соответствует оптимальной кондиции для промышленного замеса теста и позволяет достичь стабильной гидратации клейковины как для формового хлеба, так и для лепешек средней толщины. Показатели ИДК (63,8) и ИСД/ААСС (22,6/6,51) находятся в сбалансированном диапазоне, что отражает умеренную деформационную способность клейковины и предсказуемость её поведения при замесе и формовании.

Для анализа технологических свойств теста использовался альвеографический метод, включающий силу муки (W), растяжимость теста (L), упругость (P), соотношение L/P, водопоглощение клейковины (LE) и индекс растяжимости (G) (рис..1, табл. 2).

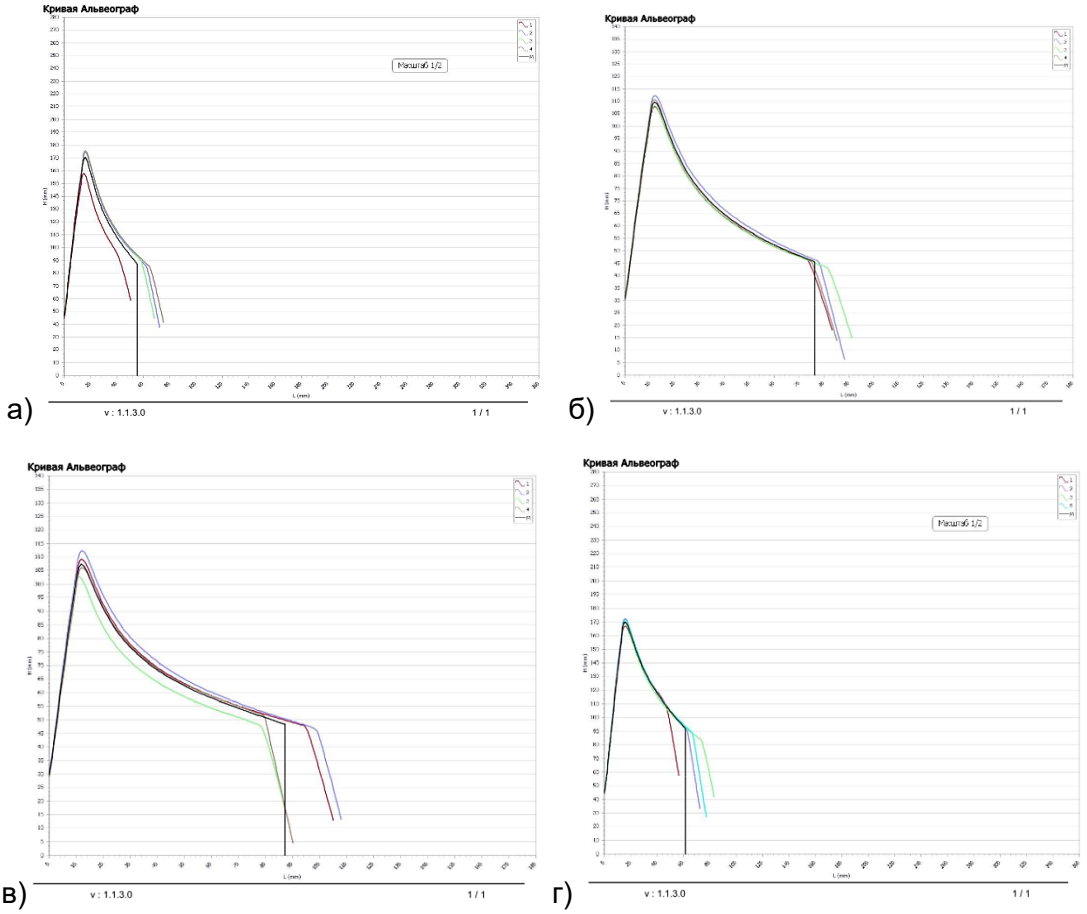


Рисунок 1 – График реологических показателей образцов пшеничной муки:
а) «Кемел»I сорт; б) Цесна I сорт; в) «Пионер» I сорт; г) «Ордабасы-Нан» I сорт

Таблица 2 – Альвеографические показатели исследуемых образцов муки

Наименование муки	W, Дж/10^{-4}	L, мм	P, мм вод.ст	L/P	LE, %	G
«Цесна» I сорт	341	76	121	1,59	59	19,4
«Кемел»I сорт	435	55	187	3,40	63,8	16,5
«Ордабасы-Нан»I сорт	492	61	187	3,07	69,5	17,3
«Пионер» I сорт	391	87	118	1,36	63,9	20,7
Обозначения: P – показатель упругости теста; L – это показатель растяжимости теста; W (сила муки) – это показатель сопротивления теста разрыву и общая энергия клейковины; LE – водопоглощение клейковины; G – индекс растяжимости						

Для производства формового хлеба важна высокая сила клейковины, сбалансированная растяжимость и упругость теста, а также способность удерживать влагу. Как показывают результаты исследования, отраженные в таблице 2 и в рисунке 1, «Ордабасы Нан» продемонстрировала максимальную силу муки W = 492 Дж/10^{-4}, что обеспечивает устойчивость теста к разрыву и стабильный объем хлеба. Баланс растяжимости и упругости (L = 61, P = 187, L/P = 3,07) позволяет получить тесто, удобное для формования, с минимальной деформацией булок.

Водопоглощение LE = 69,5% и индекс растяжимости G = 17,3 обеспечивают равномерную пористость и стабильную структуру мякиша. Сравнительно: Цесна – слабая клейковина (Кл = 30%), низкая сила (W = 341), что ограничивает стабильность хлеба; Кемел – высокая упругость при низкой растяжимости (L = 55, P = 187), что усложняет формование; Пионер – чрезмерная растяжимость (L = 87) при низкой упругости (P = 118), что может приводить к деформации формового хлеба.

Для лепешек важнее высокая растяжимость теста при умеренной или высокой прочности. Пионер обеспечивает максимальную растяжимость L = 87, что подходит для тонкого раскатывания теста, однако низкая упругость P = 118 может вызывать разрывы. Ордабасы нан сочетает достаточную растяжимость (L = 61) с высокой упругостью (P = 187), что позволяет формовать среднетолщинные лепешки без разрывов, обеспечивая равномерную структуру мякиша и удержание влаги (LE = 69,5%). Цесна пригодна для тонких изделий, но слабая сила муки (W = 341) ограничивает прочность теста. Кемел менее пригодна из-за низкой растяжимости (L = 55), что затрудняет раскатывание.

Заключение

Мука Ордабасы нан I сорт демонстрирует оптимальные физико-химические и альвеографические характеристики как для формового хлеба, так и для лепешек средней толщины: высокая клейковина (36%), сила муки W = 492 Дж/10^{-4}, сбалансированные показатели растяжимости и упругости (L/P = 3,07) и высокое водопоглощение (LE = 69,5%). Для тонких лепешек с максимальной эластичностью и растяжимостью можно использовать Пионер (L = 87), но с контролем пластичности, чтобы избежать разрывов теста. Муки Цесна и Кемел менее предпочтительны для промышленного использования из-за либо недостаточной силы клейковины, либо технологических ограничений при формовании. Использование Ордабасы нан обеспечивает стабильность технологического процесса, равномерный объем и однородную пористость как формового хлеба, так и лепешек.

На основании проведённого комплексного анализа можно заключить, что мука Ордабасы нан I сорт является универсальным оптимальным выбором для промышленного производства формового хлеба и лепешек средней толщины. Применение данного образца гарантирует: стабильный технологический процесс замеса и формования теста; оптимальный баланс эластичности и прочности; равномерный объем хлеба и однородную структуру мякиша; улучшенные органолептические показатели готовых изделий; возможность обогащения растительными компонентами для повышения пищевой ценности без снижения технологической эффективности.

Список литературы

1. Министерство сельского хозяйства Республики Казахстан. Аналитические материалы по производству и экспорту зерна и продуктов его переработки за 2022-2024 гг. – Астана, 2024. https://www.gov.kz/memleket/entities/moa (дата обращения: 29.01.2026).
2. Бюро национальной статистики Агентства по стратегическому планированию и реформам РК. Производство продукции мукомольно-крупяной промышленности по регионам Республики Казахстан. – Астана, 2023-2024. Электрон. ресурс.
3. Министерство сельского хозяйства Республики Казахстан. Аналитические материалы по переработке зерна и производству муки в Республике Казахстан за 2022-2024 гг. – Астана, 2024. – Электрон. ресурс.
4. Kradetskaya O.O. Комплексное исследование биохимических и технологических показателей качества зерна и муки перспективных сортов яровой мягкой пшеницы / O.O. Kradetskaya, E.V. Mamykina, S.V. Dashkevich // Bulletin of Science (КазАТУ). – 2024. – Т. X. – С. Y-Z.
5. Altaibaeva Z. Development of the flour-milling industry in the Republic of Kazakhstan in modern times / Z. Altaibaeva, M. Bauer-Kenzhebolatova, O. Zhaltyrova // International Journal of Economics and Financial Issues. – 2016. – Vol. 6(S2). – P. 1-8.
6. Effect of wheat grain protein composition on end-use quality / A. Sharma et al // Journal of Food Science and Technology. – 2020. – № 57(8). – P. 2771-2785. https://doi.org/10.1007/s13197-019-04222-6.
7. Combination of empirical and fundamental rheology for the characterization of dough from wheat flours with different extraction rate / S. Iacovino et al // Food Hydrocolloids. – 2024. – № 146. – P. 109446. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109446.
8. Impact of wheat flour composition on dough properties: Focus on the minor components / L. Rezette et al // Journal of Cereal Science. – 2025. – № 124. – P. 104233. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2025.104233.
9. Исследование реологических свойств бездрожжевого теста из пшеничной муки первого и второго сорта / М. Якияева и др. // Известия НАН РК. Серия химии и технологии. – 2021. – № 5-6. – С. 99-111. https://doi.org/10.32014/2021.2518-1491.83.
10. Altaibaeva Zh. Current state and development trends of the flour-milling industry in the Republic of Kazakhstan / Zh. Altaibaeva, Sh. Mutallyapova, S. Bekhozhin // Revista ESPACIOS. – 2017. – № 46, Vol. 38.

References

1. Ministerstvo sel'skogo khozyaistva Respubliki Kazakhstan. Analiticheskie materialy po proizvodstvu i ehksportu zerna i produktov ego pererabotki za 2022-2024 gg. – Astana, 2024. https://www.gov.kz/memleket/entities/moa (data obrashcheniya: 29.01.2026). (In Russian).
2. Byuro natsional'noi statistiki Agentstva po strategicheskomu planirovaniyu i reformam RK. Proizvodstvo produktsii mukomol'no-krupyanoi promyshlennosti po regionam Respubliki Kazakhstan. – Astana, 2023-2024. Ehlektron. resurs. (In Russian).
3. Ministerstvo sel'skogo khozyaistva Respubliki Kazakhstan. Analiticheskie materialy po pererabotke zerna i proizvodstvu muki v Respublike Kazakhstan za 2022-2024 gg. – Astana, 2024. – Ehlektron. resurs. (In Russian).
4. Kradetskaya O.O. Kompleksnoe issledovanie biokhimicheskikh i tekhnologicheskikh pokazatelei kachestva zerna i muki perspektivnykh sortov yarovoi myagkoi pshenitsy / O.O. Kradetskaya, E.V. Mamykina, S.V. Dashkevich // Bulletin of Science (KazATU). – 2024. – T. X. – S. Y-Z. (In Russian).
5. Altaibaeva Z. Development of the flour-milling industry in the Republic of Kazakhstan in modern times / Z. Altaibaeva, M. Bauer-Kenzhebolatova, O. Zhaltyrova // International Journal of Economics and Financial Issues. – 2016. – Vol. 6(S2). – P. 1-8. (In English).
6. Effect of wheat grain protein composition on end-use quality / A. Sharma et al // Journal of Food Science and Technology. – 2020. – № 57(8). – R. 2771-2785. https://doi.org/10.1007/s13197-019-04222-6. (In English).
7. Combination of empirical and fundamental rheology for the characterization of dough from wheat flours with different extraction rate / S. Iacovino et al // Food Hydrocolloids. – 2024. – № 146. – R. 109446. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109446. (In English).

8. Impact of wheat flour composition on dough properties: Focus on the minor components / L. Rezette et al // Journal of Cereal Science. – 2025. – № 124. – R. 104233. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2025.104233. (In English).
9. Issledovanie reologicheskikh svoistv bezdrozhzhevogo testa iz pshenichnoi muki pervogo i vtorogo sorta / M. Yakiyaeva i dr. // Izvestiya NAN RK. Seriya khimii i tekhnologii. – 2021. – № 5-6. – S. 99-111. https://doi.org/10.32014/2021.2518-1491.83. (In Russian).
10. Altaibaeva Zh. Current state and development trends of the flour-milling industry in the Republic of Kazakhstan / Zh. Altaibaeva, Sh. Mutallyapova, S. Bekhozhin // Revista ESPACIOS. – 2017. – № 46, Vol. 38. (In English).

Э.У. Майлыбаева[1], А.У. Шингисов[1], А.К. Садибаев[2], У.У. Тастемирова[1]*
М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті,
160000, Қазақстан Республикасы, Шымкент қ., Тәуке хан даңғылы, 5
[2]М.Х. Дулати атындағы Тараз университеті,
080000, Қазақстан Республикасы, Тараз қ., Төле би көшесі, 60
*e-mail: ib_tu@mail.ru

ҚАЗАҚСТАННЫҢ ОҢТҮСТІК ӨҢІРІНДЕГІ ӘРТҮРЛІ ӨНДІРУШІЛЕРДІҢ БІРІНШІ СОРТТЫ НАУБАЙХАНАЛЫҚ БИДАЙ ҰНЫНЫҢ САПАСЫ МЕН РЕОЛОГИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН БАҒАЛАУ

Мақалада Қазақстанның оңтүстік өңіріндегі әртүрлі өндірушілердің бірінші сортты наубайханалық бидай ұнының физика-химиялық және реологиялық қасиеттеріне салыстырмалы бағалау нәтижелері ұсынылған. Зерттеудің өзектілігі Қазақстан Республикасының агроөнеркәсіптік кешеніндегі ұн тарту және нан пісіру салаларының маңыздылығымен, ұн сапасының тұрақтылығын қамтамасыз ету және нан өнімдерін өндіру тиімділігін арттыру қажеттілігімен негізделеді. Зерттеу нысандары ретінде өңірлік нарықта кең таралған «Пионер», «Ордабасы-Нан», «Цесна» және «Кемел» сауда маркаларының ұн үлгілері алынды. Зерттеулер ылғалдылықты, құлау санын, шикі желімтектің мөлшері мен сапасын, сондай-ақ желімтектің деформация көрсеткіштерін анықтаудың стандартты әдістерін қолдану арқылы жүргізілді. Қамырдың реологиялық қасиеттері альвеография әдісімен бағаланып, ұнның күші, серпімділігі, созылғыштығы және суды сіңіру қабілеті анықталды. Зерттеу нәтижелері бойынша «Ордабасы-Нан» ұнының технологиялық көрсеткіштері ең жоғары деңгейде екені анықталды: шикі клейковина мөлшері – 36 %, ұн күші – W = 492 Дж/10⁻⁴, қамырдың серпімділігі мен созылғыштығының теңгерімді қатынасы және жоғары су сіңіру қабілеті. Алынған нәтижелер зерттелген үлгінің қалыпты нан және орташа қалыңдықтағы тандыр нан өнімдерін өндіруге жоғары технологиялық жарамдылығын көрсетті. Зерттеудің практикалық маңыздылығы алынған деректерді оңтайлы наубайханалық қасиеттеріне ие ұнды таңдауда және дайын өнім сапасының тұрақтылығын арттыруда қолдану мүмкіндігімен сипатталады.

Түйін сөздер: *бидай ұны, бірінші сұрып, технологиялық қасиеттер, реологиялық қасиеттер, наубайханалық көрсеткіштері.*

E. Mailybayeva[1], A. Shingisov[1], A. Sadibayev[2], U. Tastemirova[1]*
M. Auezov South Kazakhstan University
160000, Shymkent, Republic of Kazakhstan,Tauke Khan avenue, 5
[2]Taraz University named after M.Kh. Dulaty,
60 Tole Bi Street, Taraz, 080000, Republic of Kazakhstan
*e-mail: ib_tu@mail.ru

ASSESSMENT OF THE QUALITY AND RHEOLOGICAL PROPERTIES OF FIRST-GRADE BREAD WHEAT FLOUR FROM DIFFERENT MANUFACTURERS IN THE SOUTHERN REGION OF KAZAKHSTAN

The article presents the results of a comparative assessment of the physicochemical and rheological properties of first-grade bread wheat flour produced by different manufacturers in the southern region of Kazakhstan. The relevance of the study is обусловлена the significant role of the flour-milling and baking industries in the agro-industrial complex of the Republic of Kazakhstan, as well as the need to ensure stable flour quality and improve the efficiency of bread production. Flour samples of the “Pioner,” “Ordabasy-Nan,” “Tsesna,” and “Kemel” brands, widely represented in the regional market, were selected as research objects. The study was carried out using standard methods for determining moisture content, falling number, quantity and quality of wet gluten, and gluten deformation index. The rheological properties of dough were evaluated

using the alveograph method with determination of flour strength, dough elasticity, extensibility, and water absorption capacity. The results showed that the "Ordabasy-Nan" flour sample demonstrated the best technological characteristics, including high wet gluten content (36%), maximum flour strength (W = 492 J/10⁻⁴), balanced elasticity and extensibility parameters, and high water absorption capacity. The obtained results indicate the high technological suitability of the studied flour sample for the production of pan bread and medium-thickness flatbread products. The practical significance of the study lies in the possibility of using the obtained data to select flour with optimal baking properties and improve the stability of finished product quality.

Key words: *wheat flour, first grade, technological properties, rheological properties, baking characteristics.*

Сведения об авторах

Эльвира Урисбаевна Майлыбаева – старший преподаватель кафедры «Технология и безопасность продовольственных продуктов», Южно-Казахстанский университет имени М. Ауэзова, Республика Казахстан; e-mail: emu1204@mail.ru. ORCID:https://orcid.org/0000-0002-6322-4496.

Азрет Утебаевич Шингисов – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология и безопасность продовольственных продуктов», Южно-Казахстанский университет имени М. Ауэзова, Республика Казахстан; e-mail: azret_utebai@mail.ru. ORCID:http://orcid.org/0000-0002-0726-8232.

Абилхан Килибаевич Садибаев – кандидат технических наук, доцент кафедры «Пищевое производство и биотехнология», Таразский университет имени М.Х. Дулати, Республика Казахстан; e-mail: ak.sadibayev@dulaty.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0427-3025.

Укилим Убайдуллаевна Тастемирова* – PhD, доцент кафедры «Технология и безопасность продовольственных продуктов», Южно-Казахстанский университет имени М. Ауэзова, Республика Казахстан; e-mail: ib_tu@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7078-0044.

Авторлар туралы мәліметтер

Эльвира Урисбаевна Майлыбаева – «Азық-түлік өнімдерінің технологиясы және қауіпсіздігі» кафедрасының аға оқытушысы, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Қазақстан; e-mail: emu1204@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6322-4496.

Азрет Утебаевич Шингисов – техника ғылымдарының докторы, «Азық-түлік өнімдерінің технологиясы және қауіпсіздігі» кафедрасының профессоры, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Қазақстан; e-mail: azret_utebai@mail.ru. ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0726-8232.

Абилхан Килибаевич Садибаев – техника ғылымдарының кандидаты, «Тамақ өндірісі және биотехнология» кафедрасының доценті, М.Х. Дулати атындағы Тараз университеті, Қазақстан; e-mail: ak.sadibayev@dulaty.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0427-3025.

Укилим Убайдуллаевна Тастемирова* – «Азық-түлік өнімдерінің технологиясы және қауіпсіздігі» кафедрасының доценті, PhD доктор, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Қазақстан; e-mail: ib_tu@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7078-0044.

Information about authors

Elvira Mailybayeva – Senior Lecturer of the Department of Food Technology and Safety, M. Auezov South Kazakhstan University, Kazakhstan; e-mail: emu1204@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6322-4496.

Azret Shingisov – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Technology and Food Safety, M. Auezov South Kazakhstan University, Kazakhstan; e-mail: azret_utebai@mail.ru. ORCID:http://orcid.org/0000-0002-0726-8232.

Abilkhan Sadibayev – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Food Production and Biotechnology, Taraz University named after M.Kh. Dulaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: ak.sadibayev@dulaty.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0427-3025.

Ukilim Tastemirova* – PhD, Associate Professor of the Department of Food Technology and Safety, M. Auezov South Kazakhstan University, Kazakhstan; e-mail: ib_tu@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7078-0044.

Поступила в редакцию 30.03.2026
Поступила после доработки 13.04.2026
Принята к публикации 18.05.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-46

IRSTI: 68.41.39; 68.41.15

G. Yussupova[*], Zh. Shadyarova[1], Zh. Nurlankyzy[1], S. Toleubekova[2], A. Khaimuldinova[3]
[1]S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University,
010011, Republic of Kazakhstan, Astana city, Zhenis Avenue, 62
[2]Shakarim University,
071412, Republic of Kazakhstan, Semey city, Glinka street, 20A
[3]Eurasian National University named after L. N. Gumilyov,
010000, Republic of Kazakhstan, Astana city, Satbaev street, 2
*e-mail: gaukhar.nitra@gmail.com

TECHNOLOGY AND QUALITY OF A FERMENTED MILK PRODUCT WITH NATURAL SWEETENER ADDITION

Annotation: *This study presents the development of a functional yogurt technology enriched with plant-based dietary fiber - psyllium (Plantago ovata husk). The effect of psyllium addition at concentrations of 0.3-1.0% on the physicochemical, rheological, and sensory properties of the product was investigated. The results demonstrated that psyllium incorporation does not inhibit the growth of lactic acid bacteria and does not interfere with the fermentation process. The addition of plant fiber promoted the formation of a stable protein-polysaccharide matrix, increased viscosity up to 1120 mPa·s, and reduced syneresis to 1.9% compared to the control sample.*

The optimal concentration was determined to be 0.5%, providing a balanced combination of texture and sensory characteristics while preserving the traditional taste and aroma of yogurt. The use of psyllium allows for the replacement of synthetic stabilizers and aligns with the "clean label" concept.

The developed product is characterized by enhanced nutritional value due to its content of soluble dietary fiber, exhibits prebiotic properties, and can be recommended for functional, preventive, and dietary nutrition. The novelty of the technology is confirmed by a filed patent application in the Republic of Kazakhstan.

Key words: *functional yogurt, psyllium, plant dietary fiber, structure formation, rheological properties, syneresis, prebiotic properties.*

Introduction

Despite the widespread popularity of yogurt, conventional products often contain synthetic thickeners and stabilizers, which may not fully meet modern consumer expectations for natural and clean-label foods. The growing demand for functional and «clean label» products has intensified the search for natural ingredients, including plant-based dietary fibers. Psyllium, characterized by high hydrophilicity and strong gel-forming capacity, is considered a promising component for improving the rheological properties of yogurt [1, 2].

In the current context of food industry development, particular attention is being paid to the production of foods with enhanced biological value and preventive health benefits. Functional fermented dairy products are regarded not only as sources of highly digestible protein and calcium but also as carriers of probiotic and prebiotic components that positively affect gut microbiota [3]. For example, the global functional dairy market reached approximately USD 43 billion in 2022 and is projected to grow to USD 62.6 billion by 2031, with a compound annual growth rate (CAGR) of about 4.8%, driven by increasing consumption of probiotic and bioactive products.

More broadly, the global functional food market, including dairy and other categories, is valued in the hundreds of billions of dollars and is expected to grow from approximately USD 398.8 billion in 2025 to nearly USD 983.2 billion by 2034, at a CAGR of around 10.65% [4-6]. This reflects a sustained global trend toward foods that provide not only basic nutrition but also additional physiological benefits.

Furthermore, the dietary fiber market, including soluble and prebiotic fibers, is also experiencing dynamic growth. Its value was estimated at approximately USD 8.1 billion in 2024 and is projected to reach USD 19.4 billion by 2034, highlighting the increasing interest of manufacturers in incorporating fiber ingredients into various food categories, including dairy products.

©G. Yussupova, Zh. Shadyarova, Zh. Nurlankyzy, S. Toleubekova, A. Khaimuldinova, 2026

Previous studies indicate that the incorporation of plant dietary fibers improves the structural and mechanical properties of yogurt and reduces syneresis during storage, which is consistent with the behavior of hydrocolloids in food systems [7-9]. The use of natural plant-based ingredients makes it possible to replace conventional stabilizers while maintaining structural stability and desirable sensory characteristics. Therefore, the development of yogurt production technology enriched with psyllium represents a relevant research direction aimed at expanding the range of functional dairy products and enhancing their competitiveness in both domestic and international markets.

Materials and methods

Raw Materials

Pasteurized cow's milk with a fat content of 1.0% was used as the main raw material, complying with the requirements of TR CU 033/2013 "On the Safety of Milk and Dairy Products." The use of low-fat milk was justified by the development of a dietetic functional product with reduced energy value [10].

A direct vat set (DVS) freeze-dried starter culture containing a symbiotic combination of Streptococcus thermophilus and Lactobacillus delbrueckii subsp. bulgaricus was used. The inoculation rate was 1.0% of the total milk weight.

Psyllium powder (Plantago ovata husk) with a total dietary fiber content of at least 80% served as the functional ingredient. The material was characterized by high hydrophilicity, with a water absorption capacity of 8-12 g of water per 1 g of dry matter.

Psyllium Preparation

Before incorporation into the milk base, psyllium underwent preliminary technological treatment:

1. Sieving through a 250 μm mesh to remove possible agglomerates.
2. Dry sterilization at 105°C in a drying oven for 20 minutes to reduce microbial contamination.
3. Pre-hydration: psyllium was dispersed in sterile distilled water at 40 ± 2 °C in a 1:10 (w/v) ratio, followed by stirring on a magnetic stirrer (300 rpm) for 15 minutes until a homogeneous gel-like suspension was formed.

Pre-hydration prevented lump formation during incorporation into the yogurt matrix and ensured uniform fiber distribution within the system.

Yogurt Production Technology

Yogurt production was carried out under laboratory conditions.

Milk was subjected to high-temperature pasteurization at 92-95°C for 5 minutes to inactivate contaminating microflora and partially denature whey proteins. After pasteurization, the milk was cooled to 42 ± 1°C, and the starter culture was added. The mixture was incubated at 42 °C in a thermostatic chamber until the pH reached 4.6 (6-8 hours).

After gel formation, the product was cooled to 20 °C. Pre-hydrated psyllium was then incorporated into the fermented mass using mechanical stirring (1000 rpm, 3 minutes) until a homogeneous structure was achieved. Psyllium was added at concentrations of 0.3%, 0.5%, and 1.0% (on a dry matter basis).

The finished product was packaged in sterile polypropylene containers and stored at 4 ± 2°C for 14 days. Analyses were performed on days 1, 7, and 14 of storage. All experiments were conducted in triplicate.

Results and Discussion

The study demonstrated that the incorporation of psyllium did not exert any inhibitory effect on the growth of lactic acid bacteria. The pH reduction during fermentation followed a typical pattern consistent with the classical kinetics of lactic acid fermentation in all samples.

The control sample reached a pH value of 4.6 after 7.5 hours of fermentation, whereas samples containing psyllium (0.3-1.0%) achieved the same pH level within 6.5-7 hours. The slight acceleration of the fermentation process may be attributed to the formation of a more viscous dispersion medium, which facilitates better retention of bacterial cells within the product matrix and enhances their metabolic activity. In addition, psyllium may act as a prebiotic substrate, promoting the growth and activity of lactic acid microorganisms.

The titratable acidity of the final products ranged between 85 and 95 °T, which complies with regulatory standards for yogurt and confirms the proper progression of the fermentation process.

The physicochemical characteristics of the studied samples are presented in Table 1.

Table 1 – Physicochemical characteristics of yogurt samples

Parameter	Control	0.3% Psyllium	0.5% Psyllium	1.0% Psyllium
pH	4,60	4,55	4,53	4,50
Titratable acidity (°T)	88	90	92	94
Total solids (%)	11,8	12,4	12,9	13,6
Energy value (kcal/100 g)	42	44	46	49

As shown in Table 1, the incorporation of psyllium did not exert an inhibitory effect on the lactic acid fermentation process. The pH values of all samples ranged between 4.50 and 4.60, complying with regulatory standards for yogurt and confirming the proper progression of fermentation. A slight increase in titratable acidity with increasing psyllium concentration (from 88 to 94 °T) suggests enhanced metabolic activity of lactic acid bacteria. The formation of a more viscous and structured dispersion medium likely facilitates the retention of bacterial cells within the gel matrix, thereby creating favorable conditions for their growth and acid production.

It was established that the total solids content increased proportionally with psyllium dosage, rising from 11.8% in the control sample to 13.6% at a concentration of 1.0%. This effect is attributed to the high content of soluble dietary fibers characterized by pronounced hydrophilicity and swelling capacity. The increase in total solids significantly contributes to the formation of a three-dimensional protein-polysaccharide network resulting from interactions between psyllium polysaccharides and casein micelles. Such interactions lead to densification of the gel structure and improved mechanical stability.

The energy value of the product ranged from 42 to 49 kcal per 100 g, allowing the developed yogurt to be classified as a low-calorie functional fermented dairy product suitable for dietetic nutrition.

During 14 days of storage at 4 ± 2°C, no significant changes in pH were observed (4.45-4.60), indicating microbiological stability and the absence of pronounced post-acidification. These findings confirm the technological compatibility of psyllium with the starter culture and the stability of the formed structure during storage.

Overall, comprehensive analysis of the physicochemical parameters demonstrates that psyllium not only does not interfere with fermentation but also promotes structural optimization, increases total solids content, and enhances product stability. The most rational concentration was determined to be 0.5%, providing an optimal balance between acidity, textural characteristics, and energy value. Changes in sample viscosity are presented in Figure 1.

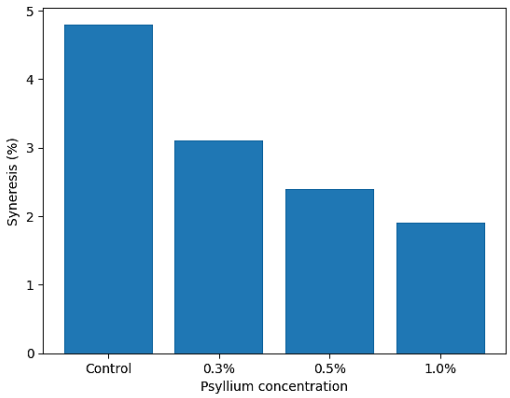


Figure 1 – Effect of psyllium concentration on the viscosity of yogurt

As shown in the histogram (Figure 1), the viscosity of the control sample was 640 mPa·s. The incorporation of 0.3% psyllium increased this parameter to 820 mPa·s, while a concentration of 0.5% resulted in 960 mPa·s, and 1.0% reached 1120 mPa·s, representing a 75% increase compared to the control sample. Thus, a clear dependence of viscosity on the concentration of plant fiber was observed.

The obtained results indicate a pronounced structure-forming effect of psyllium. The polysaccharide components of *Plantago ovata* are characterized by a high hydration capacity and

the ability to form a viscoelastic gel network. Their interaction with casein micelles leads to the formation of a denser three-dimensional structure capable of effectively retaining moisture and stabilizing the protein matrix.

The increase in viscosity directly correlates with the rise in total solids content and the enhanced water-holding capacity of the system. The formation of a protein – polysaccharide complex reduces the mobility of free water and improves overall product stability.

The reduction in syneresis is presented in Figure 2.

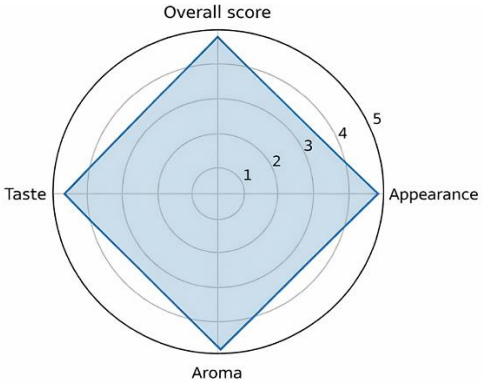


Figure 2 – Effect of psyllium concentration on yogurt syneresis

The control sample exhibited whey separation at a level of 4.8%. The incorporation of 0.3% psyllium reduced this parameter to 3.1%, while concentrations of 0.5% and 1.0% further decreased syneresis to 2.4% and 1.9%, respectively. Thus, a clear inverse relationship between psyllium concentration and the intensity of whey separation was established.

The reduction in syneresis indicates the formation of a stable protein–polysaccharide system with enhanced water-holding capacity. Due to its high hydrophilicity, psyllium effectively binds free water and forms a viscoelastic gel structure. The interaction between polysaccharide fractions and casein micelles results in the formation of a three-dimensional network capable of retaining moisture within the protein matrix. This prevents water migration and reduces structural destabilization during storage.

It should be noted that at a concentration of 1.0%, excessive gel densification was observed. Despite the minimal syneresis level, increased gel firmness may negatively affect sensory perception and overall consumer acceptance.

The sensory characteristics of the studied samples are presented in Table 2.

Table 2 – Sensory evaluation of yogurt samples (5-point scale)

Parameter	Control	0,3 %	0,5 %	1,0 %
Appearance	4,5	4,8	4,9	4,6
Consistency	4,3	4,7	4,8	4,4
Taste	4,6	4,7	4,8	4,6
Aroma	4,6	4,7	4,8	4,6
Overall score	4,5	4,7	4,8	4,5

As shown in Table 2, psyllium incorporation positively influenced the sensory characteristics of the product. The most pronounced improvement was observed in the «consistency» parameter, which is consistent with the rheological findings and confirms the impact of structural modification on sensory perception.

The highest scores were obtained for the sample containing 0.5% psyllium. This sample was characterized by a dense, homogeneous, and creamy texture without visible syneresis, a uniform gel structure, and a balanced fermented milk flavor. The increase in scores for «appearance» and «consistency» is associated with the formation of a stable protein-polysaccharide matrix, ensuring structural stability and improved consumer appeal.

The sensory profile of the sample containing the optimal psyllium concentration (0.5%) is presented in Figure 3.

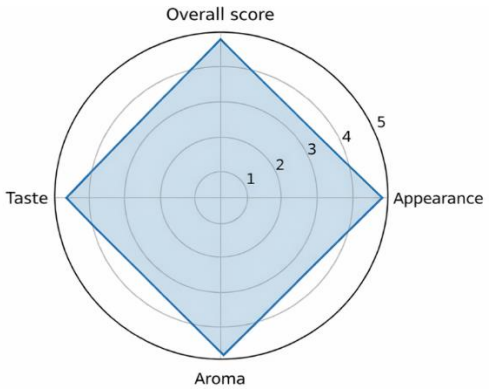


Figure 3 – Sensory profile of yogurt containing 0.5% psyllium based on individual sensory attributes (appearance, consistency, taste, and aroma).
The overall sensory score is presented separately in Table 2

As shown in Figure 3, the product is characterized by a well-balanced combination of sensory attributes. The highest scores were obtained for “appearance” and “consistency,” confirming the pronounced structure-forming effect of psyllium. The parameters “taste” and “aroma” remained at a high level, indicating that the incorporation of plant fiber did not negatively affect the organoleptic properties of the product.

The sample containing 0.3% psyllium also demonstrated improved sensory characteristics compared to the control; however, the texture-enhancing effect was less pronounced.

At a dosage of 1.0%, excessive thickness and increased structural density were observed. This was subjectively perceived by the sensory panel as overly high viscosity, resulting in a decrease in the overall score to 4.5 points.

The control sample was characterized by a less stable consistency and partial whey separation during storage, which negatively influenced the «appearance» and «consistency» scores.

Thus, the analysis of the data presented in Table 2 and Figure 3 confirms that 0.5% psyllium represents the optimal concentration, providing the best combination of textural and flavor characteristics while maintaining high consumer acceptability.

Conclusion

As a result of the conducted research, a technology for producing functional yogurt enriched with plant-based dietary fiber – psyllium (*Plantago ovata* husk) – was developed. It was established that the incorporation of psyllium at concentrations of 0.3-1.0% does not exert an inhibitory effect on lactic acid microflora and contributes to the improvement of the structural and mechanical properties of the product.

The use of psyllium increased viscosity up to 1120 mPa·s and reduced syneresis to 1.9%, while maintaining regulatory acidity parameters (pH 4.50-4.60; 88-94°T). The concentration of 0.5% was identified as optimal, providing a balanced combination of rheological and sensory characteristics.

A patent application has been filed in the Republic of Kazakhstan for the developed technology entitled «Method for Producing Yogurt with Added Plant-Based Dietary Fiber» (Application № 394201, Reg. № 2025/0799.1 dated August 21, 2025; currently under substantive examination).

The developed technology may be recommended for industrial implementation in the production of functional and dietetic fermented dairy products.

References

1. Saha D. Hydrocolloids as thickening and gelling agents in dairy products / D. Saha, S. Bhattacharya // Journal of Food Science and Technology. – 2010. – Vol. 47(6). – P. 587-597. https://doi.org/10.1007/s13197-010-0162-6.

2. Mudgil D. Composition, properties and health benefits of indigestible carbohydrate polymers as dietary fiber: A review / D. Mudgil, S. Barak // International Journal of Biological Macromolecules. – 2013. – Vol. 61. – P. 1-6. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2013.06.044.

3. Aryana K.J. A 100-year review: Yogurt and other cultured dairy products / K.J. Aryana, D.W. Olson // Journal of Dairy Science. – 2017. – Vol. 100, № 12. – P. 9987-10013. https://doi.org/10.3168/jds.2017-12981.
4. Ranadheera C.S. Probiotic viability and physico-chemical and sensory properties of plain and stirred fruit yogurts made from goat's milk / C.S. Ranadheera, C.A. Evans, M.C. Adams // Food Chemistry. – 2012. – Vol. 135. – P. 1411-1418. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.06.025.
5. TR CU 021/2011. Technical Regulation of the Customs Union «On the Safety of Food Products». – Approved by the Decision of the Commission of the Customs Union dated December 9, 2011. – № 880. – Entered into force on July 1, 2013.
6. DataM Intelligence. Functional Dairy Products Market – Industry Trends and Forecast 2024-2031 [Electronic resource]. – Available at: https://www.datamintelligence.com/research-report/functional-dairy-products-market (accessed: 19.02.2026).
7. Fortune Business Insights. Functional Foods Market Size, Share & Industry Analysis, 2025-2034 [Electronic resource]. – Available at: https://www.fortunebusinessinsights.com/functional-foods-market-102269 (accessed: 19.02.2026).
8. Global Market Insights. Food Fibers Market Size & Share Report, 2026-2036 [Electronic resource]. – Available at: https://www.gminsights.com/industry-analysis/food-fibers-market (accessed: 19.02.2026).
9. Gao Y. Food Hydrocolloids: Structure, Properties, and Applications / Y. Gao, R. Liu, H. Liang // Foods. – 2024. – Vol. 13(7). – 1077. https://doi.org/10.3390/foods13071077.
10. TR CU 033/2013. Technical Regulation of the Customs Union «On the Safety of Milk and Dairy Products». – Approved by the Decision of the Council of the Eurasian Economic Commission dated October 9, 2013. – № 67. – Entered into force on May 1, 2014.

Г.Т. Юсупова[1]*, Ж.К. Шадьярова[1], Ж. Нұрланқызы[1], С.С. Толеубекова [2], А.К. Хаймулдинова[3]
[1]С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті,
010011, Қазақстан Республикасы, Астана қ., Жеңіс даңғылы, 62
[2]Шәкәрім университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинка көшесі, 20А
[3]Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
010008, Қазақстан Республикасы, Астана қ., Сатпаева көшесі, 2
*e-mail: gaukhar.nitra@gmail.com

ӨСІМДІК ТЕКТІ ТАҒАМДЫҚ ТАЛШЫҚ ҚОСЫЛҒАН ФУНКЦИОНАЛДЫ ЙОГУРТТЫ ӘЗІРЛЕУ ЖӘНЕ БАҒАЛАУ

Мақалада өсімдік текті тағамдық талшық – псиллиум (Plantago ovata husk) қосылған функционалдық йогурт өндіру технологиясы ұсынылған. Псиллиумды 0,3-1,0 % мөлшерде енгізудің өнімнің физика-химиялық, реологиялық және органолептикалық көрсеткіштеріне әсері жан-жақты зерттелді. Зерттеу нәтижелері псиллиумның сүтқышқылды микрофлораның дамуына кері әсер етпейтінін және ашыту процесінің қалыпты жүруіне кедергі келтірмейтінін көрсетті. Өсімдік талшығын қосу тұрақты ақуыз-полисахаридті құрылымның түзілуіне ықпал етіп, тұтқырлықты 1120 мПа·с-қа дейін арттырып, бақылау үлгісімен салыстырғанда сарысудың бөлінуін 1,9 %-ға дейін төмендететіні анықталды.

Ең тиімді концентрация ретінде 0,5 % мөлшер белгіленді, себебі бұл көрсеткіш йогурттың дәстүрлі дәмі мен хош иісін сақтай отырып, құрылымдық және сенсорлық қасиеттердің оңтайлы үйлесімін қамтамасыз етеді. Псиллиумды қолдану синтетикалық тұрақтандырғыштарды пайдаланудан бас тартуға мүмкіндік береді және «clean label» тұжырымдамасына толық сәйкес келеді.

Әзірленген өнім еритін тағамдық талшықтардың болуына байланысты жоғары тағамдық құндылыққа ие, пребиотикалық қасиеттерімен ерекшеленеді және функционалдық, профилактикалық әрі диеталық тамақтану үшін ұсынылады. Технологияның жаңалығы Қазақстан Республикасында өнертабысқа патент алуға өтінім берумен расталған.

Түйін сөздер: *функционалдық йогурт, псиллиум, өсімдік текті тағамдық талшық, құрылым түзілу, реологиялық қасиеттер, сарысу бөлінуі, пребиотикалық қасиеттер.*

Г.Т. Юсупова[1]*, Ж.К. Шадьярова[1], Ж. Нұрланқызы[1], С.С. Толеубекова[2], А.К. Хаймулдинова[3]
[1]Казахский агротехнический исследовательский университет имени С.Сейфуллина,
010011, Республика Казахстан, г. Астана, проспект Жеңіс, 62
[2]Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, улица Глинки, 20А
[3]Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева
010008, Республика Казахстан, г. Астан, улица Сатпаева, 2
*e-mail: gaukhar.nitra@gmail.com

РАЗРАБОТКА И ОЦЕНКА ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ЙОГУРТА С ДОБАВЛЕНИЕМ РАСТИТЕЛЬНОГО ПИЩЕВОГО ВОЛОКНА

В статье представлена разработка технологии функционального йогурта с добавлением растительного пищевого волокна - псиллиума (Plantago ovata husk). Исследовано влияние дозировки псиллиума (0,3-1,0 %) на физико-химические, реологические и органолептические показатели продукта. Установлено, что внесение псиллиума не оказывает ингибирующего воздействия на молочнокислую микрофлору и не нарушает процесс ферментации. Добавление растительного волокна способствует формированию устойчивой белково-полисахаридной матрицы, увеличению вязкости до 1120 мПа·с и снижению синерезиса до 1,9 % по сравнению с контрольным образцом.

Оптимальной признана концентрация 0,5 %, обеспечивающая сбалансированное сочетание текстурных и сенсорных характеристик при сохранении традиционного вкуса и аромата йогурта. Показано, что использование псиллиума позволяет отказаться от синтетических стабилизаторов и соответствует концепции «clean label».

Разработанный продукт характеризуется повышенной пищевой ценностью за счёт содержания растворимых пищевых волокон, обладает пребиотическими свойствами и может быть рекомендован для функционального, профилактического и диетического питания. Новизна технологии подтверждена подачей заявки на патент на изобретение Республики Казахстан.

Ключевые слова: *функциональный йогурт, псиллиум, растительное пищевое волокно, структурообразование, реологические свойства, синерезис, пребиотические свойства.*

Авторлар туралы мәліметтер

Гаухар Тургалиевна Юсупова* – PhD, аға оқытушы, «Көлік техника, технология және стандарттау, сертификаттау және метрология» ББББТ, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: gauhar_20_90@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1722-1294.

Жазира Куспановна Шадьярова – PhD, аға оқытушы, «Көлік техника, технология және стандарттау, сертификаттау және метрология» ББББТ, С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: zhazirashadyarova@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9379-5735.

Жібек Нұрланқызы – магистр, аға оқытушы, «Көлік техника, технология және стандарттау, сертификаттау және метрология» ББББТ, С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: nurlankyzy.zhibek@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-7452-5243.

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.

Алтынгүл Құмашқызы Хаймулдинова – техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессоры, «Стандарттау, сертификаттау және метрология» кафедрасы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: akhaymuldinova@bk.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4629-6954

Сведения об авторах

Гаухар Тургалиевна Юсупова* – PhD, старший преподаватель, ГОП «Транспортная техника и технологии, стандартизация, сертификация и метрология», «Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина» г. Астана, Казахстан; e-mail: gauhar_20_90@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1722-1294.

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.

Жібек Нұрланқызы – магистр, старший преподаватель кафедры , ГОП «Транспортная техника и технологии, стандартизация, сертификация и метрология», Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, Республика Казахстан; e-mail: nurlankyzy.zhibek@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-7452-5243.

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.

Алтынгуль Кумашевна Хаймулдинова – кандидат технических наук, ассоциированный профессор, кафедра «Стандартизация, сертификация и метрологияЕвразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, г. Астана, Республика Казахстан; e-mail: akhaymuldinova@bk.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4629-6954.

Information about the authors

Gaukhar Yussupova* – 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: gauhar_20_90@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1722-1294.

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.

Zhibek Nurlankyzy – Master, 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: nurlankyzy.zhibek@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-7452-5243.

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.

Altyngul Khaimuldinova – candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of standardization, certification and Metrology, Eurasian National University named after L.Gumilyov, Astana city, Republic of Kazakhstan; e-mail: akhaymuldinova@bk.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4629-6954.

Received 30.03.2026
Revised 03.05.2026
Accepted 19.05.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-47

IRSTI: 65.63.33

A.T. Berdembetova[1], A.U. Shingisov[1], D.A. Tlevlessova[2], A.R. Taspoltayeva[1], A.Zh. Shinaliyeva[*]

[1]M. Auezov South Kazakhstan University
160000, Shymkent, Republic of Kazakhstan,Tauke Khan avenue, 5
[2]Almaty Technological University, 050012, Republic of Kazakhstan, Almaty, Tole bi str., 100
*e-mail: ainur_09_09@mail.ru

PLANT MODIFIERS OF COAGULATION AND PROTEIN RETENTION IN MIXTURES OF COW AND CAMEL MILK

Abstract: *The aim of this review is to analyse the mechanisms of plant extract action on milk coagulation and to evaluate their applicability in mixtures of cow and camel milk. The review includes publications devoted to the milk-clotting activity of plant proteases, the influence of polyphenolic compounds on casein micelle aggregation, and the role of technological parameters in the coagulation process.*

The analysis shows that plant extracts can act through two main mechanisms. The first mechanism is associated with proteolytic hydrolysis of κ-casein and the initiation of micelle aggregation. The second

©A.T. Berdembetova, A.U. Shingisov, D.A. Tlevlessova, A.R. Taspoltayeva, A.Zh. Shinaliyeva, 2026

mechanism is related to interactions of polyphenols and pectic substances with proteins, which modifies interparticle interactions and the water-holding capacity of the gel. The efficiency of extracts depends on their composition, concentration, pH of the medium, temperature, and calcium content.

However, plant proteases often have lower selectivity compared to chymosin. This may lead to excessive proteolysis and weakening of the curd structure. In mixtures of cow and camel milk, additional factors are related to differences in protein composition and colloidal stability of the milk systems.

The review confirms the potential of plant-based modifiers of milk coagulation. At the same time, it highlights the need for careful optimization of technological conditions and a mechanistic approach to their application. For practical implementation, further studies are required to evaluate gel microstructure, protein retention, and the balance between milk-clotting and proteolytic activities.

Key words: *casein, κ-casein, mixtures, extracts, gelation, syneresis, curd, stability.*

Introduction

Milk coagulation is the process of protein clot formation. It is based on the destabilization of casein micelles and their subsequent aggregation. In cow's milk, this mechanism has been well studied. It involves the breakdown of κ-casein and the formation of a three-dimensional protein network with the participation of calcium [1].

Camel milk differs in composition and structure. It has a lower κ-casein content. The micelles are larger. The mineral balance differs from cow's milk. As a result, coagulation is slower. The resulting curd is less dense. Protein loss into whey may be higher [2].

When cow and camel milk are mixed, their properties do not average out. A heterogeneous system is formed. It contains different types of micelles. They have different surfaces and varying sensitivities to pH and calcium. This leads to uneven aggregation. The gel network becomes non-uniform, with zones of weakness forming within it [3].

This structure may explain the reduced yield of curd in mixtures. Protein losses are not due to a protein deficiency, but to the specific properties of the spatial network.

Plant extracts are considered as potential modifiers of these processes. They contain polyphenols, pectin substances, and organic acids. These components can alter micelle interactions and influence the rate of aggregation and gel density.

However, most studies are applied in nature, assessing yield and texture. The mechanisms of interaction are poorly described.

Therefore, a systemic analysis is needed. The influence of plant components should be examined from the perspective of colloidal chemistry and protein network structure.

The aim of this review is to analyze the mechanisms by which plant extracts influence coagulation and protein retention in cow and camel milk mixtures. A conceptual model explaining the possible compensatory effect of such modifiers is also proposed.

Literature Review

Characteristics of the camel milk protein system and their relationship to coagulation

In the literature, camel milk is described as having a casein micelle structure distinct from that of cow's milk. The low proportion of κ-casein is often emphasized. κ-casein is important for stabilizing micelles and also determines the efficiency of enzymatic coagulation. Without it, micelles have poorer control over aggregation. Therefore, the gel is weaker and more porous [4].

Many authors also note the larger micelles in camel milk. Large micelles can form a network with large pores. This facilitates whey drainage but also increases the risk of protein loss and reduced curd yield [5].

A separate block of research is devoted to the role of mineral balance in milk coagulation. Calcium ions participate in the binding of casein particles and strengthen intermicellar contacts. Changes in the content of micellar calcium phosphate and pH significantly affect the aggregation of casein micelles and the structure of the forming gel [6]. For camel milk, features of micelle mineralization and calcium distribution are described, which can alter the sensitivity of the protein system to Ca^{2+} and pH. As a result, the same concentration of $CaCl_2$ can have different effects in cow's and camel's milk.

Some publications discuss the composition of whey proteins. Camel milk lacks β-lactoglobulin. This alters thermal denaturation and subsequent interactions with caseins. Therefore, the system's behavior during heating and acid coagulation may differ from that of cow's milk.

The main conclusion of this line of research is simple. The difficulties in coagulating camel milk are related to its basic micellar architecture. These limitations cannot be completely eliminated by technological modifications alone. The aggregation pathway or network structure must be altered.

Coagulation in mixtures of cow and camel milk.

Studies on mixtures typically show improved coagulation with increasing cow's milk content. However, the improvement is often nonlinear. This is because the mixture becomes a heterogeneous system. It contains two types of micelles simultaneously. They have different surface properties and different sensitivities to calcium and pH. Therefore, aggregation can occur asynchronously.

Some studies note that the mixture produces a gel, but the curd yield remains lower than that of pure cow's milk. This is explained by the poor integration of camel micelles into the overall network. As a result, the network is non-uniform, with «weak zones» appearing. These zones facilitate whey release, which reduces protein retention [4].

It's important to note that there's a discrepancy in the literature between the «gel strength» and «yield» parameters. Sometimes, yield can be higher with a looser gel. This occurs due to water retention. Therefore, comparisons between studies are often inaccurate. Different authors measure different endpoints. Some evaluate yield. Others evaluate texture. Still others evaluate syneresis. This creates a perception of «contradictions», although in fact, the evaluation criteria vary [7-10].

Another source of discrepancies is the coagulation method. Mixtures employ acid coagulation, enzymatic coagulation, or a combined approach. These mechanisms produce different types of networks. They also respond differently to plant components.

Plant modifiers: general composition and principle of action

Plant extracts typically contain several classes of compounds. These include polyphenols, polysaccharides (including pectins), and organic acids. Proteases are sometimes present. Therefore, a single extract can act through several mechanisms simultaneously [11].

The literature often uses the term «natural coagulants». However, mechanistically, it is important to distinguish two cases. The first is when the extract acts as an enzyme source. This is similar to a Rennet-like pathway. The second is when the extract acts as a colloid modifier. In this case, it alters the charge, hydrophobicity, and interactions of micelles. These two cases can produce the same visual result (a coagulant), but different structures and different quality [8].

Polyphenols: bridging aggregation and precipitation risk

Polyphenols bind to proteins through hydrogen bonds and hydrophobic interactions. Caseins are particularly sensitive to polyphenols. This is due to their open structure. At moderate concentrations, polyphenols can enhance aggregation. They can act as «bridges» between particles, increasing the network density. This may improve protein retention [12].

However, the literature also notes a reverse effect. At high polyphenol concentrations, independent coagulation of protein-polyphenol complexes is possible. This leads to the formation of aggregates that do not integrate into the continuous gel network. This deteriorates the structure. This can increase turbidity. This can impair flavor due to astringency [13-15].

There is another important aspect. Protein-polyphenol complexes can alter protein digestibility. Some studies show a decrease in the rate of proteolysis [16, 17].

Therefore, technological gains can be accompanied by nutritional tradeoffs. This issue is rarely considered in applied studies.

Pectins can influence coagulation in several ways. At neutral pH, they can cause a depletion effect. This increases the effective attraction of particles, accelerating flocculation [18]. However, it can also increase heterogeneity. In acidic coagulation, the role of electrostatics and calcium increases. Pectin can form complexes with casein [19].

This increases water-holding capacity. This can reduce syneresis. Contradictions in the literature often arise from the different types of pectin. The degree of esterification is important. The molecular distribution is important. The calcium concentration is important. The rate at which the pH drops is important [20, 21].

Therefore, the same component can either improve the gel or destroy its structure. This is the «narrow process window».

Ionic factor: $CaCl_2$, phosphates and buffer capacity

Adding $CaCl_2$ typically accelerates coagulation and strengthens the network. This is due to the strengthening of bonds between casein particles. However, excess calcium can increase syneresis, making the network more rigid and prone to drainage [22].

The role of phosphates is also discussed in publications. They can bind calcium and alter the availability of ions. Therefore, the effect of $CaCl_2$ depends on the initial mineralization of the milk and on the additives [23-25].

In cow and camel milk mixtures, ionic balance is particularly important. This is due to the different "tuning" of the micelles in each milk. Therefore, the same additives produce different results at different mixing ratios.

Plant extracts are typically low in protein. They can only influence the amino acid profile indirectly. This indirect effect is related to the retention of different protein fractions. If the protein chain retains more whey proteins, the relative distribution of amino acids changes. However, this does not mean a true enrichment of the limiting amino acid. To truly improve the amino acid profile, protein ingredients are needed, such as isolates or hydrolysates.

Review Methods

To analyze the effect of plant extracts on milk coagulation, the authors used publications obtained from international scientific databases, including PubMed, ScienceDirect, Food Chemistry, and other high-impact journals. The review included both experimental studies and comparative and mechanistic papers on plant coagulants and their properties. Inclusion criteria included data on the milk-coagulating activity of plant extracts, descriptions of the mechanisms of interaction with the milk protein system, measurements of rennin-like activity, or changes in the structural properties of the clot.

Data evaluation methods included the following parameters:

– Milk coagulation activity (MCA) over various pH and temperature ranges;

– Milk coagulation activity/proteolytic activity (MCA/PA) ratio;

– The effect of extracts on the structural characteristics of the resulting gel (texture, viscosity modulus, microstructure);

– Specific mechanisms of hydrolysis of casein fractions, including κ-casein;

– Comparative analysis with commercial coagulants (e.g., chymosin).

The studies were evaluated in terms of the use of plant extracts as an alternative to animal or microbial coagulants, as well as their impact on the technological properties of milk and solid milk products.

Review results

4. Results

The analysis of published studies showed that plant extracts influence milk coagulation through different mechanisms, including enzymatic, colloidal, and ionic interactions. Their effect depends on the type of active compounds and the composition of the milk system. To better understand their applicability in cow and camel milk mixtures, the results were grouped according to the main classes of modifiers.

4.1 Plant proteases

Plant proteases are the most studied group of plant milk coagulants. Their action is similar to animal rennet because they hydrolyse κ-casein and initiate aggregation of casein micelles. However, unlike chymosin, most plant proteases are less selective.

Chymosin specifically cleaves the Phe105–Met106 bond of κ-casein. Plant proteases can also hydrolyse κ-casein, but they often continue degrading other casein fractions such as αs1-, αs2-, and β-caseins after coagulation has already started. As a result, the formed gel becomes softer, protein losses into whey increase, and the MCA/PA ratio decreases compared to chymosin [28].

This does not mean that plant proteases cannot be used in dairy systems. However, their application requires more precise control of technological conditions.

Among the studied plant sources, pumpkin seed peptidases (Cucurbita moschata) demonstrated one of the widest activity ranges (pH 4.5-8.5; 20-80°C) and formed gels with high elastic modulus G′ [11]. Kiwi extract containing actinidin produced curd with texture similar to chymosin-induced gels at approximately 40°C [9]. Artichoke flower extract (Cynara scolymus) showed stable proteolytic activity and provided curd yields up to 17% in mini-cheese systems at pH 6.4 and 37°C [26].

At the same time, melon and Solanum elaeagnifolium extracts demonstrated lower MCA/PA ratios and produced looser gels because of extensive non-selective proteolysis [9, 27]. Therefore, their use as independent coagulants may be limited. Table 1 presents the comparative characteristics of the main plant milk coagulants.

Table 1 – Comparative characteristics of plant milk coagulants

Plant / source	Active component	Opt. pH	Temp., °C	MCA/PA	Curd characteristics	Ref.
Artichoke (Cynara scolymus L.)	Phenolic/protease extract (lyophilisate)	6.4	37-45	Moderate	Yield up to 17% (mini-cheese); stable proteolytic activity	[26]
Pumpkin (Cucurbita moschata)	Seed peptidases	4.5-8.5	20-80	High	Strong gel; high elastic modulus G′; wide working range	[11]
Kiwi (Actinidia sp.)	Actinidin (cysteine protease)	n/d	~40	Moderate	Curd texture comparable to chymosin; narrow temperature range	[9]
Melon (Cucumis melo)	Pulp proteases	n/d	45-75	Moderate	Loose curd; lower yield; wide temperature range	[9]
Ginger (Zingiber officinale)	Zingibain (cysteine protease)	n/d	~63	Moderate	Narrow optimum; activity at high temperature	[9]
Tompillo (Solanum elaeagnifolium)	Aspartate protease from fruits	n/d	n/d	Low	Slow coagulation; less dense gel; extensive non-selective proteolysis	[27]
Chymosin (control)	Aspartate protease (animal origin)	6.0-6.6	30-37	High	Reference: dense curd, high selectivity for κ-casein	[28]

Note: MCA/PA – milk-clotting to proteolytic activity ratio; n/d – no data; G′ – storage modulus of gel

An important observation from the literature is that practical applicability depends not only on coagulation time, but also on the MCA/PA ratio. Rapid coagulation combined with excessive proteolytic activity may lead to high protein losses and deterioration of curd texture during storage and ripening. However, this parameter is not reported consistently in many studies, which complicates direct comparison between different plant coagulants.

4.2 Polyphenols

Polyphenols affect milk coagulation through mechanisms different from proteases. They do not hydrolyse κ-casein. Instead, they interact with casein proteins through hydrogen bonds and hydrophobic interactions [14].

At moderate concentrations, polyphenols may act as bridges between casein micelles. This increases interparticle attraction and promotes formation of a denser gel network. As a result, protein retention may improve even without enzymatic activity.

However, the positive effect is observed only within a limited concentration range. At high concentrations, protein-polyphenol complexes precipitate independently from the continuous gel network. This leads to formation of isolated aggregates, increased turbidity, syneresis, and defects in gel structure [13-15].

Another important aspect is the effect of polyphenols on protein digestibility. Several studies reported that stable protein-polyphenol complexes are more resistant to proteolysis, which may reduce protein bioavailability [16, 17]. Therefore, improvement of texture may be accompanied by nutritional limitations. The concentration-dependent effects of polyphenols are summarised in Table 2.

In cow and camel milk mixtures, the effect of polyphenols may become more complex because the two micelle populations have different surface properties. Camel milk micelles are larger and contain less κ-casein, which may influence their interaction with polyphenols differently compared to cow milk micelles. At present, this mechanism remains poorly studied.

Table 2 – Concentration-dependent effects of polyphenols on milk gel structure

Polyphenol concentration	Effect on casein micelles	Gel/curd outcome	Ref.
Moderate	Hydrogen bonding and hydrophobic interactions with open casein structure; bridging between particles	Increased network density; improved protein retention	[12, 14]
High	Independent coagulation of protein-polyphenol complexes outside the gel network	Fragmented gel structure; increased turbidity; astringent off-flavour	[13-15]
Any level	Formation of stable protein-polyphenol complexes resistant to proteolysis	Reduced digestibility of retained proteins – nutritional tradeoff	[16, 17]

4.3 Pectins

Pectin itself is not a direct milk coagulant. Its main role is associated with modification of the colloidal environment around casein micelles. Depending on pH, ionic strength, and degree of esterification, pectin may either stabilise or destabilise the system.

At neutral pH, high-molecular-weight pectin promotes depletion interactions between micelles, increasing effective attraction and accelerating flocculation [18]. However, this may also increase heterogeneity of mixed milk systems.

Under acidic conditions, the mechanism changes. Low-esterified pectins can interact with casein micelles through calcium bridges [19]. This interaction improves water-holding capacity and reduces syneresis, which may increase curd yield.

Differences reported in the literature are mainly associated with variations in pectin structure, degree of esterification, molecular weight distribution, calcium concentration, and acidification rate [20, 21]. Since these parameters are not always described in publications, comparison between studies is often difficult. The main effects of pectin under different conditions are presented in Table 3.

Table 3 – Pectin effects on milk gel depending on pH and esterification degree

Condition	Mechanism	Effect on gel	Key variables
Neutral pH	Depletion interaction – increased effective attraction between micelles	Accelerated flocculation; risk of heterogeneous network	Pectin MW, concentration
Acidic pH, high esterification	Limited casein-pectin electrostatic interaction	Minimal influence on coagulation rate	Degree of esterification, pH drop rate
Acidic pH, low esterification	Casein–pectin complex formation via Ca^{2+} bridges	Increased water-holding capacity; reduced syneresis	Ca^{2+} concentration, esterification degree

Note: MW – molecular weight; Ca^{2+} – calcium ion concentration.

4.4 Ionic effects

Although calcium is not a plant modifier, it strongly influences the activity of plant coagulants because the ionic environment determines aggregation behaviour of casein micelles.

Addition of $CaCl_2$ strengthens intermicellar calcium phosphate bridges, accelerates aggregation, and increases gel firmness [22]. In cow milk systems, the optimal concentration range is relatively well established.

However, camel milk behaves differently. Camel milk micelles have another mineralisation pattern and respond differently to added calcium ions [6]. Therefore, the same $CaCl_2$ concentration may produce different effects depending on the ratio of cow and camel milk in the mixture.

Phosphates further complicate the system because they can bind free calcium ions and reduce their availability for intermicellar interactions [23, 24]. In addition, differences in buffer capacity between cow and camel milk influence pH reduction during acidification and affect aggregation kinetics.

These findings indicate that optimisation of ionic conditions in mixed milk systems cannot be directly transferred from single-milk systems. Separate optimisation is required for each milk ratio.

The main ionic effects observed in cow/camel milk mixtures are summarised in Table 4.

Table 4 – Ionic factors and their behaviour in cow/camel milk mixtures

Factor	Effect at optimal level	Effect when excessive / absent	Specific features in cow/camel mixture
$CaCl_2$	Strengthens inter-micellar bonds; accelerates aggregation	Excess (increased syneresis, overly rigid gel prone to drainage)	Same $CaCl_2$ dose acts differently at different mixing ratios due to distinct micelle mineralization
Inorganic phosphates	Modulate Ca^{2+} availability; buffer capacity adjustment	Sequester calcium (impaired aggregation)	Camel milk micelles have different micellar calcium phosphate content – complicates additive predictions
pH	Lowering pH reduces zeta-potential, promotes micelle approach and aggregation	Too low (acid-induced precipitation rather than structured gel formation)	Asynchronous pH sensitivity of two micelle populations – coagulation proceeds unevenly

4.5 Comparative analysis of plant modifier classes

The comparison of different modifier classes showed that plant proteases, polyphenols, pectins, and ionic factors do not act independently. Their effects may interact with each other within the milk system.

For example, extracts containing both proteases and polyphenols may simultaneously induce κ-casein hydrolysis and polyphenol-mediated interactions with casein proteins. Depending on process conditions, these effects may either improve or destabilise the gel structure.

In cow and camel milk mixtures, none of the modifier classes alone fully solves the problem of heterogeneous aggregation. Plant proteases initiate coagulation but cannot completely synchronise aggregation of structurally different micelles. Polyphenols may partially improve interactions between particles, whereas pectins mainly contribute to water retention and reduction of syneresis. Ionic adjustment is also necessary, but alone it is insufficient.

These observations suggest that combined approaches may be more promising than the use of a single modifier class. Combinations of plant proteases with moderate MCA/PA ratios and low-esterified pectins under controlled Ca^{2+} concentrations may improve both coagulation kinetics and structural stability of mixed milk gels. However, direct experimental validation of such systems remains limited. The comparative characteristics of the main modifier classes are presented in Table 5.

The overall analysis showed that effective optimisation of cow and camel milk mixtures requires consideration of multiple interacting factors rather than isolated technological parameters. Particular attention should be given not only to curd yield, but also to gel microstructure, protein retention, and stability of the formed network.

Discussion

The review data highlights that the activity of plant coagulants depends not only on their source but also on process parameters. Milk pH-lowering the pH accelerates coagulation for many plant extracts – is important. Process temperature-optimal activity ranges vary significantly between sources – is important. Enzyme concentration influences both coagulation time and curd texture. These parameters must be optimized for each plant coagulant and specific milk raw material.

Summary of the Effects of Plant Extracts

Overall, publications show that:

– Plant extracts can act as milk coagulants similar to rennet, but with broader proteolytic activity.

– They alter aggregation kinetics and gel structural characteristics through interaction with casein fractions.

– Their effectiveness and clot properties depend on the starting material, extract composition, and process conditions.

These data confirm that plant extracts are promising coagulation modifiers in dairy systems, but require precise optimization to achieve results comparable in structure and functionality to traditional coagulants.

Literature shows that the coagulation problem in cow and camel milk mixtures is structural in nature. It is associated with micellar heterogeneity and asynchronous aggregation. Plant extracts can act as aggregation pathway modifiers. However, their effect depends on the extract's composition and the process conditions.

Table 5 – Comparative analysis of plant modifier classes in the context of cow/camel milk mixtures

Criterion	Plant proteases	Polyphenols	Pectins	Ionic factors ($CaCl_2$)	Applicability in cow/camel milk mixture
Coagulation mechanism	Enzymatic hydrolysis of κ-casein	Bridging / complex formation	Depletion / electrostatic complex	Inter-micellar bond reinforcement	All mechanisms can work simultaneously – combined effects poorly studied in mixed systems
Selectivity	Lower than chymosin; broad proteolysis	Non-enzymatic; no κ-casein specificity	Non-enzymatic	Non-enzymatic	Low MCA/PA of plant proteases is a risk – excessive proteolysis worsens protein retention
Effect on curd yield	Comparable to chymosin when optimised (kiwi, pumpkin)	May improve via network densification at moderate levels	Reduces syneresis (higher yield via water retention)	Can increase yield through faster network formation	Combination of pectin + $CaCl_2$ may be most relevant for camel milk micelle integration
Main limitation	Narrow temperature optimum; variable MCA/PA	High concentration causes off-flavour and structural defects	Effect highly dependent on esterification degree and Ca^{2+} level	Excess causes syneresis and rigid gel	No standardised protocols for mixed milk systems – direct comparison between studies impossible
Nutritional impact	Risk of protein fragmentation in whey	Reduced protein digestibility via complex formation	Minor – dietary fibre addition	Negligible	Nutritional tradeoffs of polyphenol-protein interactions rarely addressed in applied studies

Key gaps remain:
– Extracts are rarely standardized by composition;
– Gel microstructure is rarely analyzed;
– Little data exists on protein loss in whey by fraction;
– Studies on the digestibility of protein–polyphenol complexes are limited;
– Few models describe heterogeneous aggregation in mixtures.

These gaps form the basis for further mechanistic research and rational process design.

It is also important to note that temperature and pH have a significant impact on the activity of milk-clotting enzymes from plant sources. Optimal activity ranges vary depending on the plant and the specific protease, requiring adaptation of process parameters for each specific case. Without standardized conditions, it is impossible to compare results or apply them in practice.

Thus, plant proteases can act as functional coagulants, but their use requires precise control of process parameters: temperature, pH, calcium concentration, and coagulation time. Furthermore, their impact on the micro- and macrostructure of the gel must be analyzed in terms of fractional protein retention, not just visual clot formation.

Conclusion

The review showed that plant extracts have the ability to modulate the milk coagulation process through enzymatic and colloidal mechanisms. Many plants contain proteases that can break down κ-casein and initiate micelle aggregation, making them potential alternatives to animal and microbial coagulants. Their effectiveness and impact on product properties depend on the specificity of the enzymes, process conditions (pH, temperature, calcium concentration), and the composition of the source milk.

Plant proteases can improve protein retention and modify the network structure, but are often accompanied by decreased selectivity, excessive hydrolysis, and altered gel quality. This emphasizes the need for a mechanistic approach to their use, including optimization of process parameters.

Further research should ensure:

– standardization of extracts by composition and activity,

– study of the effect of proteases on the micro- and macrostructure of the gel,

– modeling of the interaction of plant enzymes with milk proteins at the molecular level;

– assessment of the impact on the nutritional and organoleptic properties of finished products.

Only such an interdisciplinary approach will enable the use of plant extracts as complete and controllable coagulation modifiers in dairy systems, including complex mixtures such as cow's and camel's milk.

References

1. An updated comprehensive review of camel milk: Composition, therapeutic properties, and industrial applications / A. Khaliq et al // Food Bioscience. – 2024. – Vol. 62. – Article 105531. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.105531.
2. Mongush S.D. Tehnologicheskie svojstva moloka verbljudov v raznye periody laktacii / Mongush S.D. // Vestnik HGU im. N. F. Katanova. – 2019. – № 28. https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologicheskie-svoystva-moloka-verblyudov-v-raznye-periody-laktatsii (data obrashhenija: 28.02.2026). (In Russian).
3. Omrani A. Camel milk: Composition, properties and processing potential / A. Omrani // Moroccan Journal of Agricultural Sciences. – 2025. https://doi.org/10.5281/ZENODO.15363394.
4. Seifu E. Camel milk products: innovations, limitations and opportunities / E. Seifu // Food Production, Processing and Nutrition. – 2023. – Vol. 5. – Article 15. https://doi.org/10.1186/s43014-023-00130-7.
5. Ho T.M. Acid gelation properties of camel milk – effect of gelatin and processing conditions / T.M. Ho, J. Zhao, N. Bansal // Food and Bioprocess Technology. – 2022. – Vol. 15. – P. 2363-2373. https://doi.org/10.1007/s11947-022-02890-5.
6. Ahmadi E. Influence of heating temperature and pH on acid gelation of micellar calcium phosphate-adjusted skim milk / E. Ahmadi, T. Vasiljevic, T. Huppertz // Foods. – 2024. – Vol. 13, № 11. – P. 1724. https://doi.org/10.3390/foods13111724.
7. Harbourne N. Effects of addition of phenolic compounds on the acid gelation of milk / N. Harbourne, J.C. Jacquier, D. O'Riordan // International Dairy Journal. – 2011. – Vol. 21, № 3. – P. 185-191. https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2010.10.003.
8. Yildirim-Elikoglu S. Effect of phenolic compounds on the activity of proteolytic enzymes during rennet induced coagulation of milk and ripening of miniature cheese / S. Yildirim-Elikoglu, H. Vural, Y.K. Erdem // LWT – Food Science and Technology. – 2021. – Vol. 136. – Article 110337. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110337.
9. Comparison of the milk-clotting properties of three plant extracts / M.A. Mazorra-Manzano et al // Food Chemistry. – 2013. – Vol. 141, № 3. – P. 1902-1907. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.05.042.
10. Fruit extract derived from a mixture of noni, pineapple and mango capable of coagulating milk and producing curd with antidiabetic activities / J. Vejayan et al // Food Technology and Biotechnology. – 2022. – Vol. 60, № 3. – P. 375-385. https://doi.org/10.17113/ftb.60.03.22.7456.
11. Kumar A. Rheological and physico-chemical properties of milk gel using isolate of pumpkin (Cucurbita moschata) seeds: A new source of milk clotting peptidase / A. Kumar, S. Sasmal // Food Hydrocolloids. – 2020. – Vol. 106. – Article 105866. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105866.
12. Issledovanie razlichnyh metodov izvlechenija polifenolov iz rastitel'nogo syr'ja / A. Muldasheva et al // Gylym zhane bilim zhurnaly. – 2025. – T. 4, № 2 (79). – S. 76-84. https://nauka.wkau.kz/index.php/gbj/article/view/2750 (data obrashhenija: 28.02.2026). (In Russian).
13. Polifenoly kak perspektivnye biologicheski aktivnye soedinenija / T.N. Bobrysheva et al // Voprosy pitanija. – 2023. – № 1(545). https://cyberleninka.ru/article/n/polifenoly-kak-perspektivnye-biologicheski-aktivnye-soedineniya (data obrashhenija: 28.02.2026). (In Russian).
14. Protein/peptide-polyphenol interactions: molecular mechanisms, functional synergy and emerging applications / C. Yan et al // Trends in Food Science & Technology. – 2025. – Vol. 163. – Article 105194. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2025.105194.

15. Effects of polyphenols on the structure, interfacial properties and emulsion stability of pea protein / S. Tang et al // Molecules. – 2025. – Vol. 30, № 8. – Article 1674. https://doi.org/10.3390/molecules30081674.
16. Mylvaganam H. Plant protein–dietary polyphenol interactions: implications for protein structural and functional properties and digestibility / H. Mylvaganam, F. Nurkolis, A. Tsopmo // Food Chemistry International. – 2025. – Vol. 1, № 2. – P. 110-125. https://doi.org/10.1002/fci2.70013.
17. Effect of protein–polyphenol interactions on the structural and digestive properties of pork myofibrillar proteins / Y. Chen et al // Journal of Food Engineering. – 2026. – Vol. 407. – Article 112841. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2025.112841.
18. Influence of cations, pH and dispersed phases on pectin emulsification properties / Ş. Ürüncüoğlu et al // Current Research in Food Science. – 2021. – Vol. 4. – P. 398-404. https://doi.org/10.1016/j.crfs.2021.05.008.
19. Mikaelsson M.E. The role of calcium in coagulation and anticoagulation / M.E. Mikaelsson // Developments in Hematology and Immunology. – 1991. – Vol. 26. – P. 35-52. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-3900-1_3.
20. Pectin: An overview of sources, extraction and applications / A. Roman-Benn et al // Food Chemistry Advances. – 2023. – Vol. 2. – Article 100192. https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100192.
21. Said N.S. Pectin hydrogels: gel-forming behaviors, mechanisms and food applications / N.S. Said, I.F. Olawuyi, W.Y. Lee // Gels. – 2023. – Vol. 9, № 9. – Article 732. https://doi.org/10.3390/gels9090732.
22. The effect of calcium chloride addition on the microstructure and composition of Cheddar cheese / L. Ong et al // International Dairy Journal. – 2013. – Vol. 33, № 2. – P. 135-141. https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2013.03.002.
23. Nieuwenhuijse H. Heat-induced changes in milk salts: a review / H. Nieuwenhuijse, T. Huppertz // International Dairy Journal. – 2022. – Vol. 126. – Article 105220. https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2021.105220.
24. A review on the effect of calcium sequestering salts on casein micelles / G.K. Deshwal et al // Molecules. – 2023. – Vol. 28, № 5. – Article 2085. https://doi.org/10.3390/molecules28052085.
25. Wang W. The influence of free calcium and magnesium ions incorporation on the physical properties and protein profiles of sodium caseinate solutions / W. Wang, Q. Lin, X. Li // Journal of Food Measurement and Characterization. – 2025. – Vol. 19, № 11. – P. 8731-8742. https://doi.org/10.1007/s11694-025-03566-2.
26. Milk-clotting properties and primary proteolysis of a lyophilised extract from artichoke flowers (Cynara scolymus L.) / V. Crosetti et al // Food Technology and Biotechnology. – 2023. – Vol. 61, № 3. – P. 402-409. https://doi.org/10.17113/ftb.61.03.23.8142.
27. Milk-gelling properties of proteases extracted from the fruits of Solanum elaeagnifolium Cavanilles / C. Nájera-Domínguez et al // International Journal of Food Science. – 2022. – Article 4625959. https://doi.org/10.1155/2022/4625959.
28. Effect of pH on the gelation properties of skim milk gels made from plant coagulants and chymosin / C.L. Esteves et al // Journal of Dairy Science. – 2003. – Vol. 86, № 8. – P. 2558-2567. – https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73850-8.

А.Т. Бердембетова[1], А.У. Шингисов[1], Д.А. Тлевлесова[2], А.Р. Тасполтаева[1], А.Ж. Шиналиева[1]*
[1]М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті,
160000, Қазақстан Республикасы, Шымкент қаласы, Тәуке хан даңғылы, 5
[2]Алматы технологиялық университеті,
050012, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Төле би к-сі, 100
*e-mail: ainur_09_09@mail.ru

СИЫР МЕН ТҮЙЕ СҮТІНІҢ ҚОСПАЛАРЫНДА АҚУЫЗДЫҢ КОАГУЛЯЦИЯСЫ МЕН САҚТАЛУЫНЫҢ ӨСІМДІК МОДИФИКАТОРЛАРЫ

Осы шолудың мақсаты-өсімдік сығындыларының сүт коагуляциясына әсер ету механизмдерін талдау және олардың сиыр мен түйе сүтінің қоспаларына қолданылуын бағалау. Шолу мақаласына кіретін сүт-өсімдік протеазаларының коагуляциялық белсенділігі, полифенол қосылыстарының казеин мицеллаларының агрегациясына әсері және процестің технологиялық параметрлерінің рөлі.

Талдау нәтижелері өсімдік сығындылары екі негізгі механизм арқылы әрекет ете алатынын көрсетеді. Бірінші механизм к-казеиннің протеолитикалық гидролизімен және мицелла агрегациясының басталуымен байланысты. Екінші механизм полифенолдар мен пектиндік заттардың ақуыздармен өзара әрекеттесуіне байланысты, бұл гельдің бөлшектік өзара әрекеттесуі мен суды ұстау қабілетін өзгертеді. Сығындылардың тиімділігі олардың құрамына, концентрациясына, ортаның pH-на, температураға және кальций құрамына байланысты.

Дегенмен, өсімдік протеазалары көбінесе химозинмен салыстырғанда төмен селективтілікке ие. Бұл артық протеолизге және тромб құрылымының әлсіреуіне әкелуі мүмкін. Сиыр мен түйе сүтінің қоспаларында ақуыз профиліндегі және компоненттердің коллоидтық тұрақтылығындағы айырмашылық қосымша рөл атқарады.

Шолу өсімдік коагуляциясының модификаторларын қолдану перспективасын растайды, бірақ технологиялық жағдайларды дәл оңтайландыру және оларды қолдануға механикалық көзқарас қажеттілігін көрсетеді. Практикалық іске асыру үшін гельдің микроқұрылымын, ақуызды сақтауды және протеолитикалық белсенділіктің тепе-теңдігін бағалауға бағытталған зерттеулер қажет.

Түйін сөздер: *казеин, к-казеин, қоспалар, сығындылар, гельдеу, синерезис, сүзбе, тұрақтылық.*

А.Т. Бердембетова[1], А.У. Шингисов[1], Д.А. Тлевлесова[2], А.Р. Тасполтаева[1], А.Ж. Шиналиева[1]*

[1]Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова,
160000, Республика Казахстан г. Шымкент, пр.Тауке-хана,5
[2]Алматинский технологический университет, 050012, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Толе би, 100
*e-mail: ainur_09_09@mail.ru

РАСТИТЕЛЬНЫЕ МОДИФИКАТОРЫ КОАГУЛЯЦИИ И УДЕРЖАНИЯ БЕЛКА В СМЕСЯХ КОРОВЬЕГО И ВЕРБЛЮЖЬЕГО МОЛОКА

Цель настоящего обзора – проанализировать механизмы действия растительных экстрактов на коагуляцию молока и оценить их применимость для смесей коровьего и верблюжьего молока. В обзор включены публикации, посвящённые молоко-коагулирующей активности растительных протеаз, влиянию полифенольных соединений на агрегацию казеиновых мицелл и роли технологических параметров процесса.

Результаты анализа показывают, что растительные экстракты могут действовать через два основных механизма. Первый механизм связан с протеолитическим гидролизом к-казеина и инициацией агрегации мицелл. Второй механизм связан с взаимодействием полифенолов и пектиновых веществ с белками, что изменяет межчастичные взаимодействия и водоудерживающую способность геля. Эффективность экстрактов зависит от их состава, концентрации, pH среды, температуры и содержания кальция.

Однако растительные протеазы часто обладают более низкой селективностью по сравнению с химозином. Это может приводить к избыточному протеолизу и ослаблению структуры сгустка. В смесях коровьего и верблюжьего молока дополнительную роль играет различие в белковом профиле и коллоидной стабильности компонентов.

Обзор подтверждает перспективность применения растительных модификаторов коагуляции, но подчёркивает необходимость точной оптимизации технологических условий и механистического подхода к их использованию. Для практической реализации требуются исследования, направленные на оценку микроструктуры геля, удержание белка и баланс протеолитической активности.

Ключевые слова: *казеин, к-казеин, смеси, экстракты, гелеобразование, синерезис, творог, стабильность.*

Information about the authors:

Ainur Tuimebayevna Berdimbetova – Doctoral student, M. Auezov South Kazakhstan University, Higher School of Textile and Food Engineering, Shymkent, Kazakhstan; e-mail: ainura13_84@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-7717-2373.

Azret Utebayevich Shingisov – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Technology and Food Safety, Higher School of Textile and Food Engineering, Shymkent, Kazakhstan; e-mail: azret_utebai@mail.ru. ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0726-8232.

Dinara Abayevna Tlevlessova – Acting Professor, Department of Food Technology, Almaty Technological University, Republic of Kazakhstan; e-mail: tlevlessova@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5084-6587.

Aibala Rysbekovna Taspoltayeva – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of «Food engineering», M.Auezov' South-Kazakhstan University, Republic of Kazakhstan; e-mail:aibala.taspoltaeva.69@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0286-4721.

Ainur Zhandildayevna Shinaliyeva* – Doctoral student, M. Auezov South Kazakhstan University, Higher School of Textile and Food Engineering, Shymkent, Kazakhstan; e-mail: ainur_09_09@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-8656-0302.

Авторлар туралы мәліметтер

Айнур Туймебаевна Бердембетова – докторант, М.Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Тоқыма және тамақ инженериясы жоғары мектебі, Шымкент, Қазақстан; e-mail: ainura13_84@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-7717-2373.

Азрет Утебаевич Шингисов – техника ғылымдарының докторы, «Азық-түлік өнімдерінің технологиясы және қауіпсіздігі» кафедрасының профессоры, Шымкент, Қазақстан; e-mail: azret_utebai@mail.ru. ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0726-8232.

Динара Абайқызы Тлевлесова – Азық-түлік технологиялары кафедрасының профессоры м.у.а, Алматы технологиялық университеті, Алматы, Қазақстан; e-mail: tlevlessova@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/ 0000-0002-5084-6587.

Айбала Рысбековна Тасполтаева – т.ғ.к., доцент «Тамақ инженериясы» кафедрасы, М.Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Тәуке хан даңғылы, 5 Қазақстан Республикасы, 160012. e-mail:aibala.taspoltaeva.69@mail.ru. ORCID: 0000-0002-0286-4721

Айнұр Жандильдақызы Шиналиева* – докторант, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Тоқыма және тамақ инженериясы жоғары мектебі, Шымкент, Қазақстан; e-mail: ainur_09_09@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-8656-0302.

Сведения об авторах

Айнур Туймебаевна Бердембетова – докторант, Южно-Казахстанский университет имени М. Ауэзова, Высшая школа Текстильной и пищевой инженерии, Шымкент, Казахстан; e-mail: ainura13_84@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-7717-2373.

Азрет Утебаевич Шингисов – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология и безопасность продовольственных продуктов», Высшая школа текстильной и пищевой инженерии, Шымкент, Казахстан; e-mail: azret_utebai@mail.ru. ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0726-8232.

Динара Абаевна Тлевлесова – и.о. профессора кафедры «Технология продуктов питания»; Алматинский технологический университет, Республика Казахстан; e-mail: tlevlessova@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5084-6587.

Айбала Рысбековна Тасполтаева – доцент, к.т.н. кафедры «Пищевая инженерия» Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова, Республика Казахстан; e-mail: aibala.taspoltaeva.69@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0286-4721

Айнур Жандильдаевна Шиналиева* – докторант, Южно-Казахстанский университет имени М. Ауэзова, Высшая школа текстильной и пищевой инженерии, Шымкент, Казахстан; e-mail: ainur_09_09@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-8656-0302.

Received 30.03.2026
Revised 15.05.2026
Accepted 19.05.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-48

IRSTI: 65.33.39

CC BY 4.0
Check for updates

I.N. Kurmanbayeva*, Zh.S. Nabiyeva, S.E. Ibraimova, R. A. Izteliyeva, A.N. Serikbaeva
[1]Almaty Technological University,
050012, Republic of Kazakhstan, Almaty, Tole bi street, 100
*e-mail: Indira_kurmanbaeva@mail.ru

THE EFFECT OF ROSE HIP LEAF EXTRACT ON THE QUALITATIVE AND MICROBIOLOGICAL INDICATORS OF WHOLE GRAIN BREAD

Annotation: *An analysis was conducted of the organoleptic, physicochemical, and microbiological parameters of the finished product to determine the effect of rosehip leaf extract on the quality parameters of whole-grain bread and its shelf life.*

Rosehip leaf extract was used as a plant raw material. The effective amount of rosehip leaf extract has been established. Rosehip leaf extract contains biologically active substances belonging to different

©I.N. Kurmanbayeva, Zh.S. Nabiyeva, S.E. Ibraimova, R. A. Izteliyeva, A.N. Serikbaeva, 2026

classes of compounds: flavonoids, tannins, glycosides, alkaloids, organic acids, which increase the microbiological safety of grain and products. Whole grain bread was stored at room temperature (t= 20 ÷ 25 0C) at a high humidity of 40-50%.

The number of mesophilic aerobic and facultatively anaerobic microorganisms was not detected after 96 hours in the bread sample containing 4% rosehip leaf extract. In the control sample, an increase in the number of mesophilic aerobic and facultatively anaerobic microorganisms was observed after 24 hours of storage. On the second day, mold growth appeared in the control sample, whereas no mold was detected in the bread sample supplemented with 4% rosehip leaf extract. The results of the study demonstrated that rosehip leaf extract improves the microbiological safety and stability of the product by inhibiting the growth of microorganisms and mold. The results obtained indicate that rosehip leaf extract increases the nutritional value of the finished product and extends its shelf life. Thus, bakery products with rosehip leaf extract can be stored for 72 to 96 hours.

Key words: *bread, microbiological indicators, plant raw materials, extract, quality.*

Introduction

In recent years, flour and baked goods have increasingly been affected by various microorganisms. Relatively heterogeneous microbial populations of bacteria belonging to the genus Bacillus, such as Bacillus subtilis and Bacillus mesentericus, pose a serious challenge for manufacturers. The potential solution to this problem lies in the direct correlation between the content of biologically active compounds in certain unique natural food additives/ingredients and their antibacterial potential [1, 2].

One of the core principles of the concept of healthy eating is that these foods must not only meet the human body's needs for nutrients and energy, but also ensure food safety [3]. More attention is being paid to the development of functional foods. Research in this area is ongoing, so the list of functional ingredients is constantly expanding. To enhance the microbiological and toxicological safety, nutritional value, and organoleptic properties of baked goods, rosehip leaf extract was used in their composition [4].

Rosehip extract contains plant phenols, ascorbates, tocopherols and carotenoids, biologically active to antioxidants. In addition, they are one of the main sources of biologically active substances with even minimal bactericidal effect [5-7]. The problem of bakery products is associated with high microbiological contamination of grain and low-quality flour. Increased safety can be achieved by adjusting the chemical composition of products using simple raw materials and introducing various food additives that allow you to obtain products with functional properties [8]. Therefore, in order to improve and preserve its quality, it is very important to use rosehip leaf extract, which prevents the microbiological destruction of whole-grain bread [9].

Materials

The main objects of the study are a whole grain bread product, an extract from rosehip leaves.

Whole grains are the main source of energy and carbohydrates for human nutrition worldwide (Tab. 1).

Table 1 – Recipe and technological mode of whole grain bread

Whole grain bread recipe	
Raw material name:	Added amount of product
Whole wheat flour	70 g
Wheat flour	30 g
Table salt	3 g
Pressed Baker's Yeast Rosehip Extract	4 g
Water	Calculated at 46.5% humidity
Technological mode of whole grain bread	
Name of indicators	Value
Duration of Kneading Dough, min	7-8 min
Duration of opening of the dough, min	170-180 min
Duration of dough arc, min	5-10 min
Weight of the dough blank, G	200 g
Duration of maturation of the dough blank, min	35 min
Temperature in the improvement cabinet, °C	35-40 °C
Relative air humidity, %	70-80 %
Duration of bread baking, °C	60 min

Products with all morphological and anatomical parts of the grain, in particular grain bread, make it possible to replenish the necessary amount of these nutrients, are rich in dietary fibers, which are effective sorbents. It is known that eating whole grain products lowers blood cholesterol levels, increases intestinal motility, and improves metabolic processes.

Rosehip extract contains some of the main active ingredients such as flavonoids, tannins, anthocyanins, phenolic compounds, organic acids and inorganic compounds, as well as dietary fiber. In this regard, rosehip extract can be used to enrich bakery products with dietary fiber and increase shelf life.

Methods

To obtain an extract from vegetable beer, water, ethyl alcohol with various concentrations and other extractants are used, sometimes with the addition of acid, alkali, glycerin, chloroform, etc.

And in this work, rosehip leaves were collected in the fall of 2019 in the mountainous regions of the Almaty region. The leaf and stems are strictly washed in distilled water and dried at room temperature under sterile conditions. The higher leaves and stems were crushed and extracted with 50% ethanol at room temperature (25 ±2 °C) for 20 hours. The supernatants are sucked out in a vacuum at 50 °C using a rotary evaporator and the remaining dry extract is scraped off the bottom.

Based on data from scientific studies, an optimal rosehip leaf extract concentration of 4% was selected to determine its effect on the quality and microbiological indicators of whole-grain bread.

During the study of the effect of rosehip leaf extract on the quality and microbiological indicators of whole-grain bread, classical microbiological analysis methods were used: the count of mesophilic aerobic and facultative-anaerobic microorganisms (MAFAM) was determined in accordance with GOST 10444.15-94 [10].

The enumeration of molds and yeasts was carried out in accordance with GOST 10444.12-88 [11].

Determination of the quality of bread by organoleptic indicators is made by paying attention to its correctness of shape, appearance, color of the crust, color and elasticity of the soft medium, condition of porosity, taste and aroma. The organoleptic indicator of bread is determined according to GOST 5667-2022

Methods for assessing physico-chemical indicators of bread

Determination of Physico-Chemical indicators is carried out at least 3 hours after receiving bakery products made from whole wheat flour weighing more than 200 g from the oven.

Determination of moisture content of sawdust-according to GOST 21094-75.

Determination of the acidity of sawdust-according to GOST 5670-96.

Determination of porosity-according to GOST 5669-96.

The experiments were carried out in triplicate and the results were given as mean values of the ± standard deviation. Statistical analysis was carried out using standard methods of variational statistics.

Results

To determine the effect of rosehip leaf extract on the quality parameters and shelf life of bread made from whole-grain flour, the finished product was analyzed for organoleptic, physicochemical, and microbiological characteristics. The control was a sample baked without the plant extract [12].

At the Almaty Technological University, members of the tasting committee conducted a tasting of a new type of bread with rosehip leaf extract. Bread with rosehip leaf extract is made in the laboratory conditions of the Department "Food Safety and quality" of Almaty Technological University.

The following bread samples were presented for sensory evaluation:

Sample № 1 – control sample

Sample № 2 – bread with 2.0% rosehip leaf extract addition

Sample № 3 – bread with 3.0% rosehip leaf extract addition

Sample № 4 – bread with 4.0% rosehip leaf extract addition

Sample № 5 – bread with 5.0% rosehip leaf extract addition

Sample № 6 – bread with 6.0% rosehip leaf extract addition

The tasting assessment of the studied bread samples was carried out on a 5-point scale of organoleptic quality indicators (Tab. 2)

Table 2 – Tasting results

Name of indicators	Samples					
	bread with 2.0% rosehip leaf extract addition	bread with 3.0% rosehip leaf extract addition	bread with 4.0% rosehip leaf extract addition	bread with 5.0% rosehip leaf extract addition	bread with 6.0% rosehip leaf extract addition	Control sample
	Evaluation of indicators taking into account coefficients X_i K_i					
form of bread	4,2±0,02	4,2±0,02	4,2±0,02	4,0±0,02	4,0±0,02	4,2±0,02
the outer surface of the bread	4,2±0,04	4,2±0,02	4,3±0,02	4,0±0,02	3,9±0,02	4,3±0,02
color	4,8±0,03	4,8±0,03	4,8±0,03	4,0±0,02	3,8±0,02	4,8±0,03
Ripe middle of bread	4,8±0,01	4,8±0,01	4,8±0,01	4,3±0,01	4,0±0,01	4,8±0,01
Porosity	4,0±0,04	4,0±0,04	4,0±0,04	3,5±0,05	3,5±0,05	4,0±0,04
Smell	5,0±0,01	5,0±0,01	5,0±0,01	4,3±0,18	4,0±0,18	5,0±0,01
taste	4,9±0,25	4,9±0,1	4,9±0,1	4,2±0,25	3,5±0,25	4,9±0,1
Evaluation of sum indicators $\sum_{i=1}^{n}$ XiKi						
Common score	4,40	4,78	4,86	4,20	4,10	4,86
Quality category	«жақсы»	«өте жақсы»	«өте жақсы»	«жақсы»	«жақсы»	«өте жақсы»

During the tasting, experts said that bread with 2.0% rosehip leaf extract does not have enough taste and smell. Bread with 4.0% rosehip leaf extract has the appropriate shape, the surface is without large scratches and breaks, the outer color is from light yellow to slightly brown, the middle of the bread is not wet, elastic, well-developed and uniform, the taste is slightly sweet, the smell is characteristic. The appearance of bread with the addition of 6.0% rosehip leaf extract is bubbly, rough, with large scratches, the surface is matte, the color is dark brown, the taste is sour, unpleasant, with a slight foreign smell. As a result of the tasting, experts rated the organoleptic indicators of bread with 4% rosehip leaf extract very good.

The results of the study on the freshness indicators of the samples over time are presented in a diagram (Figure 1). Evaluation was conducted on a 5-point scale based on the following parameters: taste, aroma, crumb softness, elasticity, and fineness [13].

The freshness of whole grain bread is one of the main indicators of its quality. The freshness of bread with rosehip leaf extract was higher compared to the control. This is due to the fact that tannins and organic acids, which are part of the rosehip leaf extract, affect the moisture content of bread and prolong the shelf life of bread [14].

The bread sample baked with rosehip leaf extract after 16 hours had a smooth, light brown surface with no cracks, a light rosehip flavor and aroma, and a uniform, thin-walled crumb structure.

During storage, the bread's organoleptic properties changed: the crust became hard and brittle, then soft; the intensity of its flavor and aroma decreased; the crumb's elasticity and the bread's masticatory properties declined; and the crumb size increased.

During storage, the freshness of bread containing 4% rosehip leaf extract decreased by 49.9% after 96 hours compared to the control sample, and the sample containing rosehip leaf extract decreased by 30.1%.

To improve the technology of bread products with rosehip leaf extract, laboratory trials were conducted. The rosehip leaf extract was introduced into the dough at levels of 2-6%. The control samples were prepared without the plant extract. The quality of the finished bread products was evaluated by determining their organoleptic and physicochemical characteristics (Tab. 3).

The organoleptic and physical characteristics of the finished product containing a 4% rosehip leaf extract were observed to have improved. The appearance remained essentially unchanged compared with the control and the bread containing 2%. A slight change in the appearance of the bread containing 6% extract was observed.

Bread with the addition of 4% rosehip leaf extract had a pleasant aroma due to the softness of the bread.

According to the physicochemical parameters of the finished product, moisture content decreased, while acidity remained unchanged. Volumetric capacity increased. Biologically active substances and acids contained in rosehip extract affect the texture of the flour dough. For this reason, rosehip leaf extract affects the protein structure of the dough, the rate of fermentation and the ability to retain gas, increasing the porosity of the bread compared to the control. Bread with high porosity is soft and light.

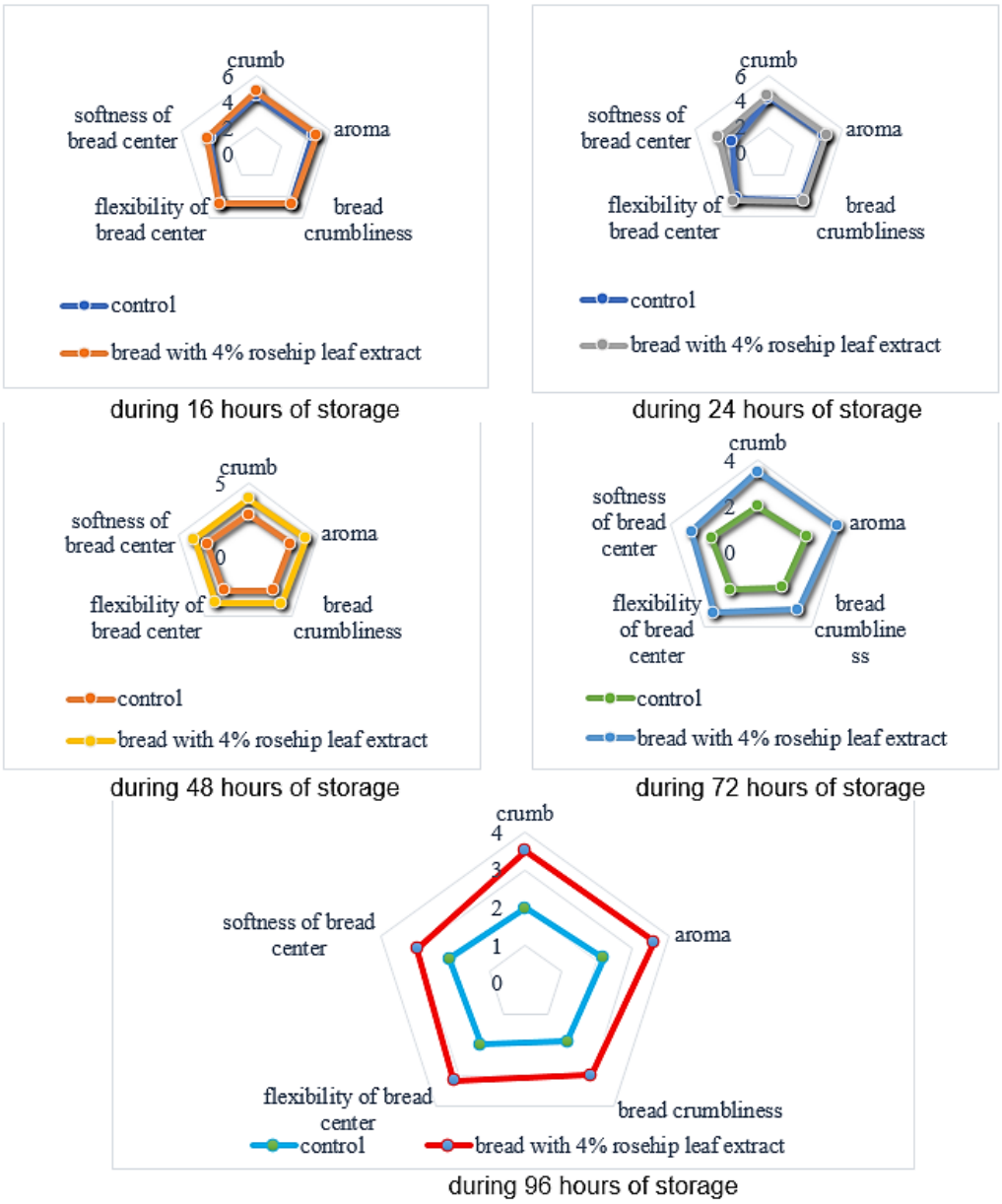


Figure 1 – Freshness assessment diagram for whole-grain bread

Based on the analysis results, a profiler gram of the organoleptic quality assessment of the test samples was created (Figure 2).

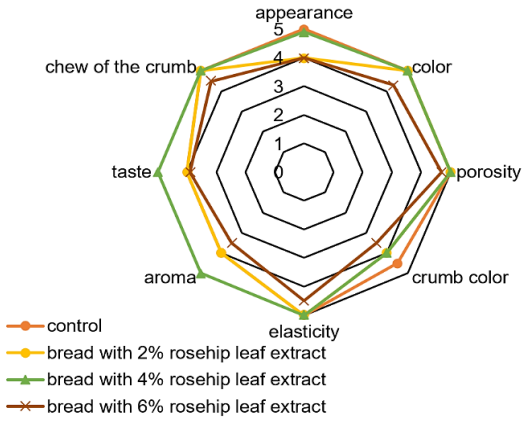


Figure 2 – Profiler gram of the organoleptic quality parameters of bread containing 2%, 4%, and 6% rosehip leaf extract

Table 3 – Effect of rosehip leaf extract on the quality of whole wheat bread

Names of the indicators	control	bread with 2% rosehip leaf extract	bread with 4% rosehip leaf extract	bread with 6% rosehip leaf extract
Appearance				
-Shape:	Proper shape	Shape is irregular, slightly domed, with an outer crust	Proper shape	Correct shape
-Surface:	Smooth, not cracked, no dents	Surface is rough; uncracked, without indentations	Surface is rough; not cracked, no dents	Surface is rough, with slight scratches visible
-Color:	Brown	Brown-black in color	Light brown color	Brown – black color
The condition of the bread dough:				
Consistency	No lumps			
Evaluation of porosity	Uniform, thin-walled			
Taste	No foreign taste characteristic of the product type.	No foreign taste characteristic of the product type.	Pleasant, characteristic of the product type.	Salty, slightly sour.
Smell	No foreign odor characteristic of the product type.	No foreign odor characteristic of the product type.	Fragrant, characteristic of the product type.	A faint aroma characteristic of this type of product is noticeable.
Physicochemical parameters				
Moisture content of bread dough, %	46	48	47,0	47,1
Acidity, °	6,3	6,4	6,4	6,5
Porosity, %	54	55	67	69

Analysis of the nutritional value of the developed samples revealed that the 4% rose hip leaf extract is characterized by a higher content of vitamin C, retinol, and tocopherol compared to the bread control sample. Among the macronutrients, phosphorus, chlorine, and sulfur were notable [15].

The experimental samples were stored for 4 days at room temperature (t = 20-25 °C) and a relative air humidity of 40-50%.

The result of the study was the determination of microbiological indicators of the studied bakery products by the number of mesophilic aerobic and facultative anaerobic microorganisms, mold fungi. As a result, it was found (Tab. 4) that after 48 and 72 hours of storage in a bread sample supplemented with 2% rosehip leaf extract, the number of mesophilic aerobic and facultative anaerobic microorganisms did not differ much from the control samples.

Table 4 – Research results indicating the microbiological indicators of the finished product

Bread sample	Number of mesophilic aerobic and facultative anaerobic microorganisms, CFU/g, not exceeding				Fungus, CFU/g, not exceeding			
	In accordance with the requirements of TR CU 021/2011							
	$5,0\times10^3$				50			
	24 h	48 h	72 h	96 h	24 h	48 h	72 h	96 c
control	Not detected	$4,5*10^3$	$4,8*10^3$	$5*10^3$	Not detected	< 10	(65±6)	(70±6)
bread with 2% rosehip leaf extract	Not detected	$2*10^3$	$2,8*10^3$	$3*10^3$	Not detected	< 10	(55±5)	(60±5)
bread with 4% rosehip leaf extract	Not detected				Not detected			
bread with 6% rosehip leaf extract	Not detected				Not detected			

In addition, mesophilic aerobic and facultative anaerobic microorganisms were not found in bread samples containing 4% and 6% rosehip leaf extract. The number of yeasts in bakery products containing 4% rosehip leaf extract was lower than in the control sample after 72 hours of storage. 4% and 6% rosehip leaf extract-there is no mold in the added bread samples. No fungi were found in the studied samples. The addition of rosehip leaf extract improves the quality of the product and extends its shelf life.

Conclusion

It should be noted that plant raw materials are of considerable interest to the medical and food industries. It exhibits antimicrobial activity because it contains key active components such as flavonoids, tannins, anthocyanins, phenolic compounds, organic acids, and inorganic compounds. Therefore, the use of extracts from plant raw materials and conducting research on bread quality is relevant.

The antimicrobial activity of rosehip leaf extract is explained by the complex action of phenolic compounds, flavonoids and tannins contained in it. These compounds destroy the membrane of the microbial cell, inhibit enzyme systems, increase oxidative stress, and disrupt the synthesis of nucleic acids. In this regard, rosehip Leaf is considered a promising plant raw material as a natural antimicrobial agent.

Due to biologically active compounds with bactericidal properties (phytoncides, polyphenols, organic acids), rosehip leaf extract also has an antiseptic effect, which improved the microbiological purity of bread. It has been established that rosehip leaf extract contains biologically active substances belonging to the class of various compounds that inhibit the destruction of raw materials and finished products under the action of microorganisms: flavonoids, tannins, glycosides, alkaloids, organic acids. The shelf life of whole grain bread with the addition of 4% rosehip leaf extract has been increased from 72 to 96 hours.

Список литературы

1. Impact of sea buckthorn extract on bread indicators / I.N. Kurmanbayeva et al // Вестник Алматинского технологического университета. – 2022. – № 2. – С. 56-61. https://doi.org/10.48184/2304-568X-2022-1-56-61.
2. Wachowska U. Variations in grain lipophilic phytochemicals, proteins and resistance to Fusarium spp. growth during grain storage as affected by biological plant protection with Aureobasidium pullulans (de Bary) / U. Wachowska, M. Tańska, I. Konopka // International Journal of Food Microbiology. – 2016. – Т. 227. – P. 34-40.
3. Hamouda M.M. Potential of seaweed extract on growth, physiological, cytological and biochemical parameters of wheat (Triticum aestivum L.) seedlings / M.M. Hamouda, K.M. Saad-Allah, D. Gad //Journal of Soil Science and Plant Nutrition. – 2022. – Т. 22, № 2. – P. 1818-1831.
4. Systematic evaluation of natural phenolic antioxidants from 133 Indian medicinal plants. / S. Surveswaran et al // Food Chem. – 2007. – № 102. – P. 938-953. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.06.033.
5. Devising technology for dairy products involvinglow-esterified pectin products / Z. Nabiyeva et al // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2021. – № 3(11(111)). – P. 17-27. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.233821.
6. Gartovannaya E. Prospects of Using Whole Grain Flour from Recognized Selection Wheat Varieties of the Far Eastern State Agrarian University in Food Technologies / E. Gartovannaya, A. Ermolaeva // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2021. – P. 357-365. https://doi.org/10.1007/978-3-030-91402-8_41.
7. Capita R. Sampling Methods for Microbiological Analysis of Red Meat and Poultry Carcasses / R. Capita, M. Prieto, C. Alonso-Calleja // Journal of Food Protection. – 2004. – № 67(6). – P. 1303-1308. https://doi.org/10.4315/0362-028x-67.6.1303.
8. Medium Preparation for the Cultivation of Microorganisms under Strictly Anaerobic/Anoxic Conditions / A.O. Wagner et al // Journal of Visualized Experiments. – 2019. – № 150. https://doi.org/10.3791/60155.
9. Da Cruz Cabral L. Application of plant derived compounds to control fungal spoilage and mycotoxin production in foods / L. Da Cruz Cabral, V. Fernández Pinto, A. Patriarca // International Journal of Food Microbiology. – 2013. – № 166(1). – P. 1-14. https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2013.05.026.

10. МЕМСТ 10444.15-94. «Азық-түлік өнімдері. Мезофильді аэробты және факультативті анаэробты микроорганизмдердің санын анықтау әдістері».
11. МЕМСТ 10444.12-88. Азық-түлік өнімдері. Ашытқы мен зеңді анықтау әдісі.
12. Применение сиропа из плодов шиповника при производстве хлеба из муки пшеничной / О.А. Блинова и др. // Успехи современной науки. – 2016. – №. 1. – С. 45-47.
13. Ибраимова С.Е. Арша жемісінің ұнтағын қосу арқылы нанның сапасын дегустациялық бағалау / С.Е. Ибраимова, Р.У. Уажанова, М.Р. Мардар // Вестник Государственного университета имени Шакарима. – 2020. – № 1(89). – Б. 115-118.
14. Курманбаева И.Н. Бөріқарақаттың биохимиялық құрамы және емдік қасиеттері / И.Н. Курманбаева, Ж.С. Набиева // Семей қаласының Шәкәрім атындағы мемлекеттік университетінің хабаршысы. – 2019. – № 4(88).
15. Rose hips, a valuable source of antioxidants to improve gingerbread characteristics / A. Ghendov-Mosanu et al // Molecules. – 2020. – Т. 25, № 23. – P. 5659.

References

1. Impact of sea buckthorn extract on bread indicators / I.N. Kurmanbayeva et al // Vestnik Almatinskogo tekhnologicheskogo universiteta. – 2022. – № 2. – S. 56-61. https://doi.org/10.48184/2304-568X-2022-1-56-61. (In English).
2. Wachowska U. Variations in grain lipophilic phytochemicals, proteins and resistance to Fusarium spp. growth during grain storage as affected by biological plant protection with Aureobasidium pullulans (de Bary) / U. Wachowska, M. Tańska, I. Konopka // International Journal of Food Microbiology. – 2016. – T. 227. – R. 34-40. (In English).
3. Hamouda M.M. Potential of seaweed extract on growth, physiological, cytological and biochemical parameters of wheat (Triticum aestivum L.) seedlings / M.M. Hamouda, K.M. Saad-Allah, D. Gad //Journal of Soil Science and Plant Nutrition. – 2022. – T. 22, № 2. – R. 1818-1831. (In English).
4. Systematic evaluation of natural phenolic antioxidants from 133 Indian medicinal plants. / S. Surveswaran et al // Food Chem. – 2007. – № 102. – R. 938-953. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.06.033. (In English).
5. Devising technology for dairy products involvinglow-esterified pectin products / Z. Nabiyeva et al // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2021. – № 3(11(111)). – R. 17-27. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.233821. (In English).
6. Gartovannaya E. Prospects of Using Whole Grain Flour from Recognized Selection Wheat Varieties of the Far Eastern State Agrarian University in Food Technologies / E. Gartovannaya, A. Ermolaeva // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2021. – R. 357-365. https://doi.org/10.1007/978-3-030-91402-8_41. (In English).
7. Capita R. Sampling Methods for Microbiological Analysis of Red Meat and Poultry Carcasses / R. Capita, M. Prieto, C. Alonso-Calleja // Journal of Food Protection. – 2004. – № 67(6). – R. 1303-1308. https://doi.org/10.4315/0362-028x-67.6.1303. (In English).
8. Medium Preparation for the Cultivation of Microorganisms under Strictly Anaerobic/Anoxic Conditions / A.O. Wagner et al // Journal of Visualized Experiments. – 2019. – № 150. https://doi.org/10.3791/60155. (In English).
9. Da Cruz Cabral L. Application of plant derived compounds to control fungal spoilage and mycotoxin production in foods / L. Da Cruz Cabral, V. Fernández Pinto, A. Patriarca // International Journal of Food Microbiology. – 2013. – № 166(1). – R. 1-14. https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2013.05.026. (In English).
10. MEMST 10444.15-94. «Azyk-tulik onimderi. Mezofildi aehrobty zhane fakultativti anaehrobty mikroorganizmderdin sanyn anyktau adisteri». (In Kazakh).
11. MEMST 10444.12-88. Azyk-tulik onimderi. Ashytky men zendi anyktau adisi. (In Kazakh).
12. Primenenie siropa iz plodov shipovnika pri proizvodstve khleba iz muki pshenichnoi / O.A. Blinova i dr. // Uspekhi sovremennoi nauki. – 2016. – №. 1. – S. 45-47. (In Russian).
13. Ibraimova S.E. Arsha zhemisinit rntauyn kosu arkyly nannyn sapasyn degustatsiyalyk bagalau / S.E. Ibraimova, R.U. Uazhanova, M.R. Mardar // Vestnik Gosudarstvennogo universiteta imeni Shakarima. – 2020. – № 1(89). – B. 115-118. (In Kazakh).

14. Kurmanbaeva I.N. Borikarakattyn biokhimiyalyk kuramy zhane emdik kasietteri / I.N. Kurmanbaeva, Zh.S. Nabieva // Semei kalasynyn Shakarim atyndagy memlekettik universitetinin khabarshysy. – 2019. – № 4(88). (In Kazakh).
15. Rose hips, a valuable source of antioxidants to improve gingerbread characteristics / A. Ghendov-Mosanu et al // Molecules. – 2020. – T. 25, № 23. – R. 5659. (In English).

И.Н. Курманбаева*, Ж.С. Набиева, С.Е. Ибраимова, Р.А. Изтелиева, А.Н. Серикбаева, Ж.Т. Ахмет
Алматы технологиялық университеті,
050012, Қазақстан Республикасы, Алматы қаласы, Төле би көшесі, 100
*e-mail: Indira_kurmanbaeva@mail.ru

ИТМҰРЫН ЖАПЫРАҒЫ СЫҒЫНДЫСЫНЫҢ ТҰТАС ДӘНДІ НАННЫҢ САПАЛЫҚ ЖӘНЕ МИКРОБИОЛОГИЯЛЫҚ КӨРСЕТКІШТЕРІНЕ ӘСЕРІ

Мақалада қазіргі уақытта тамақ өнімдерінің жоғары сапасы мен қауіпсіздігін қамтамасыз ету ұтымды тамақтанудың, денсаулықты сақтаудың, ақыл-ой мен физикалық өнімділіктің және дененің қорғаныс жүйелерін қолдаудың маңызды шарты болып табылады. Қазіргі экологиялық жағдай халықтың тамақтану жағдайын анықтайтын факторлардың бірі болып табылады.

Өсімдік шикізаты ретінде итмұрын жапырағының сығындысы қолданылды. Итмұрын жапырағы сығындысының тиімді мөлшері анықталды. Итмұрын жапырағы сығындысы құрамында әртүрлі қосылыстар класына жататын биологиялық белсенді заттар флавоноидтар, таниндер, гликозидтер, алкалоидтар, оганикалық қышқылдар астықтың және өнімнің микробиологиялық көрсеткіштерін төмендетуге көмектеседі. Тұтас дәнді нан өнімі бөлме температурасында (t= 20 ÷ 25 ^{0}C) жоғары ылғалдылықта 40-50 % сақталды.

4% итмұрын жапырағы сығындысы қосылған нан үлгісінде 96 сағаттан кейін МАжФАМС табылған жоқ. Бақылау үлгісінде 24 сағаттық сақтаудан кейін МАжФАМС көбеюі байқалады. Бақылау үлгісіне 2-тәулікте зең пайда бола бастады, ал 4 % итмұрын жапырағы сығындысы қосылған нан үлгісінде зең табылған жоқ. Зерттеу нәтижелері итмұрын жапырағы сығындысы өнімнің микробиологиялық қауіпсіздігін төмендетеді. Алынған нәтижелер итмұрын жапырағы сығындысы дайын өнімнің тағамдық құндылығын арттырады және дайын өнімнің сақтау мерзімін ұзартатындығын көрсетеді. Осылайша, итмұрын жапырағы сығындысы қосылған нан өнімдерін 72 сағаттан 96 сағатқа дейін сақтауға болады.

Түйін сөздер: *тұтас дәнді нан, микробиологиялық көрсеткіштер, өсімдік шикізаты, сығынды.*

И.Н. Курманбаева*, Ж.С. Набиева, С.Е. Ибраимова, Р.А. Изтелиева, А.Н. Серикбаева, Ж.Т. Ахмет
Алматинский технологический университет,
050012, Республика Казахстан, город Алматы, улица Толе би, 100
*e-mail: Indira_kurmanbaeva@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ЭКСТРАКТА ЛИСТЬЕВ ШИПОВНИКА НА КАЧЕСТВЕННЫЕ И МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЦЕЛЬНОЗЕРНОВОГО ХЛЕБА

В настоящее время обеспечение высокого качества и безопасности пищевых продуктов является важным условием рационального питания, поддержания здоровья, умственной и физической работоспособности и поддержки защитных систем организма. Современная экологическая ситуация является одним из факторов, определяющих состояние питания населения.

В качестве растительного сырья использовали экстракт листьев шиповника. Установлено эффективное количество экстракта листьев шиповника. Экстракт листьев шиповника содержит биологически активные вещества, относящиеся к классу различных соединений флавоноиды, дубильные вещества, гликозиды, алкалоиды, оганские кислоты, которые помогают снизить микробиологические показатели зерна и продукта. Цельнозерновой хлеб хранился при комнатной температуре (t= 20 ÷ 25 0C) при высокой влажности 40-50%.

КМАФаНМ не был обнаружен через 96 часов в образце хлеба с 4% экстрактом листьев шиповника. В контрольной выборке наблюдается увеличение КМАФаНМ после 24 часов хранения. На контрольном образце на 2-й день начала формироваться плесень, а на образце хлеба с добавлением 4% экстракта листьев шиповника плесени не обнаружено. Результаты исследования показали, что экстракт листьев шиповника снижает микробиологическую безопасность продукта. Полученные результаты свидетельствуют о том, что экстракт листьев шиповника повышает пищевую

ценность готового продукта и продлевает срок хранения готового продукта. Таким образом, хлебобулочные изделия с экстрактом листьев шиповника могут храниться от 72 до 96 часов.

Ключевые слова: *хлеб цельнозерновой, микробиологические показатели, растительное сырье, экстракт.*

Авторлар туралы мәліметтер

Индира Нурлановна Курманбаева* – PhD, «Тағам өнімдерінің сапасы және қауіпсіздігі» кафедрасының ассисент-профессоры, Алматы технологиялық университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: Indira_kurmanbaeva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6764-5469.

Жанар Серикболовна Набиева – PhD, «Тағам биотехнологисы» кафедрасының қауымдастырылған профессоры; Алматы технологиялық университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: atu_nabiyeva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7258-746X.

Сания Ерболатовна Ибраимова – PhD, «Тағам өнімдерінің сапасы және қауіпсіздігі» кафедрасының ассисент-профессоры, Алматы технологиялық университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: canek21@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9439-7461.

Раушан Акмуратовна Изтелиева – PhD, «Тағам өнімдерінің сапасы және қауіпсіздігі» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Алматы технологиялық университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: iztelieva80@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9129-2798.

Аяна Нургалиевна Серикбаева – PhD, «Тағам өнімдерінің сапасы және қауіпсіздігі» кафедрасының ассисент-профессоры, Алматы технологиялық университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: ayana-sn@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8252-1034.

Сведения об авторах

Индира Нурлановна Курманбаева* – PhD, ассистент-профессор кафедры «Безопасность и качество пищевых продуктов», Алматинский технологический университет, Республика Казахстан; e-mail: Indira_kurmanbaeva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6764-5469.

Жанар Серикболовна Набиева – PhD, ассоциированный профессор кафедры «Пищевая биотехнология» Алматинский технологический университет, Республика Казахстан; e-mail: atu_nabiyeva@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7258-746X.

Сания Ерболатовна Ибраимова – PhD, «Безопасность и качество пищевых продуктов», Алматинский технологический университет, Республика Казахстан; e-mail: canek21@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9439-7461.

Раушан Акмуратовна Изтелиева – PhD, ассоциированный профессор «Безопасность и качество пищевых продуктов», Алматинский технологический университет, Республика Казахстан; e-mail: iztelieva80@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9129-2798.

Аяна Нургалиевна Серикбаева – PhD, ассистент-профессор кафедры «Безопасность и качество пищевых продуктов», Алматинский технологический университет, Республика Казахстан; e-mail: ayana-sn@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8252-1034.

Information about the authors

Indira Kurmanbayeva* – Assistant Professor, Department of Food Safety and Quality, Almaty Technological University, Republic of Kazakhstan; e-mail: Indira_kurmanbaeva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6764-5469.

Zhanar Nabieva – PhD, associate professor, Department of Food Biotechnology, Almaty Technological University, Republic of Kazakhstan; e-mail: atu_nabiyeva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7258-746X.

Saniya Ibraimova – Assistant Professor, Department of Food Safety and Quality, Almaty Technological University, Republic of Kazakhstan; e-mail: canek21@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9439-7461.

Raushan Izteliyeva –PhD, associate professor, Department of Food Safety and Quality, Almaty Technological University, Republic of Kazakhstan; e-mail: iztelieva80@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9129-2798.

Ayana Serikbaeva – Assistant Professor, Department of Food Safety and Quality, Almaty Technological University, Republic of Kazakhstan; e-mail: ayana-sn@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8252-1034.

Received 30.03.2026
Revised 14.05.2026
Accepted 20.05.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-49

IRSTI: 34.23.17

U. Sarsenbayeva[1,2,3]*, A. Almasbekova[1,2,3], K. Sharipov[2,3], S. Taipakova[1], M. Saparbayev[1]
[1]al-Farabi Kazakh National University,
050040, Republic of Kazakhstan, Almaty, 71 Al-Farabi Avenue
[2]M. Aitkozhin Institute of Molecular Biology and Biochemistry,
050012, Republic of Kazakhstan, Almaty, Dosmukhamedova 86
[3]S. Asfendiyarov Kazakh National Medical University,
050000, Republic of Kazakhstan, Almaty, Tole bi 94
*e-mail: ulansarsenbayeva@gmail.com

THE ROLE OF DNA GLYCOSYLASES IN MAINTAINING GENOME STABILITY

Abstract: *Genome stability is fundamental to cell viability, the evolutionary stability of organisms, and the preservation of their functional integrity. Endogenous damage, particularly the oxidative modification of nitrogenous bases resulting from cellular metabolism, is one of the main factors disrupting DNA structure. To prevent the accumulation of mutations, cells utilize a base excision repair (BER) system in which DNA glycosylases play a pivotal role. These enzymes recognize and remove damaged or mismatched bases, thereby initiating a cascade of repair reactions.*

Adenine DNA glycosylases belonging to the MutY/MUTYH family are unique in that they do not directly remove damaged bases, but rather correct replication errors arising from oxidative damage to guanine. In bacteria, this function is performed by the MutY enzyme, whereas in eukaryotes it is performed by its homologue, MUTYH. These enzymes prevent G:C → T:A transition mutations from becoming fixed, thereby significantly reducing the level of spontaneous mutagenesis.

This review discusses the role of DNA glycosylases in maintaining genomic stability, focusing on the molecular mechanisms of adenine DNA glycosylase function, their place in the BER system, evolutionary conservation, and their significance in biotechnology, molecular genetics, and applied research.

Key words: *DNA glycosylase, 8-oxoguanine, DNA repair, base excision repair.*

Introduction

Maintaining genomic stability is essential for preserving cell viability and the integrity of genetic information. In aerobic organisms, DNA is constantly exposed to damaging endogenous factors, including reactive oxygen species, byproducts of cellular metabolism, and spontaneous chemical reactions [1, 2]. Consequently, continuous nitrogenous base modifications occur in the genome, despite the absence of gross DNA structural damage. These modifications have a pronounced mutagenic potential [3]. The base excision repair (BER) system effectively eliminates such damage, with DNA glycosylases playing a central role [4].

DNA glycosylases are a class of enzymes that recognize damaged or abnormal bases in the DNA double helix. They hydrolytically cleave the N-glycosidic bond between the nitrogenous base and deoxyribose, forming an apurine or apyrimidine site – a universal intermediate product of BER [5]. The direction and effectiveness of the entire repair process are determined at the stage of DNA glycosylase action, since each enzyme has a strictly defined substrate specificity [6].

Modern research reveals that DNA glycosylases are not only «repair» enzymes, but also act as sensors that can detect even slight distortions in the DNA structure. This is achieved through a process known as base flipping, where the enzyme temporarily removes a potentially damaged base from the double helix to the active site for chemical identification [5, 7]. This strategy enables even damage that does not result in significant changes to DNA conformation to be recognized. Thus, DNA glycosylases act as the main «decision makers» who determine which modifications of endogenous bases will be transferred, restored, or transformed into mutations [8].

Among the many DNA glycosylases, which are enzymes that protect the genome from the effects of oxidative stress, some occupy a special place. Oxidative damage to guanine, resulting in the formation of 8-oxo-7,8-dihydroguanine (8-oxoG), is considered one of the most common and

©U. Sarsenbayeva, A. Almasbekova, K. Sharipov, S. Taipakova, M. Saparbayev, 2026

biologically significant types of endogenous DNA damage [9]. The ability of 8-oxoG to form a stable pair is associated with its mutagenic potential, not only with cytosine but also with adenine. This leads to the fixation of G:C → T:A transitions during replication [10].

Cells have a specialised system for preventing oxidative-induced mutagenesis, which is key to preventing such mutations. This system involves MutY/MUTYH family adenine DNA glycosylases [10]. Most glycosylases directly remove damaged bases, but these enzymes are different. They recognise and remove unmodified adenine that has been mistakenly incorporated opposite 8-oxoG. Therefore, adenine DNA glycosylases perform the unique function of post-replicative DNA quality control, eliminating potential mutations before they are incorporated into the genome [11, 12].

Prokaryotes have a MutY enzyme that performs this function as part of the GO system. In eukaryotes, its functional homolog is MUTYH [10]. Despite differences in genome and chromatin organization, these enzymes show a high degree of structural and functional conservation, underscoring their importance in maintaining genomic stability. The human MUTYH gene is expressed both in the nucleus and in the mitochondria, where it protects the genomes of these compartments from errors that occur during oxidative replication [13]. In addition, experimental studies show that MUTYH can function as a molecular switch linking oxidative DNA damage with programmed cell death, thereby contributing to tumor suppression under conditions of severe oxidative stress. [14].

Adenine DNA glycosylases function closely with other components of the BER system, including AP endonuclease APE1, DNA polymerase β, and DNA ligase. The coordinated action of these enzymes ensures the highly accurate replacement of mispaired adenine and the restoration of the original nucleotide sequence. The accumulation of mutations, increased sensitivity of cells to oxidative stress, and increased genomic instability are all caused by disruption of this interaction [3, 13, 15, 16].

DNA glycosylases, and adenine DNA glycosylases in particular, are key elements in the molecular mechanisms that protect the genome. Their function extends beyond merely «repairing» DNA damage, encompassing the active prevention of mutations, coordination with replication and transcription, and adaptation of cells to oxidative stress. Understanding these processes is of fundamental importance for both fundamental molecular biology and biotechnological and biomedical applications. However, repair errors can also lead to mutations and contribute to genomic instability [1, 2, 13].

Despite the growing body of literature on base excision repair (BER) and DNA glycosylases, several key questions remain unresolved and warrant detailed consideration in this review. Firstly, the regulatory hierarchy that governs glycosylase activity in vivo, particularly under conditions of concurrent oxidative and alkylating stress, is not well understood. Secondly, the extent to which glycosylase functional redundancy is truly compensatory rather than merely partial is a subject of active debate. Single knockouts often exhibit mild phenotypes, whereas double knockouts lead to synergistic genomic instability, suggesting that redundancy masks rather than eliminates vulnerability [1, 17]. Thirdly, the role of post-translational modifications (phosphorylation, acetylation, and SUMOylation) in regulating the substrate specificity of glycosylases and their interactions with the replicative apparatus is not well characterised.

The purpose of this review is to summarize current data on DNA glycosylases and critically evaluate the prevailing patterns of fiber organization in vivo. We argue that the traditional linear view of BER, largely based on biochemical analyses of exposed DNA, does not take into account the context of chromatin, the dynamics associated with replication and transcription, or the competition between enzymes in common lesions [18]. We also emphasize that the apparent excess of glycosylases may mask the fragility of the basic repair network, especially under combined oxidative and alkylating stress. Finally, we will discuss why simple knockout phenotypes do not always accurately reflect the true biological role of these enzymes [19].

DNA glycosylases are key initiators of base excision repair

Base excision repair (BER) is a fundamental mechanism for maintaining genomic stability, ensuring the elimination of minor chemical modifications of the nitrogenous bases of DNA. Unlike bulk damage, changes such as alkylation, oxidation, and deamination of bases, as a rule, do not cause significant distortion of the double helix, but they have a high mutagenic potential. Their accumulation poses a serious threat to the integrity of the genome, especially in actively dividing and metabolically active cells [12, 13].

It is estimated that several thousand base damages occur daily in mammalian cells due to the action of reactive oxygen species, endogenous methylating agents, and spontaneous chemical reactions such as hydrolytic deamination [13]. These lesions need to be repaired quickly and specifically before replication, as their fixation leads to the accumulation of point mutations and the formation of genomic instability [15].

The BER process is initiated by DNA glycosylases, enzymes that recognize and cleave the N-glycosidic bond between a damaged base and deoxyribose. These enzymes can do this because they recognize abnormal bases in intact DNA double helices. This stage is crucial to the entire repair process, as it is at the level of DNA glycosylases that the substrate is selected and further repair is directed [16].

Despite the extreme variety of chemical damage to bases, about eleven DNA glycosylases have been identified in the mammalian genome. Collectively, these enzymes recognise most endogenous damage. These enzymes are divided into several structural superfamilies, which reflect both their evolutionary origin and their catalytic features. These include uracil DNA glycosylases (UNG, SMUG1 and TDG); glycosylases of the helix-hairpin-helix (HhH) family (OGG1, MUTYH, NTH1, and MBD4); 3-methylpurine DNA glycosylase (MPG); and NEIL family enzymes, which are structurally related to bacterial endonuclease VIII (Table 1) [5].

Table 1 – Human DNA glycosylases involved in excisional base repair (BER)

DNA glycosylase	The structural family	The main substrates	Functional role in BER	Key references
UNG	Uracil-DNA glycosylase	U:G, U:A	Uracil removal prevents C→T transitions	[4, 5]
SMUG1	Uracil-DNA glycosylase	Uracil, 5-hydroxyuracil	Repair of uracil and oxidized pyrimidines	[4, 15]
TDG	Uracil-DNA glycosylase	T:G, 5-fC, 5-caC	BER and active DNA demethylation, epigenetic regulation	[4, 7]
OGG1	HhH-glycosylase	8-oxoG:C	Removal of 8-oxoguanine: prevention of G→T transversions	[9, 13]
MUTYH	HhH-glycosylase	A:8-oxoG	Adenine removal from erroneous pairs, anti-mutation protection	[10, 11]
NTH1 (NTHL1)	HhH-glycosylase	Thymine-glycol, 5-hydroxycytosine	Elimination of replication-blocking damages	[5, 13]
MBD4	HhH-glycosylase	T:G в CpG (after deamination of 5-mC)	Repair of deaminated methylated cytosines	[4, 17]
MPG (AAG)	Helix-2Turn-Helix Glycosylases	3-meA, 7-meG, εA, εC	Repair of alkylated and exocyclic bases	[5, 18]
NEIL1	NEIL (Endo VIII-like)	Oxidized purines and pyrimidines	Repair in replication forks	[12, 14]
NEIL2	NEIL (Endo VIII-like)	Oxidized pyrimidines	Transcriptionally-related BER	[14, 17]
NEIL3	NEIL (Endo VIII-like)	8-oxoG and other oxidized bases in ssDNA	Repair in proliferating cells	[7, 12]

The BER system's functionality is characterized by the partial redundancy of its DNA glycosylases. Several enzymes can recognize similar types of damage, which increases the reliability of repair under conditions of expression fluctuations or local changes in the chromatin structure. Mice with one of these enzymes removed have been used as an experimental model. This has shown that the loss of a single enzyme rarely leads to death. However, it is often accompanied by an increase in the number of mutations and an increase in sensitivity to genotoxic stress [20, 21, 22]. These observations indicate that the classical picture of BER is oversimplified. BER is not a uniformly robust and fully redundant network. This oversimplification does not fully explain tissue-specific phenotypes observed in vivo.

The effects of DNA damage on living things depend on the chemical nature of the damage and the structure and catalytic properties of the corresponding DNA glycosylases. Replication can be effectively blocked by some damages, such as thymine glycol, and these are quickly eliminated

by specialized enzymes (NTH1). Other modifications do not affect the movement of replicative and transcription complexes, but they become toxic during the formation of stable DNA-glycosylase complexes. These complexes create a physical obstacle for DNA polymerases [17, 18].

The BER system is further complicated by the ability of a number of DNA glycosylases to function in various structural contexts of DNA, including single-stranded regions, loop structures, replication forks and DNA-RNA hybrids. This is especially important for maintaining the integrity of actively transcribed regions of the genome and preventing conflicts between the processes of repair, transcription, and replication. Taken together, these data confirm a model. This model shows that the BER result is determined not only by substrate specificity. It is also determined by the chromatin context. And the phase of the cell cycle. And the dynamic redistribution of individual glycosylases between different DNA structures.

TDG is unique among DNA glycosylases because its function extends beyond the scope of damage repair. TDG is involved in the active demethylation of DNA by removing oxidised 5-methylcytosine derivatives, and it plays a critical role in the epigenetic regulation of development. Genetic studies have shown that TDG deficiency leads to fetal mortality, highlighting the unique importance of this enzyme for cellular homeostasis [4, 7]. This example illustrates in a broader sense that many DNA glycosylases act not only as repair factors, but also as regulators of gene expression and chromatin status, reinforcing the idea of BER as an integrated regulatory network rather than as a purely economic pathway [23].

Collectively, DNA glycosylases represent the first and most specific level of genome protection, determining the effectiveness of BER and the prevention of mutations. When there is oxidative stress, glycosylases are particularly important. These are enzymes that repair oxidised bases. Two of the most important are OGG1 and MUTYH. Together, they form the basis of the 8-oxoguanine-induced mutation prevention system [9-11, 17].

One critical point often overlooked in reviews of linear base excision repair (BER) is the paradox of functional redundancy: if multiple glycosylases can process overlapping substrate spectra, why does the loss of a single enzyme, such as OGG1 or NEIL1, lead to significant phenotypic effects in certain tissues? One possible explanation is that redundancy depends on the context: while enzymes that share substrates function in various in vitro conditions, they operate in different in vivo chromatin media, cell cycle phases or transcriptional contexts [17, 18]. For instance, NEIL1 is primarily active at replication forks, whereas NEIL2 is primarily associated with transcription, indicating a division of labour that is not apparent in vitro. An alternative, more provocative interpretation, proposed by Dianov and Hubscher, is that the apparent reliability of BER conceals a «fragile system» that is susceptible to failure when several stress factors coincide [21]. Taken together, these views challenge the idea of a fully functionally redundant repair network and are crucial for understanding why heterozygous glycosylase mutations can affect the risk of cancer and other disease phenotypes [24].

Mechanisms of DNA repair containing 8-oxoguanine

Oxidative DNA damage is considered to be one of the main causes of endogenous mutagenesis in eukaryotic cells. In conditions of normal metabolism, the body constantly produces reactive oxygen species (ROS), but exposure to external factors can significantly increase their levels. Among the numerous products of nitrogenous base oxidation, 7,8-dihydro-8-oxoguanine (8-oxoG) occupies a special place, which is considered the most widespread and biologically significant modification of guanine. The increased sensitivity of guanine to oxidation is explained by its lower redox potential compared to other bases, which makes it a primary target for ROS [25, 26].

An important feature of 8-oxoG is that it does not significantly deform the DNA double helix and usually does not directly block replication or transcription (Figure 1). This distinguishes it from other oxidized bases, which effectively block polymerases. However, the biological hazard of 8-oxoG is determined by its high premutagenic potential. Due to its structural properties, 8-oxoG can take at least two conformations: in one it combines with cytosine, and in the other with adenine. Consequently, during replication, polymerases may mistakenly include adenine, the opposite of 8-oxoG. This, in turn, leads to the fixation of G:C → T:A transversions, one of the most common types of mutations caused by oxidative damage to the genome. [8, 9, 26].

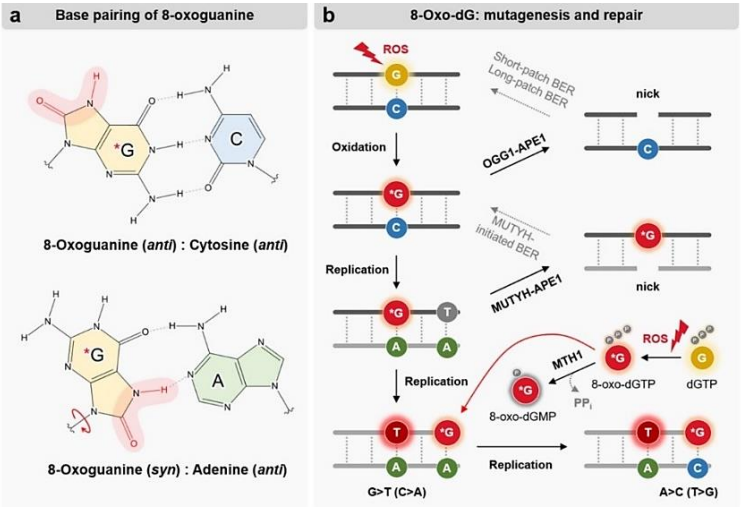


Figure 1 – Schematic representation of 8-oxoguanine mating preferences in anti- and syn conformations (left) and an overview of the GO DNA repair system (right) [19]

The GO-repair system is a specialized and extremely conservative repair mechanism that has been developed to stop the accumulation of such mutations in cells. This system offers multilevel control over the occurrence and biological effects of 8-oxoG and is found in organisms across all domains of life. Three enzymes, OGG1, MUTYH, and MTH1 (NUDT1), each of which functions at a different level of DNA and nucleotide metabolism, are essential parts of the GO system in human cells [27, 28].

A DNA glycosylase called OGG1 (8-oxoguanine DNA glycosylase 1) can identify and eliminate 8-oxoG when it is paired with cytosine. The classical excisional base repair (BER) pathway is started when OGG1 binds to the damaged base pair. After the N-glycoside bond is hydrolyzed, an apurin/apyrimidine (AP) site is created. This site is then further cleaved by APE1 endonuclease, and DNA polymerase β and DNA ligase help restore DNA integrity.

Nevertheless, when 8-oxoG has already paired with adenine, OGG1's efficacy is greatly diminished. Adenine DNA glycosylase MUTYH is crucial in stopping mutation fixation in such circumstances. In contrast to OGG1, MUTYH specifically identifies mismatch 8-oxoG.:A and catalyzes the excision of adenine instead of removing the oxidized guanine itself. This seemingly paradoxical process prevents a transient mating error from becoming a stable mutation and sets up OGG1's reaction, which eliminates 8-oxoG that has already been paired with cytosine.

MUTYH's molecular mechanism of action involves hydrolyzing the N-glycosidic bond, recognizing a damaged base pair, and extruding adenine from the DNA double helix via the base-flipping mechanism. According to structural research, MUTYH is a member of the HhH glycosylase family and has a [4Fe-4S] cluster, which is crucial for preserving the protein's conformational stability and accurately identifying the substrate. Furthermore, the catalytic activity of the enzyme and the efficiency of repair have been demonstrated to be impacted by the binding of metal ions [25, 26, 27].

The third part of the GO system is MTH1 (NUDT1). This enzyme works not on DNA itself, but on the pool of free nucleotides. MTH1 breaks down 8-oxo-dGTP into its monophosphate form. This prevents the oxidized nucleotide from being added to DNA during replication. As a result, this enzyme reduces the chance of 8-oxoG formation before any damage occurs in the genome [29].

The functional importance of the coordinated operation of the GO-repair system components is substantiated by genetic research findings. In mice lacking OGG1 or MUTYH, an increase in the frequency of G:C → T:A transversions is noted; however, the most pronounced mutational phenotype, along with heightened spontaneous tumorigenesis, is observed in double OGG1/MUTYH knockout models [30]. These findings underscore the functional complementarity of the enzymes and the essential role of the GO system in preserving genomic stability.

Therefore, repairing DNA that contains 8-oxoguanine is a multi-step, tightly coordinated process that involves controlling the nucleotide pool, removing damaged bases, and fixing replication mistakes. MUTYH adenine-DNA glycosylase plays a crucial role in preserving genomic stability and

shielding cells from oxidative stress-related carcinogenesis by blocking the fixing of redox-induced mutations [28, 29, 31].

Although the above mechanistic picture of 8-oxoG recovery is well-founded, it reveals several inconsistencies that require recognition upon careful analysis. Firstly, the division of labour between OGG1 and MUTYH – OGG1 removes 8-oxoG in combination with cytosine and MUTYH removes adenine in combination with 8-oxoG – is conceptually elegant. Whereas some authors propose that MUTYH and OGG1 act in a strictly ordered succession, single-molecule and biochemical studies suggest that their competition for 8-oxoG-containing substrates can lead to transient trapping of lesions and even increased mutagenesis if one enzyme is over- or under-expressed. However, the temporal and spatial coordination of these actions in vivo is much less clear than is suggested by simplified biochemical models. Recent single-molecule studies show that competition between OGG1 and MUTYH for access to damage during the S phase can increase the likelihood of erroneous processing rather than ensuring strictly ordered recovery. [29].

Secondly, although the role of MTH1 (NUDT1) in the GO system is intuitively understandable from a mechanical point of view, it remains controversial. Pharmacological inhibition of MTH1 was initially proposed as an anti-tumour strategy, but contradictory results in different tumour models cast doubt on its universal applicability [28].

These contradictions demonstrate that, despite decades of biochemical research, the GO system is not as well understood as is often imagined. They also emphasise the importance of studying the reduction of 8-oxoG under physiologically significant oxidative conditions and in chromatin-native contexts.

The role of MUTYH in maintaining genomic stability and biotechnological aspects

MUTYH plays a crucial role in maintaining genomic stability and biotechnological aspects. After removing 8-oxoguanine with OGG1, adenine DNA glycosylase MUTYH corrects mismatches A:8-oxoG that occur after DNA replication [9-11]. MUTYH removes adenine from the faulty pair, creating an AP site that is then processed by classical BER enzymes such as APE1, DNA polymerase β, and DNA ligase. This process hinders the fixation of G:C → T:A transversions, ensuring genomic stability [19, 20].

Structural investigations have indicated that the presence of a [4Fe-4S] cluster and a HhH domain, which stabilize the enzyme and direct adenine extrusion from the double helix, ensures MUTYH identification accuracy [32]. The cooperation of MUTYH and OGG1 allows for several error correction opportunities: if 8-oxoG is originally paired with cytosine, OGG1 removes the damaged base, and if adenine is wrongly introduced, MUTYH prevents the mutation from fixing [10, 25, 33]. However, the elegant functional separation often depicted in schematic models does not fully reflect the complexity of their interactions in vivo. In the cellular context, OGG1 and MUTYH may compete for access to 8-oxoG-containing lesions, particularly in replicating chromatin, where DNA accessibility is subject to dynamic regulation. Their relative activity is likely influenced by the cell cycle phase, local chromatin structure and the assembly of replication-associated protein complexes. These factors collectively determine lesion accessibility and the outcomes of their processing.

The functional significance of MUTYH has been confirmed by genetic modelling. Mice with a double knockout of OGG1 and MUTYH exhibit a pronounced mutator phenotype and spontaneous tumour formation. In contrast, a MUTYH-only knockout results in a more moderate increase in the frequency of G → T transversions. Furthermore, MUTYH interacts with replication-associated proteins, such as PCNA and the 9-1-1 complex. These proteins facilitate the recruitment of base excision repair (BER) factors to replication forks and coordinate repair with DNA synthesis [10, 31]. Together, these findings imply that the 8-oxoG repair network exhibits buffering capabilities, yet is not entirely redundant. Consequently, impairments in the activity of individual enzymes or the efficiency of their recruitment can alter the equilibrium between precise repair and mutagenic processing.

From a translational point of view, particular interest is also held for MUTYH because germline mutations in this gene underlie MUTYH-associated polyposis and colorectal cancer risk is increased, whereas the impact of monoallelic variants remains controversial. Furthermore, given that MUTYH and other BER components process intermediates generated by base editors, it is probable that their activity exerts a significant influence on the efficiency and fidelity of CRISPR-based genome

editing. This suggests that the controlled modulation of MUTYH could become a tool for optimising editing outcomes in the future.

DNA glycosylase disorders: clinical and biotechnological implications

DNA glycosylases are the primary initiators of base excision repair (BER). They detect and eliminate a wide variety of DNA base lesions. Malfunction of these enzymes can lead to the accumulation of lesions, increased genomic instability, and the development of numerous diseases. What is particularly important to note is that defects in individual glycosylases are linked to specific biological phenotypes. This indicates that, even within BER, there is functional overlap which is incomplete and highly dependent on the cellular context.

UNG and SMUG1 remove uracil as part of the spontaneous cytosine deamination pathway. UNG deficiency causes more C→T transitions in the genome, indicating an inability to fix uracil-containing mispairs. It also leads to decreased immune system functions, such as somatic hypermutation of B cells. Such abnormalities are linked to an elevated risk of cancer and immunodeficiency phenotypes. SMUG1 partially compensates for UNG loss, but a twofold defect causes uracil buildup and increased mutational load, highlighting the necessity of the BER system's redundancy [5].

TDG (thymine DNA glycosylase) removes T:G proteins and oxidized derivatives of methylated cytosine (5-fC and 5-caC), making it vital for both damage repair and epigenetic remodeling. Mutations or TDG deficiency in animal models cause embryonic death, developmental abnormalities, and oxidative stress reactions, demonstrating its vital role in gene development and regulation [34, 35].

MUTYH eliminates adenine that was accidentally implanted opposite 8-oxoG after replication to ensure quality control. MUTYH genetic variations enhance the risk of colorectal cancer and cause MUTYH-associated adenomatous polyposis (MAP), indicating a loss of BER antimutation defense. These conditions are especially important in the diagnosis of genetic predispositions and in biological cancer research.

Oxidized pyrimidines and other oxidized bases are eliminated by NTHL1 and NEIL1-3, which are members of the HhH/Nei glycosylases family. Hereditary NTHL1 syndrome, which is characterized by a higher risk of colorectal and other cancers, is linked to NTHL1 mutations. Impaired NTHL1 expression can result in genomic instability and replication stress, which has been linked to carcinogenesis in many human and animal models and studies. The study also demonstrates that an imbalance in NTHL1 levels (both deficit and overexpression) might lead to genomic instability and cellular transformation, highlighting the importance of precise regulatory control over BER components [18-21].

Both single-stranded DNA structures and actively transcribed areas are shielded by NEIL glycosylases. For instance, NEIL1 is involved in the removal of oxidized bases in replication forks, and its lack may lead to the build-up of untreated damage, which is linked to greater susceptibility to oxidative stress and neurodegenerative phenotypes. Research indicates that inflammatory and infectious processes (e.g., in tissue infected with H. pylori) lower NEIL2 expression, which leads to the buildup of DNA damage and carcinogenesis. These examples show that disease symptoms are due not only to damage that has not been repaired, but also to the way in which a glycosylase usually copies or writes itself [36].

BER and particular DNA glycosylase disorders can present with a range of clinical symptoms:

Oncology. Defects in MUTYH, NTHL1, MBD4, and OGG1 raise the risk of both sporadic and inherited tumor disorders, such as leukemia, colorectal cancer, and other neoplasms. For instance, germline variations of MBD4 are linked to a higher risk of polyposis and acute myeloid leukemia; however, systematic studies of unselected patient cohorts indicate that the contribution of heterozygous variants is heterogeneous and not yet fully defined.

Immune regulation. A lack of UNG increases the likelihood of immunodeficiency, lymphomas, and somatic hypermutation diseases.

Epigenetic diseases. TDG abnormalities can impact the control of gene expression throughout development and differentiation by impairing active demethylation.

Neurodegenerative and aging-related syndromes. The pathophysiology of the central nervous system, including accelerated aging and the advancement of neurodegeneration, is intimately linked to the buildup of oxidized bases and compromised BER. According to review data,

BER deficiency is linked to a variety of illnesses, including inflammatory diseases and age-related ailments (Table 2) [37].

Table 2 – DNA glycosylase disorder: clinical and biotechnological consequences

DNA Glycosylase	Major damage/ substrates	Clinical consequences	Biotechnological consequences
UNG	Uracil (C→U)	Immunodeficiency, increased risk of lymphomas, disorders of somatic hypermutation of B cells	Increased mutation load in cell lines
SMUG1	Uracil, 5-hydroxyuracil	Partial compensation of UNG deficiency, with double deficiency, and accumulation of mutations	Potential genome instability in cultures
TDG	T:G, 5-fC, 5-caC	Fetal mortality (mouse models), epigenetic regulation disorder, and oncogenic potential	Violation of the accuracy of epigenetic models, increased risk of errors in DNA editing
OGG1	8-oxoG:C	Increased spontaneous mutations, carcinogenesis in the intestine and lungs	Decreased fidelity of replication and editing, accumulation of 8-oxoG in cell lines
MUTYH	A:8-oxoG	Familial adenomatous polyposis (MAP), increased risk of colorectal cancer	Increased frequency of G:C → T:A tranversions in cultures, decreased CRISPR accuracy
NTH1 (NTHL1)	Thymine-glycol, 5-hydroxycytosine	Hereditary NTHL1 syndrome, increased risk of colorectal and other cancers	Genomic instability in cellular models, replication stress
MBD4	T:G в CpG (after deamination of 5-mC)	Increased risk of leukemia and tumors, CpG mutations	Violation of the accuracy of epigenetic models and induced mutations
MPG (AAG)	3-meA, 7-meG, εA, εC	Hypersensitivity to alkylating agents, carcinogenesis by chemical exposure	Reducing the effectiveness of controlled alkylating mutagenesis
NEIL1	Oxidized purines and pyrimidines	Metabolic syndrome, hypersensitivity to oxidative stress, tumor transformation	Accumulation of oxidized bases in cell lines, reduced replication stability
NEIL2	Oxidized pyrimidines	Damage to actively transcribed genes, increased risk of mutations and cytotoxicity	Violation of fidelity of transcriptionally-related BER, risk of editing errors
NEIL3	8-oxoG and other oxidized bases in ssDNA	Repair in proliferating cells; deficiency may increase the risk of tumor transformation	Impaired stabilization of replication forks, accumulation of damage in rapidly dividing cells

In biotechnological practice, genome stability and replication fidelity are extremely important

1. Editing genomes. BER violations increase the likelihood of errors and spontaneous mutations during base editing or CRISPR/Cas editing, which lowers the precision of genetic manipulations and makes it more difficult to understand the outcomes.

2. Cell line stability. In iPSC models, embryonic cells, and industrial lines, deficiencies in BER components can result in unanticipated phenotypes and increase the diversity of cell cultures.

3. Controlled mutagenesis. In some areas of biotechnology, the temporary change in BER activity can be used to increase the mutation rate during directed enzyme evolution or the optimization of biocatalysts. At the same time, the likelihood of off-target mutations and unintended genomic instability can also be increased by disruption of BER function. This necessitates the careful control of experimental conditions and adherence to biosafety measures.

Understanding the molecular mechanisms of BER and the activities of each DNA glycosylase enables us to develop techniques for increasing genetic stability and lowering the risk of mutations in biotechnological and therapeutic applications. This is critical for both the development of therapeutic approaches to addressing BER faults and the dependability of genomic technologies.

The clinical and technological data in general back up the main idea of this review. DNA glycosylases form a context-dependent and only partially redundant network, whose perturbation can either promote disease or, in specific settings, be harnessed to modulate genome stability in a controlled way.

Conclusion

The data presented in this review suggest that DNA glycosylases are part of a complex genome defense mechanism that involves much more than simply removing damaged bases. At the same time, a number of aspects of their *in vivo* biology remain poorly understood and require further investigation. The accumulated data indicate that base excision repair (BER) is not a simple, linear, and fully redundant cascade; it is much more accurate to view it as a context-dependent network. The behavior of this network is determined by the organization of chromatin, the dynamics of replication and transcription, as well as the competition between individual glycosylases for access to damaged areas [16].

The main limitation of current models is that they are largely based on biochemical analyses using «naked» DNA, whereas in eukaryotic cells, DNA is tightly packed into nucleosomes. Cryo-EM and structural studies show that enzymes such as OGG1 and NEIL1 interact with lesions in nucleosomal DNA via conformational mechanisms distinct from those observed in solution, suggesting that in vitro kinetics do not fully reflect the dynamics of repair within the cell [18-21]. The recently described «triage» behavior of hNEIL1, which can direct damaged bases either to catalytic removal or to a transitional unproductive state, depending on the dynamics of local interaction, illustrates how damage recognition can be regulated by chromatin.

The clinical significance of heterozygous variants of glycosylase genes also remains unclear. Although biallelic mutations in MUTYH and NTHL1 are unambiguously associated with hereditary cancer syndromes, the risk associated with monoallelic variants is a matter of debate. Epidemiological studies have yielded contradictory results, and functional studies have not revealed a stable haploinsufficient phenotype. Solving this problem will require large-scale population genomic studies combined with careful functional stratification of individual variants.

In addition to canonical repair, glycosylases can perform additional regulatory functions. Thus, TDG is a key component of active DNA demethylation, and OGG1 is considered as a potential transcriptional coactivator due to interaction with NF-kB, although this issue remains a subject of discussion. Similarly, it is hypothesized that 8-oxoG can function as a context-dependent epigenetic label, but this concept requires rigorous testing in in vivo models [25-28].

In the context of genomic engineering, BER affects both the efficiency and accuracy of genome editing. Base editors (ABE/CBE) generate repair intermediates, which are subsequently processed by UNG, TDG, and other BER-associated proteins, thereby influencing the results of editing and the range of possible modifications. Thus, modulation of individual glycosylases can provide a strategy for improving the accuracy and controllability of base editing, although the consequences of such approaches in vivo remain poorly understood [18-21].

References

1. Jackson S.P. DNA-damage response signaling and cancer / S.P. Jackson, J. Bartek // Nature Reviews Molecular Cell Biology. – 2019. – Vol. 20, № 4. – P. 197-214. https://doi.org/10.1038/s41580-019-0135-3.

2. Hoeijmakers J.H.J. DNA damage, aging, and cancer / J.H.J. Hoeijmakers // New England Journal of Medicine. – 2016. – Vol. 377, № 7. – P. 640-649. https://doi.org/10.1056/NEJMra1604219.

3. Markkanen E. Not breathing is not an option: How to deal with oxidative DNA damage / E. Markkanen // DNA Repair. – 2017. – Vol. 59. – P. 82-105. https://doi.org/10.1016/j.dnarep.2017.09.002.

4. Sousa M.M.L. DNA glycosylases in genome maintenance and biotechnology / M.M.L. Sousa, H.E. Krokan, G. Slupphaug // Biotechnology Advances. – 2020. – Vol. 42. – 107579. https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2020.107579.

5. Krokan H.E. Base excision repair / H.E. Krokan, M. Bjørås // Cold Spring Harbor Perspectives in Biology. – 2013 (concept updated in recent reviews 2017–2021).

6. Krokan H.E. BER coordination and protein interactions / H.E. Krokan, A.B. Robertson // DNA Repair. – 2017. – Vol. 56. – P. 1-12. https://doi.org/10.1016/j.dnarep.2017.04.002.

7. DNA repair and transcriptional regulation / S. Amente et al // Trends in Genetics. – 2019. – Vol. 35, № 9. – P. 669-682. https://doi.org/10.1016/j.tig.2019.06.002.
8. Lirussi L. DNA Glycosylases Define the Outcome of Endogenous Base Modifications / L. Lirussi, H.L. Nilsen // International Journal of Molecular Sciences. – 2023. – Vol. 24, № 12. – Art. 10307. – https://doi.org/10.3390/ijms241210307.
9. Boiteux S. Repair of 8-oxoG lesions in DNA / S. Boiteux, F. Coste, B. Castaing // Free Radical Biology and Medicine. – 2017. – Vol. 107. – P. 1-12. https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2017.01.008.
10. Banda D.M. Repair of 8-oxoG:A mismatches by MUTYH / D.M. Banda, C.R.R. Rocha, C.F.M. Menck // Free Radical Biology and Medicine. – 2017. – Vol. 107. – P. 26-35. https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2017.01.008.
11. Oka S. MUTYH, cancer, and genome instability / S. Oka, J. Leon, D. Tsuchimoto // Mutation Research. – 2021. – Vol. 808. – 108423. https://doi.org/10.1016/j.mrrev.2021.108423.
12. van Loon B. An 8-oxoG perspective on mitochondrial genome instability / B. van Loon, U. Hübscher // DNA Repair. – 2019. – Vol. 75. – P. 52-60. https://doi.org/10.1016/j.dnarep.2019.02.006.
13. Mullins E.A. Toxicity and repair of oxidative DNA damage / E.A. Mullins, R. Shi, B.F. Eichman // Cellular and Molecular Life Sciences. – 2017. – Vol. 74, № 18. – P. 3367-3387. https://doi.org/10.1007/s00018-017-2478-8.
14. Oka S. DNA glycosylase encoded by MUTYH functions as a molecular switch for programmed cell death under oxidative stress to suppress tumorigenesis / S. Oka, Y. Nakabeppu // Cancer Science. – 2011. – Vol. 102, № 4. – P. 677-682. https://doi.org/10.1111/j.1349-7006.2011.01869.x.
15. Van Loon B. An 8-oxoG perspective on mitochondrial genome instability / B. van Loon, U. Hübscher // DNA Repair. – 2019. – Vol. 75. – P. 52-60. https://doi.org/10.1016/j.dnarep.2019.02.006.
16. Recent advances in the structural mechanisms of DNA glycosylases / S.C. Brooks et al // Biochimica et Biophysica Acta – Proteins and Proteomics. – 2013. – Vol. 1834. – P. 247-271.
17. Human POLβ gene mutation induces a mutator phenotype in mammalian cells / K.A. Donigan et al // Proceedings of the National Academy of Sciences USA. – 2016. – Vol. 113. – P. E2951-E2959. https://doi.org/10.1073/pnas.1520466113.
18. Focus on DNA Glycosylases – A Set of Tightly Regulated Enzymes with a High Potential as Anticancer Drug Targets / F. Hans et al // International Journal of Molecular Sciences. – 2020. – Vol. 21, № 23. – Art. 9226. https://doi.org/10.3390/ijms21239226.
19. Emerging Roles of DNA Glycosylases and the Base Excision Repair Pathway / E.A. Mullins et al // Trends in Biochemical Sciences. – 2019. – Vol. 44, № 9. – P. 765-781. https://doi.org/10.1016/j.tibs.2019.04.006.
20. Sobol R.W. Mammalian DNA base excision repair: Mechanisms and regulation / R.W. Sobol, S.H. Wilson // Progress in Molecular Biology and Translational Science. – 2020. – Vol. 168. – P. 1-35. https://doi.org/10.1016/bs.pmbts.2019.12.003.
21. Dianov G.L. Mammalian base excision repair: The forgotten archangel / G.L. Dianov, U. Hübscher // Nucleic Acids Research. – 2013. – Vol. 41, № 6. – P. 3483-3490. https://doi.org/10.1093/nar/gkt076 stress.
22. Sykora P. Base excision repair in the mammalian brain: Implication for age-related neurodegeneration / P. Sykora, D.M. Wilson, V.A. Bohr // Mechanisms of Ageing and Development. – 2018. – Vol. 174. – P. 19-27. https://doi.org/10.1016/j.mad.2017.11.001.
23. DNA glycosylases provide antiviral defence in prokaryotes / A.A. Hossain et al // Nature. – 2024. – Vol. 629. – P. 410-416.
24. Single molecule analysis indicates stimulation of MUTYH by UV-DDB through enzyme turnover / S. Jang et al // Nucleic Acids Research. – 2021. – Vol. 49, № 14. – P. 8177-8188. https://doi.org/10.1093/nar/gkab591.
25. 8-Oxoguanine: from oxidative damage to epigenetic and epitranscriptional modification / J.Y. Hahm et al // Experimental & Molecular Medicine. – 2022. – Vol. 54. – P. 1626-1642. https://doi.org/10.1038/s12276-022-00801-x.
26. Dynamics of 8-Oxoguanine in DNA: Decisive Effects of Base Pairing and Nucleotide Context / S.S. Ovcherenko et al // Journal of the American Chemical Society. – 2023. – Vol. 145, № 10. – P. 5201-5213. https://doi.org/10.1021/jacs.3c00421.
27. 8-Oxoguanine DNA Glycosylase1 conceals oxidized guanine in nucleoprotein-associated RNA of respiratory syncytial virus / L. Pan et al // PLoS Pathogens. – 2024. – Vol. 20, № 10. – Article e1012616. https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1012616.

28. De Rosa M. Roles for the 8-Oxoguanine DNA Repair System in Protecting Telomeres From Oxidative Stress / M. De Rosa, S.A. Johnson, P.L. Opresko // Frontiers in Cell and Developmental Biology. – 2021. – Vol. 9. – Article 758402. https://doi.org/10.3389/fcell.2021.758402.
29. Cellular Repair of Synthetic Analogs of Oxidative DNA Damage Reveals a Key Structure–Activity Relationship of the Cancer-Associated MUTYH DNA Repair Glycosylase / S.G. Conlon et al // ACS Central Science. – 2024. – Vol. 10, № 2. – P. 291-301. https://doi.org/10.1021/acscentsci.3c00784.
30. OGG1 and MUTYH repair activities promote telomeric 8-oxoguanine induced senescence in human fibroblasts / M. De Rosa et al // Nature Communications. – 2025. – Vol. 16. – Article 893. https://doi.org/10.1038/s41467-025-00345-2.
31. Structure of the mammalian adenine DNA glycosylase MUTYH: insights into the base excision repair pathway and cancer / T. Nakamura et al // Nucleic Acids Research. – 2021. – Vol. 49, № 12. – P. 7154-7163. https://doi.org/10.1093/nar/gkab492.
32. Energetic preference of 8-oxoG eversion pathways in a DNA glycosylase / C. Bergonzo et al // Journal of the American Chemical Society. – 2011. – Vol. 133, № 37. – P. 14504-14506. https://doi.org/10.1021/ja205142d.
33. Cellular repair of synthetic analogs of oxidative DNA damage reveals a key structure–activity relationship of the cancer-associated MUTYH DNA repair glycosylase / S.G. Conlon et al // ACS Central Science. – 2024. – Vol. 10, № 2. – P. 291-301. https://doi.org/10.1021/acscentsci.3c00784.
34. Embryonic lethal phenotype reveals a function of TDG in maintaining epigenetic stability / S. Cortellino et al // Nature. – 2011. – Vol. 470, № 7334. – P. 419-423. https://doi.org/10.1038/nature09672.
35. Dalton S.R. DNA demethylation by TDG / S.R. Dalton, A. Bellacosa // Epigenomics. – 2012. – Vol. 4, № 4. – P. 459-467. https://doi.org/10.2217/epi.12.36.
36. Helicobacter pylori infection downregulates the DNA glycosylase NEIL2, resulting in increased genome damage and inflammation in gastric epithelial cells / I.M. Sayed et al // Journal of Biological Chemistry. – 2020. – Vol. 295, № 32. – P. 11082-11098. https://doi.org/10.1074/jbc.RA120.013933.
37. Novel roles of DNA glycosylases in neurodegenerative diseases and aging / V. Tiwari et al // Neural Regeneration Research. – 2025. – Vol. 21, № 5. – P. 1991-1992. https://doi.org/10.4103/NRR.NRR-D-24-01588.
38. DNA repair glycosylase hNEIL1 triages damaged bases via competing interaction modes / Liu Menghao et al // Nature Communications. – 2021. – Vol. 12. – Article 4108. https://doi.org/10.1038/s41467-021-24431-y.

У. Сарсенбаева[1,2,3*], А. Алмасбекова[1,2,3], К. Шарипов[2,3], С. Тайпақова[1], М. Сапарбаев[1]
[1]әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті,
050040, Алматы, Қазақстан Республикасы; әл-Фараби даңғылы 71
[2]М. Айтхожин атындағы Молекулалық биология және биохимия институты,
050012, Алматы, Қазақстан Республикасы, Досмухамедов к-сі 86
[3]С.Ж. Асфендияров атындағы Қазақ ұлттық медицина университеті,
050000, Алматы, Қазақстан Республикасы, Төлеби к-сі 94
*e-mail: ulansarsenbayeva@gmail.com

ГЕНОМ ТҰРАҚТЫЛЫҒЫН САҚТАУДАҒЫ ДНҚ-ГЛИКОЗИЛАЗАЛАРДЫҢ РӨЛІ

Геном тұрақтылығы жасушалардың тіршілікке қабілеттілігінің, организмдердің эволюциялық тұрақтылығының және олардың функционалдық тұтастығын сақтаудың негізі болып табылады. Эндогенді зақымданулар, әсіресе жасушалық метаболизм нәтижесінде пайда болатын азотты негіздердің тотығу арқылы модификациялануы, ДНҚ құрылымын бұзатын негізгі факторлардың бірі болып саналады. Мутациялардың жиналуын болдырмау үшін жасушалар негіздерді кесіп алып тастау арқылы жүретін репарация жүйесін (BER) қолданады, мұнда ДНҚ-гликозилазалар шешуші рөл атқарады. Бұл ферменттер зақымданған немесе қате жұптасқан негіздерді танып, оларды алып тастау арқылы репарация реакцияларының каскадын бастайды.

MutY/MUTYH тұқымдасына жататын адениндік ДНҚ-гликозилазалар зақымданған негіздерді тікелей алып тастамай, гуаниннің тотығу зақымдануы нәтижесінде туындайтын репликациялық қателерді түзетуімен ерекшеленеді. Бактерияларда бұл қызметті MutY ферменті атқарса, эукариоттарда оның гомологы – MUTYH орындайды. Бұл ферменттер G:C → T:A типті транзициялық мутациялардың бекітілуінің алдын алып, спонтанды мутагенез деңгейін едәуір төмендетеді.

Осы шолуда геном тұрақтылығын сақтаудағы ДНҚ-гликозилазалардың рөлі қарастырылып, адениндік ДНҚ-гликозилазаның молекулалық механизмдері, оның BER жүйесіндегі орны, эволюциялық консервативтілігі, сондай-ақ биотехнология, молекулалық генетика және қолданбалы зерттеулердегі маңызы талданады.

Түйін сөздер: *ДНҚ-гликозилаза, 8-оксогуанин, ДНҚ репарациясы, негіздерді кесіп алып тастау арқылы репарация (BER).*

У. Сарсенбаева[1,2,3]*, А. Алмасбекова[1,2,3], К. Шарипов[2,3], С. Тайпақова[1], М. Сапарбаев[1]
[1]Казахский Национальный университет имени аль-Фараби,
050040, Алматы, Республика Казахстан; проспект аль-Фараби 71
[2]Институт молекулярной биологии и биохимии им. М. Айтхожина,
050012, Алматы, Республика Казахстан; ул. Досмухамедова 86
[3]Казахский Национальный Медицинский университет имени С.Д. Асфендиярова,
050000, Алматы, Республика Казахстан, ул. Толеби 94
*e-mail: ulansarsenbayeva@gmail.com

РОЛЬ ДНК-ГЛИКОЗИЛАЗ В ПОДДЕРЖАНИИ СТАБИЛЬНОСТИ ГЕНОМА

Стабильность генома имеет основополагающее значение для жизнеспособности клеток, эволюционной стабильности организмов и сохранения их функциональной целостности. Эндогенные повреждения, в частности окислительная модификация азотистых оснований, возникающая в результате клеточного метаболизма, являются одним из основных факторов, нарушающих структуру ДНК. Чтобы предотвратить накопление мутаций, клетки используют систему репарации эксцизией оснований (BER), в которой ДНК-гликозилазы играют ключевую роль. Эти ферменты распознают и удаляют поврежденные или несоответствующие основания, тем самым инициируя каскад реакций репарации.

Аденин ДНК-гликозилазы, принадлежащие к семейству MutY/MUTYH, уникальны тем, что они не удаляют поврежденные основания напрямую, а скорее исправляют ошибки репликации, возникающие в результате окислительного повреждения гуанина. У бактерий эту функцию выполняет фермент MutY, тогда как у эукариот – его гомолог MUTYH. Эти ферменты предотвращают закрепление мутаций перехода G:C → T:A, тем самым значительно снижая уровень спонтанного мутагенеза.

В данном обзоре обсуждается роль ДНК-гликозилаз в поддержании геномной стабильности, особое внимание уделяется молекулярным механизмам функционирования аденин-ДНК-гликозилаз, их месту в системе BER, эволюционной консервативности, а также их значению в биотехнологии, молекулярной генетике и прикладных исследованиях.

Ключевые слова: *ДНК-гликозилаза, 8-оксогуанин, репарация ДНК, репарация с эксцизией оснований.*

Information about the authors

Ulan Sarsenbayeva* – PhD student, Faculty of Biology and Biotechnology, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: ulansarsenbayeva@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-9292-0153.

Adina Almasbekova – PhD student, Faculty of Biology and Biotechnology, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: almasbekovaadina94@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-9957-1747.

Kamalidin Sharipov – Doctor of Biological Sciences, Professor and Director of the Institute of Molecular Biology and Biochemistry named after M. Aitkhozhin, Almaty, Kazakhstan; e-mail: sharipov.k@kaznmu.kz, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5946-5521.

Sabira Taipakova – PhD, Associate Professor of the Department of Molecular Biology and Genetics, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, the Republic of Kazakhstan; e-mail: sabira.taipakova@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9499-1682.

Murat Saparbayev – candidate biological sciences, professor of the Department of Molecular Biology and Genetics, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, the Republic of Kazakhstan; e-mail: murat.saparbaev@gustaveroussy.fr. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4630-1074.

Авторлар туралы мәліметтер

Улан Базарбаевна Сарсенбаева* – әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің «Биология және биотехнология» факультетінің докторанты, Алматы қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: ulansarsenbayeva@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-9292-0153.

Адина Әшірханқызы Алмасбекова – әл-Фараби атындағы қазақ ұлттық университетінің «Биология және биотехнология» факультетінің докторанты, Алматы қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: almasbekovaadina94@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-9957-1747.

Камалидин Орынбаевич Шарипов – Биология ғылымдарының докторы, профессор, М. Айтхожин атындағы «Молекулалық биология және биохимия» институтының директоры, Алматы қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: sharipov.k@kaznmu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5946-5521.

Сабира Мықтыбекқызы Тайпақова – PhD, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің «Молекулалық биология және генетика» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Қазақстан Республикасы; e-mail: sabira.taipakova@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9499-1682.

Мурат Калиевич Сапарбаев – биология ғылымдарының кандидаты, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің «Молекулалық биология және генетика» кафедрасының профессоры, Алматы қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: murat.saparbaev@gustaveroussy.fr. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4630-1074.

Сведения об авторах

Улан Базарбаевна Сарсенбаева* – докторант факультета «Биологии и биотехнологии», Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан; e-mail: ulansarsenbayeva@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-9292-0153.

Адина Әшірханқызы Алмасбекова – докторант факультета «Биологии и биотехнологии», Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, Алматы, Казахстан; e-mail: almasbekovaadina94@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-9957-1747.

Камалидин Орынбаевич Шарипов – Доктор биологических наук, профессор, директор института «Молекулярной биологии и биохимии им. М. Айтхожина», Алматы, Казахстан; e-mail: sharipov.k@kaznmu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5946-5521.

Сабира Мықтыбекқызы Тайпақова – PhD, ассоциированный профессор кафедры «Молекулярной биологии и генетики», Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Республика Казахстан; e-mail: sabira.taipakova@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9499-1682.

Мурат Калиевич Сапарбаев – кандидат биологических наук, профессор кафедры молекулярной биологии и генетики, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Республика Казахстан; e-mail: murat.saparbaev@gustaveroussy.fr. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4630-1074.

Received 30.03.2026
Revised 12.05.2026
Accepted 21.05.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-50

IRSTI: 65.59.39

CC BY 4.0
Check for updates

M.K. Kurmanahynova, Sh.A. Abzhanova*, G.N. Zhaksylykova, A.U. Baibekova, N.K. Akhmetova
Almaty Technological University,
050012, Republic of Kazakhstan, Almaty, Tole bi street, 100
*e-mail: sholpan-ab@mail.ru

EVALUATION OF MICROBIOLOGICAL SAFETY, QUALITY, AND ORGANOLEPTIC PROPERTIES OF BROILER CHICKEN MEAT WITH INCLUSION OF GRAPE SEED MEAL IN THE DIET

Annotation: *The study aimed to evaluate the microbiological safety, quality, and organoleptic properties of broiler chicken meat when grape seed meal was included in the diet. The research was conducted on two groups of broilers: a control group fed a standard balanced diet, and an experimental group whose diet was supplemented with grape seed meal as a source of natural polyphenolic compounds and antioxidants. Microbiological analysis of whole carcasses and livers, collected on the day of slaughter after cooling, showed lower microbial counts in the experimental group. The total count of mesophilic aerobic and facultative*

©M.K. Kurmanahynova, Sh.A. Abzhanova, G.N. Zhaksylykova, A.U. Baibekova, N.K. Akhmetova, 2026

anaerobic microorganisms in whole carcasses was less than 4×10¹ CFU/g compared to 1.1×10² CFU/g in the control, while in livers, TAMC was 1.1×10³ CFU/g versus 2.1×10⁴ CFU/g, well below established limits. Listeria monocytogenes and pathogenic microorganisms, including Salmonella spp., were not detected in either group. Analysis of toxic elements (lead, arsenic, cadmium, and mercury) revealed values below detection limits, confirming the toxicological safety of the meat. Shelf-life evaluation demonstrated that meat from the experimental group remained acceptable 2 days longer than control meat, with delayed changes in odor and spoilage. Organoleptic assessment of boiled breast and thigh fillets showed slightly higher scores in the experimental group, particularly for aroma, juiciness, tenderness, and overall quality (breast fillets: 9.1 vs. 8.9, thigh fillets: 9.4 vs. 9.2). The results indicate that the inclusion of grape seed meal in broiler diets improves microbiological safety, extends shelf life, and enhances sensory quality without negatively affecting organoleptic characteristics. These findings support the use of grape seed meal as a functional feed additive in poultry production, including products intended for children.

Key words: *broiler chickens, grape seed meal, microbiological safety, organoleptic properties, shelf life, functional poultry products.*

Introduction

Under the conditions of modern poultry production, obtaining products that meet the requirements of biological safety, high nutritional value, and consistent quality is becoming increasingly important. Broiler meat occupies a leading position in the structure of animal protein consumption due to its high digestibility, balanced amino acid composition, and affordability [1, 2]. However, intensive fattening technologies are associated with risks of deteriorating microbiological parameters, accelerated oxidative processes, and reduced shelf life of products, which necessitates the search for new effective feed solutions [3, 4].

One promising approach is the use of natural antioxidants of plant origin, which can positively influence the physiological status of poultry and the quality of the resulting meat [5, 6]. In this regard, particular attention is given to a processed by-product of the wine industry—grape seed flour derived from *Vitis vinifera* seeds. It is rich in polyphenolic compounds (proanthocyanidins, catechins, flavonoids), dietary fiber, and biologically active substances with pronounced antioxidant and antimicrobial properties [7, 8].

It is well known that lipid peroxidation processes are among the key factors contributing to the deterioration of meat quality during storage. The accumulation of lipid oxidation products negatively affects sensory characteristics, reduces nutritional value, and may promote the growth of opportunistic microflora [9, 10]. The inclusion of natural antioxidants in poultry diets can stabilize cell membranes, enhance the antioxidant status of the organism, and consequently improve the microbiological and sensory characteristics of the final product [11,12].

An important aspect of assessing the safety of meat products is the determination of contamination levels by mesophilic aerobic and facultative anaerobic microorganisms (MAFAM), as well as the absence of pathogenic microorganisms, including *Salmonella spp.* and *Listeria monocytogenes* [13, 14]. Additionally, monitoring the content of toxic elements capable of accumulating in animal tissues and posing potential risks to consumers is of significant importance [15].

Despite the availability of individual studies addressing the use of plant-based feed additives in poultry production, the issue of a comprehensive evaluation of the effects of grape seed flour on microbiological safety, shelf life, and sensory properties of broiler meat remains insufficiently studied and requires systematic analysis [16, 17].

The aim of the present study is to assess the microbiological safety, quality, and sensory properties of broiler meat when grape seed flour is included in the fattening diet, as well as to determine the effect of this feed additive on product stability during storage.

Materials and methods

The object of the study was the meat of broiler chickens reared under two feeding regimens: a control and an experimental diet. The control group received a standard complete compound feed balanced according to current nutritional requirements, whereas the experimental group was additionally supplemented with grape seed meal as a source of natural polyphenolic compounds and antioxidants.

The experiment was conducted on two groups of broiler chickens formed by the principle of analogs. Each group consisted of 30 birds. The control group received a standard balanced diet, while the experimental group received the same diet supplemented with grape seed meal at a

dosage of 3% of the total feed weight. The feeding trial lasted for 42 days, corresponding to the standard broiler growing period. Birds were kept under identical housing and management conditions throughout the experiment, with free access to feed and water.

Microbiological analyses were carried out in accordance with the following regulatory standards: determination of the total count of mesophilic aerobic and facultative anaerobic microorganisms (MAFAM) was performed according to GOST 10444.15-94; detection of Salmonella spp. was conducted according to GOST 31659-2012 (ISO 6579:2002); detection of Listeria monocytogenes was performed according to GOST 32031-2012 (ISO 11290-1:1996). The obtained microbiological indicators were evaluated in compliance with the requirements established for poultry meat safety.

The content of toxic elements (lead, arsenic, cadmium, and mercury) in muscle tissue was determined by atomic absorption spectrometry in accordance with the following standards: GOST 30178 (lead, cadmium), GOST R 51776 (arsenic), and GOST R 53183 (mercury). The obtained values were compared with the maximum permissible levels established for poultry meat.

To evaluate product shelf life, a comparative analysis of the storage stability of chilled meat obtained under different feeding regimens was performed. Samples were stored under refrigerated conditions with daily monitoring of organoleptic parameters for 12 days post-slaughter. Changes in odor, the appearance of spoilage signs, and visual surface alterations were recorded. The assessment of storage stability and shelf life of chilled poultry meat was performed taking into account the requirements of TR CU 021/2011 “On Food Safety”, TR CU 034/2013 “On Safety of Meat and Meat Products”, and GOST 31962-2013 regulating the quality and safety indicators of chilled poultry meat during refrigerated storage.

Organoleptic evaluation was carried out using a 10-point scoring scale.

All experiments were carried out in triplicate. The obtained data were processed using standard methods of variation statistics and are presented as mean values ± standard deviation (M ± SD). Statistical significance of differences between the control and experimental groups was evaluated using Student’s t-test. Differences were considered statistically significant at $p < 0.05$.

Results

To assess the safety of the products, the microbiological indicators of meat and by-products were evaluated. Whole carcasses and livers (considered the most “contaminated” product) were sampled on the day of slaughter after cooling. The results of the study are presented in Table 1.

Table 1 – Microbiological indicators of poultry meat in the control and experimental groups

Naming of indicators	units of measurement	Test result		the standard
		Experimental group	The control group	
Whole carcass broiler chicken grade 1 chilled according to GOST R 52702-2006				
Total viable count of mesophilic aerobic and facultative anaerobic microorganisms	CFU/g	less than 4·101	1,1·102	no more than 1·105
Listeria monocytogenes	g	not detected	not detected	not allowed
Pathogenic microorganisms, including Salmonella spp.	g	not detected	not detected	not allowed
By-product broiler chicken, chilled liver according to GOST R 53157-2008				
Total viable count of mesophilic aerobic and facultative anaerobic microorganisms	CFU/g	1,1·103	2,1·104	no more than 1·106
Listeria monocytogenes	g	not detected	not detected	not allowed
Pathogenic microorganisms, including Salmonella spp.	g	not detected	not detected	not allowed

Data from Table 1 show that the poultry meat from the experimental group had better microbiological indicators, which may be associated with the presence of antioxidants in the grape seed meal. The obtained results are consistent with previous studies reporting that grape-derived polyphenols exhibit antimicrobial and antioxidant activity in poultry production systems. Romero et al. [18] demonstrated that dietary grape by-products improve oxidative stability of broiler meat, while Aditya et al. [19] reported improved meat quality and physiological status in broilers receiving grape pomace supplementation. Similar observations were described by Brenes et al. [20], who noted that

polyphenol-rich grape by-products contribute to stabilization of lipid oxidation processes and reduction of microbial spoilage in animal products.

The improvement of microbiological indicators observed in the present study may be associated with the inhibitory effect of polyphenolic compounds on the growth of spoilage microflora. In addition, antioxidant compounds contained in grape seed meal are capable of reducing oxidative degradation of lipids and proteins, thereby slowing quality deterioration during refrigerated storage.

The assessment of toxic elements revealed their complete absence (Table 2).

Table 2 – Content of toxic elements in poultry meat

Naming of the indicator	units of measurement.	Test result		the standard	Regulatory documentation for the test method
		Experimental group	The control group		
Lead	mg/kg	<0,001	<0,001	no more than 0,5	GOST 30178
Arsenic	mg/kg	<0,003	<0,003	no more than 0,1	GOST R 51776
Cadmium	mg/kg	<0,001	<0,001	no more than 0,05	GOST 30178
Mercury	mg/kg	<0,002	<0,002	no more than 0,03	GOST R 53183

To assess product shelf life, a comparison of the storage periods of poultry meat obtained under different feeding regimes was carried out. The results are presented in Table 3.

Table 3 – Comparison of poultry meat shelf life depending on the feeding regime

Products	Shelf life of products during											
	24 hours after slaughter	2 days	3 days	4 days	5 days	6 days	7 days	8 days	9 days	10 days	11 days	12 days
Broiler chicken carcass (experimental group)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	change of smell	spoilage of meat	
Broiler chicken fillet (experimental group)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	change of smell	spoilage of meat
Broiler chicken carcass (control group)	+	+	+	+	+	+	+	change of smell	spoilage of meat			
Broiler chicken fillet (control group)	+	+	+	+	+	+	+	+	change of smell	spoilage of meat		

The data in Table 3 clearly illustrate the superior shelf life of poultry meat from the experimental feeding group-lasting 2 days longer than meat from the control group. Thus, broiler meat obtained from the experimental feeding group can be used for the production of functional food products, including those intended for children. The positive effect of grape seed meal on meat quality can be explained by its high content of biologically active polyphenols, including catechins, flavonoids, and proanthocyanidins. These compounds possess strong antioxidant properties and are capable of neutralizing free radicals, stabilizing cell membranes, and inhibiting lipid peroxidation processes. Moreover, certain phenolic compounds demonstrate antimicrobial activity against spoilage microorganisms, which may contribute to the reduced microbial contamination and prolonged shelf life observed in the experimental group. The improvement in juiciness and tenderness may also be associated with better preservation of muscle tissue structure under reduced oxidative stress.

The organoleptic assessment of meat included evaluation of appearance and color, the condition of muscles on the cut surface, texture, odor, as well as the clarity and aroma of the broth.

For organoleptic analysis, breast and drumstick samples with and without skin, obtained on the day of slaughter after chilling, were boiled. For taste and texture evaluation, skinless samples were used. For broth assessment, meat with skin and bones was boiled. Appearance and color were

evaluated by inspecting the surface of the product, noting the condition of the skin (for products with skin) and its dryness. Odor was assessed on the cut surface in the inner layers. The condition of muscles on the cut: breast and thigh muscles were cut across the muscle fibers and their appearance was evaluated. Clarity and aroma: broth was prepared from the breast and drumstick, and its odor and aroma were evaluated; clarity was determined visually.

The evaluation was conducted using a 10-point scale, and the results are presented in Table 4.

Table 4 – Organoleptic assessment of boiled broiler meat

Naming of the indicator	Breast fillet		Thigh fillet	
	Control group of chickens	Experimental group of chickens	Control group of chickens	Experimental group of chickens
Appearance	9,8	9,8	9,8	9,8
View and color on the section	9,8	9,8	9,8	9,8
The flavor of meat	8,7	8,8	9,0	9,3
The flavor of the broth	9,8	9,9	9,8	9,8
Transparency of the broth	8,8	9,0	8,9	9,1
Meat consistency	8,5	8,7	8,8	9,2
Juiciness	8,0	8,5	8,6	9,0
Softness	8,0	8,5	8,6	9,1
Overall assessment	8,9	9,1	9,2	9,4

The results presented in Table 4 show that the inclusion of grape seed meal in the diet of chicks does not negatively affect the organoleptic properties of the meat. The organoleptic evaluation of boiled broiler meat can be visually represented using radar (spider) charts (Figures 1 and 2).

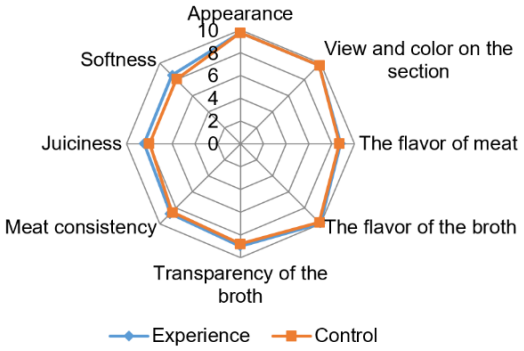


Figure 1 – Radar chart illustrating the organoleptic evaluation of boiled broiler breast fillets from the control and experimental groups.

The experimental group supplemented with grape seed meal demonstrated slightly higher scores for aroma, juiciness, tenderness, broth transparency, and overall sensory quality compared to the control group

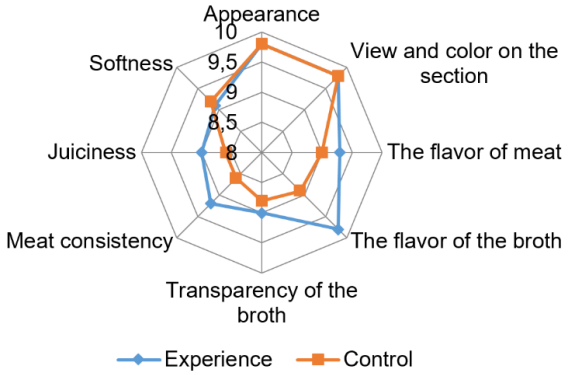


Figure 2 – Radar chart illustrating the organoleptic evaluation of boiled broiler thigh fillets from the control and experimental groups.

Meat obtained from broilers fed grape seed meal showed improved sensory characteristics, particularly in juiciness, softness, meat flavor, and overall acceptabil

As evidenced by the obtained results, the meat from the experimental feeding group exhibited slightly higher quality. At the same time, almost all parameters of thigh fillets were higher than those of breast fillets.

Conclusion

The results of the study demonstrated that the inclusion of grape seed meal in the diet of broiler chickens positively affected the safety, quality, and shelf life of meat. Microbiological analysis showed that meat from the experimental group had lower levels of contamination. In whole carcasses, the total count of mesophilic aerobic and facultative anaerobic microorganisms (TAMC) was less than 4×10^1 CFU/g, compared to 1.1×10^2 CFU/g in the control group, while the standard limit is 1×10^5 CFU/g. In the liver, the TAMC in the experimental group was 1.1×10^3 CFU/g, which is 19 times lower than in the control group (2.1×10^4 CFU/g) and well below the permissible limit (1×10^6 CFU/g). *Listeria monocytogenes* and pathogenic microorganisms, including *Salmonella* spp., were not detected in 25 g of samples from either group. Analysis of toxic elements showed either undetectable levels or values below the limits of detection: lead – <0.001 mg/kg (limit ≤0.5 mg/kg), arsenic – <0.003 mg/kg (limit ≤0.1 mg/kg), cadmium – <0.001 mg/kg (limit ≤0.05 mg/kg), mercury – <0.002 mg/kg (limit ≤0.03 mg/kg). These data confirm the toxicological safety of the meat. Shelf-life evaluation demonstrated an increase in the storage stability of meat from the experimental group by 2 days. Changes in odor in whole carcasses of the control group were observed on day 8, while in the experimental group they appeared on day 10. Spoilage was recorded on day 9 in the control group and on day 11 in the experimental group. A similar trend was observed for fillets: deterioration in the control group occurred on day 9, while in the experimental group it occurred on day 11. Organoleptic evaluation of boiled meat using a 10-point scale showed slightly higher scores for the experimental group. The overall score for breast fillets was 9.1 versus 8.9 in the control; thigh fillets scored 9.4 versus 9.2. For juiciness and tenderness, breast fillets from the experimental group scored 0.5 points higher than the control (8.5 vs. 8.0), and thigh fillets scored 0.4-0.5 points higher (9.0-9.1 vs. 8.6). In conclusion, the inclusion of grape seed meal in broiler diets resulted in a significant reduction of microbial contamination (up to 19-fold in liver), extended shelf life by 2 days, maintained toxicological safety, and improved organoleptic properties of meat. These results support the potential use of grape seed meal as a functional feed additive in poultry production. However, additional toxicological and clinical studies are required before recommending such products for children's nutrition.

References

1. Feeding broiler chickens with grape seed and skin meals to enhance α and γ tocopherol content and meat oxidative stability / C. Romero et al // Antioxidants. – 2021. – № 10(5). – P. 699. https://doi.org/10.3390/antiox10050699.
2. Use of polyphenol-rich grape by-products in monogastric nutrition / A. Brenes et al // A review. Anim. Feed. Sci. Technol. – 2016. – № 211. – P. 1-17. https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2015.09.016.
3. Consumption of oxidised oil increases oxidative stress in broilers and affects the quality of breast meat / W. Zhang et al // J. Agric. Food Chem. – 2011. – № 59. – P. 969-974. https://doi.org/10.1021/jf102918z.
4. Efficacy of dietary antioxidants on broiler oxidative stress, performance and meat quality: Science and market / S.A. Salami et al // Avian Boil. Res. – 2015. – № 8. – P. 65-78. https://doi.org/10.3184/175815515X14291701859483.
5. Antioxidant Supplementation Minimizes the Negative Impact of Dietary Oxidised Oil on Chicken Broiler Breast and Thigh Meat Quality / R.M. Delles et al // In Proceedings of the 59th International Congress of Meat Science and Technology, Izmir, Turkey, 18-23 August 2013.
6. Effect of dietary Salvia officinalis essential oil and sodium selenite supplementation on antioxidative status and blood phagocytic activity in broiler chickens / M. Ryzner et al // Acta Vet. Brno. – 2013. – № 82. – P. 43-48. https://doi.org/10.2754/avb201382010043.
7. Iuga M. Antioxidant activity and total phenolic content of grape seeds and peels from romanian varieties / M. Iuga, S. Ropciuc, S. Mironeasa // Food Environ. Safety J. – 2017. – № 16. – P. 276-282.
8. Grape pomace polyphenols improve insulin response to a standard meal in healthy individuals: A pilot study / G. Costabile et al // Clin. Nutr. – 2019. – № 38. – P. 2727-2734. https://doi.org/10.1016/j.clnu.2018.11.028.

9. Sebranek J. Natural and Organic Cured Meat Products: Regulatory Manufacturing / J. Sebranek, J. Bacus // Marketing, Quality and Safety Issues. AMSA. White Paper Series 1. 2007.
10. Khodayari F. The effect of red grape pomace on performance, lipid peroxidation (MDA) and some serum biochemical parameters in broiler / F. Khodayari, H.A. Shahria // Adv. Biores. – 2014. – № 5. – P. 82-87.
11. Bioproductive parameters and fatty acids profile of the meat from broilers treated with flax meal and grape seeds meal / M. Olteanu et al // Sci. Pap. Anim. Sci. Biotechno. – 2017. – № 50. – P. 15-21.
12. Supplementation of grape pomace (Vitis vinifera) in broiler diets and its effect on growth performance, apparent total tract digestibility of nutrients, blood profile, and meat quality / S. Aditya et al // Anim. Nutr. – 2018. – № 4. – P. 210-214 https://doi.org/10.1016/j.aninu.2018.01.004.
13. Descriptive sensory and instrumental texture profile analysis of woody breast in marinated chicken / M.E. Aguirre et al // Poult. Sci. – 2018. – № 97. – P. 1456-1461. https://doi.org/10.3382/ps/pex428.
14. Rigor development and meat quality of large and small broilers and the use of Allo-Kramer shear, needle puncture, and razor blade shear to measure texture / L.C. Cavitt et al // Poult. Sci. – 2005. – № 84. – P. 113-118. https://doi.org/10.1093/ps/84.1.113.
15. Fletcher D.L. Poultry meat quality / D.L. Fletcher // World's Poult. Sci. J. – 2002. – № 58. – P. 131-145. https://doi.org/10.1079/WPS20020013.
16. Color variation and characterization of broiler breast meat during processing in Italy / M. Petracci et al // Poult. Sci. – 2004. – № 83. – P. 2086-2092. https://doi.org/10.1093/ps/83.12.2086.
17. Goni I. Effect of dietary grape pomace and grape seed extract on poultry meat quality and oxidative stability / I. Goni, A. Brenes, C. Centeno // Foods. – 2022. – № 11. – P. 1456. https://doi.org/10.3390/foods11101456.
18. Ahmed S.T. Dietary polyphenols and poultry meat quality: A review / S.T. Ahmed, M.M. Islam, A.B.M.R. Bostami // Poultry Science. – 2023. – № 102(4). – P. 102512. https://doi.org/10.1016/j.psj.2023.102512.
19. Kara K. Natural antioxidants in broiler nutrition and their effects on meat shelf life / K. Kara, B.K. Guclu, E. Baytok // Animals. – 2021. – № 11. – P. 3025. https://doi.org/10.3390/ani11113025.
20. Abdel-Wareth A.A.A. Grape by-products in poultry nutrition: impacts on productivity and meat quality / A.A.A. Abdel-Wareth, J. Lohakare // Frontiers in Veterinary Science. – 2024. – № 11. – P. 1287412. https://doi.org/10.3389/fvets.2024.1287412.

М.К. Курманахынова, Ш.А. Абжанова*, Г.Н. Жаксылыкова, А.У. Байбекова, Н.К. Ахметова
Алматы технологиялық университеті,
050012, Қазақстан Республикасы, Алматы қаласы, Төле би көшесі, 100
*e-mail: sholpan-ab@mail.ru

ЖҮЗІМ ДӘНДЕРІНІҢ ҰНТАҒЫН БРОЙЛЕР ТАУЫҚ РАЦИОНЫНА ҚОСҚАНДА ЕТТІҢ МИКРОБИОЛОГИЯЛЫҚ ҚАУІПСІЗДІГІ, САПАСЫ ЖӘНЕ ОРГАНОЛЕПТИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН БАҒАЛАУ

Зерттеу бройлер тауық етінің микробиологиялық қауіпсіздігі, сапасы және органолептикалық қасиеттерін бағалауға бағытталған, рационға жүзім дәндерінің ұнтағы енгізілген жағдайларды ескере отырып. Зерттеу екі бройлер тобында жүргізілді: стандартты теңдестірілген рацион алған бақылау тобы және рационға табиғи полифенолды қосылыстар мен антиоксиданттар көзі ретінде жүзім дәндерінің ұнтағы қосылған тәжірибелік топ. Салқындатылғаннан кейін, соғылған күні алынған толық тушка мен бауырдың микробиологиялық талдауы тәжірибелік топта микробтық ластанудың төмен екенін көрсетті. Толық тушкалардағы мезофильді аэробты және факультативті анаэробты микроорганизмдердің жалпы саны тәжірибелік топта 4×10¹ КОЕ/г-дан төмен болса, бақылау тобында 1,1×10² КОЕ/г болды; ал бауырда — 1,1×10³ КОЕ/г қарсы 2,1×10⁴ КОЕ/г, бұл нормативтік көрсеткіштерден айтарлықтай төмен. Listeria monocytogenes және Salmonella spp. сияқты патогенді микроорганизмдер екі топта да анықталған жоқ. Зерттеу нәтижелері бойынша токсикалық элементтердің (қорғасын, мышьяк, кадмий және сынап) мөлшері анықтау шегінен төмен болып, еттің токсикологиялық қауіпсіздігін растады. Сақталу мерзімін бағалау көрсеткендей, тәжірибелік топтағы ет бақылау тобындағы етке қарағанда 2 күнге ұзақ жарамды болып шықты, сонымен қатар иіс өзгерісі мен шіріктің

белгілері кеш байқалды. Вареная төс және жамбас филеін органолептикалық бағалау тәжірибелік топта біршама жоғары көрсеткіштерді көрсетті, әсіресе иіс, шырындылық, жұмсақтық және жалпы сапа бағасы бойынша (төс филесі: 9,1 қарсы 8,9; жамбас филесі: 9,4 қарсы 9,2). Зерттеу нәтижелері жүзім дәндерінің ұнтағын бройлерлердің рационына енгізу микробиологиялық қауіпсіздікті арттыратынын, сақтау мерзімін ұзартады және сенсорлық қасиеттерді жақсартады, органолептикалық қасиеттерге теріс әсер етпейтінін көрсетеді. Бұл деректер жүзім дәндерінің ұнтағын функционалды жемдік қосымша ретінде, соның ішінде балаларға арналған өнімдерде қолданудың тиімділігін растайды.

Түйін сөздер: *Бройлерлер, жүзім дәнінің ұны, микробиологиялық қауіпсіздік, органолептикалық қасиеттер, сақтау мерзімі, функционалды құс өнімдері.*

М.К. Курманахынова, Ш.А. Абжанова*, Г.Н. Жаксылыкова, А.У. Байбекова, Н.К. Ахметова
Алматинский технологический университет,
050012, Республика Казахстан, Алматы, ул. Толе би, 100
*e-mail: sholpan-ab@mail.ru

ОЦЕНКА МИКРОБИОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ, КАЧЕСТВА И ОРГАНОЛЕПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЯСА БРОЙЛЕРОВ ПРИ ВКЛЮЧЕНИИ МУКИ ИЗ ВИНОГРАДНЫХ КОСТОЧЕК В РАЦИОН

Исследование было направлено на оценку микробиологической безопасности, качества и органолептических свойств мяса бройлеров при включении в рацион муки из виноградных косточек. Исследование проводилось на двух группах бройлеров: контрольной, получавшей стандартный сбалансированный рацион, и опытной, рацион которой был дополнен мукой из виноградных косточек как источником природных полифенольных соединений и антиоксидантов. Микробиологический анализ целых тушек и печени, отобранных в день убоя после охлаждения, показал более низкое микробное обсеменение в опытной группе. Общая численность мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов в целых тушках составила менее 4×10^1 КОЕ/г по сравнению с $1,1\times10^2$ КОЕ/г в контрольной группе, а в печени – $1,1\times10^3$ КОЕ/г против $2,1\times10^4$ КОЕ/г, что значительно ниже установленных нормативов. Listeria monocytogenes и патогенные микроорганизмы, включая Salmonella spp., не были обнаружены ни в одной из групп. Анализ содержания токсичных элементов (свинец, мышьяк, кадмий и ртуть) показал значения ниже предела обнаружения, что подтверждает токсикологическую безопасность мяса. Оценка сроков годности показала, что мясо из опытной группы оставалось пригодным на 2 дня дольше, чем мясо контрольной группы, при этом изменения запаха и признаки порчи отмечались с задержкой. Органолептическая оценка вареных филе грудки и бедра показала несколько более высокие показатели у опытной группы, особенно по показателям аромата, сочности, нежности и общей оценки качества (филе грудки: 9,1 против 8,9; филе бедра: 9,4 против 9,2). Результаты исследования показывают, что включение муки из виноградных косточек в рацион бройлеров повышает микробиологическую безопасность, продлевает срок годности и улучшает сенсорные показатели без негативного влияния на органолептические свойства. Эти данные подтверждают целесообразность использования муки из виноградных косточек в качестве функциональной добавки к корму для птицы, в том числе для продуктов, предназначенных для детского питания.

Ключевые слова: *Бройлеры, мука из виноградных косточек, микробиологическая безопасность, органолептические показатели, срок годности, функциональные продукты из птицы.*

Авторлар туралы мәліметтер

Молдир Канатовна Курманахынова – техника ғылымдарының магистрі, Алматы технологиялық университеті, Алматы, Қазақстан Республикасы; e-mail: molya_kanatkyzy@mail.ru.

Шолпан Аманкелдыкызы Абжанова* – техника ғылымдарының кандидаты, «Тағамдық биотехнология» кафедрасының қауым.профессоры, Алматы технологиялық университеті, Алматы, Қазақстан Республикасы; e-mail: sholpan-ab@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3209-6855.

Гульшат Нурмуханбетовна Жаксылыкова – техника ғылымдарының кандидаты, Тағам технологиялар факультетінің деканы, Алматы технологиялық университеті, Алматы, Қазақстан Республикасы; e-mail: sholpan-ab@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0563-4304.

Әйгерім Уакитқызы Байбекова – техника және технологиялар магистрі, «Тағамдық биотехнология» кафедрасының сеньор-лекторы, Алматы технологиялық университеті, Алматы, Қазақстан Республикасы; e-mail: aiko_1995kz@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4070-5844.

Назым Қайратқызы Ахметова – техника және технологиялар магистрі, «Тағамдық биотехнология» кафедрасының ассистенті, Алматы технологиялық университеті, Алматы, Қазақстан Республикасы.

Сведения об авторах

Молдир Канатовна Курманахынова – магистр технических наук, Алматинский технологический университет, Алматы, Республика Казахстан; e-mail: molya_kanatkyzy@mail.ru.

Шолпан Амангельдиевна Абжанова* – кандидат технических наук, ассоциированный профессор кафедры «Пищевая биотехнология», Алматинский технологический университет, Алматы, Республика Казахстан; e-mail: sholpan-ab@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3209-6855.

Гульшат Нурмуханбетовна Жаксылыкова – кандидат технических наук, Декан факультета пищевых технологий; Алматинский технологический университет, Алматы, Республика Казахстан; e-mail: sholpan-ab@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0563-4304.

Айгерим Уакитовна Байбекова – магистр техники и технологий, сеньор-лектор кафедры «Пищевая биотехнология», Алматинский технологический университет, Алматы, Республика Казахстан; e-mail: aiko_1995kz@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4070-5844.

Назым Қайратқызы Ахметова – магистр техники и технологий, ассистент кафедры «Пищевая биотехнология», Алматинский технологический университет, Алматы, Республика Казахстан.

Information about the authors

Moldir Kurmanakhynova – Master of Technical Sciences, Almaty Technological University, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: molya_kanatkyzy@mail.ru.

Sholpan Abzhanova* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of 'Food Biotechnology', Almaty Technological University, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: sholpan-ab@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3209-6855.

Gulshat Nurmakhanbetovna Zhaksylykova – Candidate of Technical Sciences, Dean of the Faculty of Food Technology; Almaty Technological University, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: sholpan-ab@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0563-4304.

Aigerim Uakitkyzy Baibekova – master of engineering and Technology, Senior Lecturer of the Department «Food Biotechnology», Almaty Technological University, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: aiko_1995kz@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4070-5844.

Nazym Kairatovna Akhmetova – master of engineering and Technology, assistant of the Department «Food Biotechnology», Almaty Technological University, Almaty, Republic of Kazakhstan.

Received 30.03.2026
Revised 03.05.2026
Accepted 20.05.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-51

IRSTI 65.63.39

CC BY 4.0
Check for updates

G.N. Zhakupova[1], K.K. Makangali[1], A.E. Shoman[2], Keizo Arihara[3], K.S. Dairova[1]*

[1]Kazakh Agrotechnical Research University named after S.Seifullin,
010000, Kazakhstan, Astana, 62 Zhenis St.
[2]Astana IT University,
010000, Kazakhstan, Astana, Mangilik El Avenue, C1
[3]Kitasato University,
Japan, Tokyo, 5-9-1 Shirokane, Minato ku
*e-mail: dairova111@mail.ru

DEVELOPMENT OF SOFT CHEESE TECHNOLOGY FROM BLENDED MILK WITH OPTIMIZATION OF COAGULATION PARAMETERS

Abstract: *The rational use of mixed dairy raw materials is a promising direction in soft cheese technology, as it allows to increase the cheese suitability and improve the quality of the finished product. The study investigated the effect of the ratio of cow's, goat's and camel's milk on the coagulation processes and the quality of soft cheese. The temperature regimes of coagulation, duration of coagulation, organoleptic, physic-chemical and textural parameters of the product were studied.*

It has been established that optimal coagulation conditions for combined dairy raw materials are achieved at a temperature of 40 ° C and a duration of 40 minutes. The best results were shown by a sample

©G.N. Zhakupova, K.K. Makangali, A.E. Shoman, Keizo Arihara, K.S. Dairova, 2026

with a ratio of 60% cow's milk, 20% goat's milk and 20% camel's milk, which provided an increase in the yield of cheese mass by 3.3% compared with the control, stable coagulation and formation of a homogeneous structure of the product and a decrease in titrated acidity to 106 °T versus 116°T in the control sample from cow's milk.

The increased cheese yield and coagulation stability in 1-sample are due to the balanced ratio of proteins and fats in the combined dairy raw materials.

The results obtained confirm the prospects of using combined dairy raw materials in soft cheese technology and can be used in the development of products with improved organoleptic and structural-mechanical properties.

***Key words**: soft cheese, combined milk raw materials, milk coagulation, goat milk, camel milk, textural properties of cheese, cheese suitability of milk.*

Introduction

In the diet of modern humans, cheese occupies one of the leading positions. Among the wide variety of cheeses, the group of soft cheeses – those with a short ripening period or produced without ripening – appears particularly promising from the standpoint of high nutritional and biological value, efficient utilization of raw material components, and the feasibility of organizing their production at existing dairy processing facilities, among other advantages. An additional attractive feature is that the production of soft cheeses allows the incorporation of a broad range of functional food ingredients and various flavor additives. This capability significantly expands the assortment of cheeses produced, enabling them to be targeted at different population groups and to be endowed with specific functional properties [1].

Increasing the production of soft cheeses by utilizing not only cow's milk but also milk from other animal species – particularly goat and camel milk – can serve as one of the most accessible approaches to partially addressing the problem of insufficient high-quality protein in the modern human diet. This is especially relevant given that goat farming is currently a rapidly developing branch of animal husbandry. The hypoallergenic properties and unique biological characteristics of both goat and camel milk are also highly attractive features [2].

In this context, expanding the product range through the development and production of soft cheeses made from mixtures of cow's and goat's milk with the addition of plant-derived components represents a relevant and promising direction in modern cheese-making technology.

The purpose of the study is to substantiate the rational composition of a mixed raw material formulation for cheese production, as well as to select and justify the optimal coagulation (renneting) regimes that ensure stable progression of coagulation processes, the formation of a high-quality curd, and the production of a product with predetermined physicochemical and technological characteristics.

The scientific novelty of the study is a comprehensive assessment of the effect of a three-component dairy system consisting of cow, goat and camel milk on the kinetics of rennet coagulation, as well as on the physico-chemical, textural and organoleptic properties of soft cheese. Unlike previously published studies that focused on two-component milk mixtures, this paper shows how different ratios of three types of milk affect the formation of the cheese structure and the overall quality of the final product.

In the present work, cow, goat, and camel milk were selected for further investigation.

Cow milk contains a sufficient amount of casein – the main milk protein responsible for curd formation and cheese structure. Casein accounts for approximately 80% of the total protein in cow milk, making it particularly suitable for coagulation and the production of firm and semi-firm cheeses. This property enables the manufacture of a wide range of cheese varieties, such as Cheddar, Gouda, Parmesan, and many others [3].

The fat and protein content in cow milk is present in an optimal ratio for cheese production, which ensures the desired consistency and flavor profile of the final product. Milk fat plays a critical role in the texture and flavor richness of cheese [4].

Camel milk is characterized by a lower casein content and a distinct protein structure compared to cow milk. Nevertheless, under rationally selected technological coagulation conditions, it is capable of forming a stable soft curd with high water-holding capacity [5].

Taking into account the specific technological properties of each type of milk, it is considered technologically and economically justified to develop a combined mixture based on cow, goat, and camel milk.

This approach allows for the creation of a balanced raw material base that combines the strong coagulating ability and structural-forming potential of cow milk with the unique biological and functional properties of goat and camel milk, thereby expanding the possibilities for producing soft cheeses with enhanced nutritional and consumer characteristics.

It has been found that using milk from several species of animals can produce a product with a unique combination of fats, proteins and vitamins, since cow's milk provides the basis for a product with a high casein content, necessary for coagulation and texture formation [6]. And goat milk adds lightness and improves digestibility thanks to its small fat globules and special fatty acids. Camel milk adds probiotic and antibacterial properties to the product, and also increases the content of vitamins C and B, which makes snacks healthier. Due to camel milk, the product can have a probiotic effect, helping to improve digestion [7].

Previously, research was carried out on the creation of cheeses from mixed components of dairy raw materials. For example, Gemechu et al. found that 100% camel milk is characterized by low cheese yield and delayed coagulation, while its mixture with cow's milk, especially 25:75, provides intensive coagulation, higher yield and improved physicochemical properties, confirming the feasibility of combined raw materials [8].

Abdugamitova A.E. et al. investigated the technology for the production of brine cheese from combined milk raw materials (a mixture of cow and goat milk), showing that the use of a combined composition allows us to obtain a product with an improved consistency, a more pronounced flavor profile and stable organoleptic characteristics compared to cheese from single-species cow's milk, and cheese from a combined mixture gave a higher yield (12.5%) than cow's milk (11%) [9]. In a study by S. Saremnezhad et al. studied the effect of different ratios of sheep and goat milk on the functional properties of Lighvan white cheese cheese during 90 days of ripening and showed that the use of a milk mixture with a higher proportion of goat milk increased antioxidant activity and angiotensin converting enzyme (ACE) inhibitory activity, and also increased α-glucosidase inhibition, while a higher proportion of sheep milk increased the content esters, terpenes, alcohols and saturated/unsaturated fatty acids, which indicates positive changes in the functional and aromatic profile of the product when using formula [10]. In the works of O. Boukria et al. Cheeses based on mixtures of milk from different animal species are studied and it is shown that such cheeses demonstrate improved chemical, physicochemical, structural and organoleptic properties. Such as a change in fat and protein profile, increased free fatty acid content and improved sensory characteristics - compared to cheeses made from milk of the same type [6].

Modern cheese making actively uses combined milk, which is a specially developed mixture of milk from different animals (cattle and small livestock). This approach allows for precise control of casein, whey proteins, fat and minerals, which are critical to achieving the desired curdling and ripening properties of the cheese. Mixing different types of milk (for example, cow's milk with goat's or camel's milk) provides a number of advantages, such as accelerated curd formation, increased cheese yield, improved moisture and texture, as well as enrichment with fatty acids and minerals [11, 12].

Materials and methods

To conduct experimental studies on the comparative assessment of milk from various farm animals as raw materials for cheese production, the following were used: milk from Simmental cows from «Moya Ferma» LLP, camel milk from the Bacterian breed from personal farms, and milk from Saanen goats from «Arka-Zerenda» LLP.

The technology of soft cheese commences with the reception of milk, which undergoes initial purification to remove any foreign particles. Following this, the milk is homogenized to achieve an ideal distribution of its protein, fat, and mineral components. This prepared blend is then subjected to pasteurization at 72°C for a brief period of 15-20 seconds, before being cooled to the appropriate temperature for fermentation. At this stage, specific starter cultures, namely Lactococcus lactis subsp. lactis and Lactococcus lactis subsp. cremoris, along with rennet, are introduced. The interplay of lactic acid fermentation and enzymatic action leads to the formation of a firm, uniform curd.

The curd is cut to accelerate the separation of the whey. This is followed by a process of self-pressing and mechanical pressing to consolidate its structure. Salting is achieved by immersing the cheese in a 10% sodium chloride solution for 10-15 minutes. Finally, the cheese undergoes a ripening phase at 10-12 °C with approximately 80% relative humidity, allowing it to develop its

distinctive sensory attributes. Figure 1 shows the appearance of soft cheese produced from the combined milk mixture.

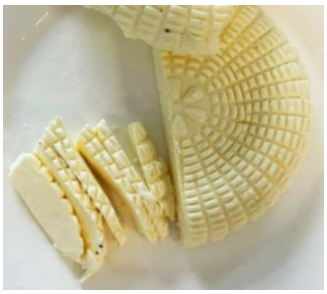


Figure 1 – The appearance of soft cheese made from a combined milk mixture (60-20-20)

Studies of the chemical composition of milk from camels, goats and cows, and the study of their comparative characteristics were carried out in the scientific laboratory of the Institute of Engineering and Food Technologies in accordance with regulatory documents using generally accepted research methods.

The coagulation processes of a combined milk mixture in the production of soft cheese were studied in laboratory conditions.

To select the optimal temperature regime for coagulation during production, the most important factors are temperature and duration of heat treatment. These factors affect milk coagulability, cheese yield, consistency and moisture content.

The mass fraction of proteins and fats (%) was determined using a Tango-R FT-NIR near-infrared spectrometer. This method is an express, non-destructive and high-precision analytical method that ensures prompt receipt of reliable results.

Titratable acidity (°T) was determined by the acid-base titration method in accordance with GOST 3624-92 «Milk and dairy products. Method for determining titratable acidity». This method allows an integral assessment of the total content of all titratable acids present in the product.

The density of milk mixtures was determined in accordance with the GOST R 54758-2011 standard «Milk and milk processing products. Methods for determining density» [13].

The mass fraction of dry substances (%) was determined by the refractometric method in accordance with the requirements of GOST 3626-73 «Milk and dairy products. Method for determining the content of dry substances». This method is based on the dependence of the refractive index of a sample on the concentration of dissolved solids in its composition [14].

Active acidity (pH) was determined in accordance with the requirements of GOST 26188-84 «Food Products. Methods for determining pH». The study used an Atago pH meter, which provides a reliable and accurate estimate of the hydrogen ion concentration in the samples [15].

Organoleptic evaluation was carried out in accordance with GOST R ISO 22935-2-2011 «Milk and dairy products. Organoleptic analysis. Part 2. Recommended methods for organoleptic evaluation». The tasting assessment was carried out in a specially prepared room under standard conditions: air temperature 20-22 °C, uniform natural and artificial lighting, absence of foreign odors and noise. 10 tasters (teachers and students) took part in the organoleptic analysis. Processing and systematization of the obtained data was carried out using the Microsoft Excel software application [16].

The determination of texture characteristics was carried out on a TX-700 Lamy Rheology SARL texture analyzer, the operation of which is based on measuring the resistance force of a sample during its mechanical deformation. During the analysis, the sample was subjected to controlled compression by a probe at a given speed and depth, and the device recorded the dependence of force on deformation. Based on the curves obtained, the main textural parameters characterizing the structural and mechanical properties of the product were calculated.

Statistical data processing was performed using Minitab software, while graphical visualization of the results was carried out in Microsoft Excel.

Results

Proper combination of different types of milk is an effective way to control the processes of curd formation and formation of the cheese structure. In the context of the conducted research, special

attention was paid to the effect of mixing milk of different animal species on the parameters of coagulation and structure formation during the cheese-making process.

Compositions were made from cow, goat and camel milk and work was carried out in the laboratory to study changes in the content of fat, protein and density and acidity in raw milk.

The combined mixture consists of a composition of milk: cow/goat/camel in the following ratios (%):

Option-1: 60:20:20

Option-2: 40:30:30

Option-3: 20:40:40

Cow's milk 100/0 was taken as a control sample. Analysis data are shown in Table 1.

Table 1 – Chemical composition and properties of mixed compositions of dairy raw materials

Samples	Indicators			
	Mass fraction of protein, %	Mass fraction of fat, %	Density, kg/m^3	Acidity, ºT
n=5				
Control	3.11±0,06	3,32±0,08	1028,87±0,17	17±0.78
60/20/20	3,07±0,08	4,03±0,07	1027,80±0,21	18±0.15
40/30/30	3,04±0,07	3,76±0,06	1028,13±0,19	18±1.25
20/40/40	3,01±0,06	4,04±0,08	1027,81±0,13	18±0.65

In the original cow's milk, the mass fraction of protein was 3.11%, while in all variants of mixed milk (60/20/20, 40/30/30 and 20/40/40) it was slightly lower (3.07-3.01%), that is, the difference did not exceed approximately 1-3% compared to the control sample. The mass fraction of fat, on the contrary, increased from 3.32% in cow's milk to 3.76-4.04% in mixtures, which corresponds to an increase of approximately 13-22% relative to the control and reflects the contribution of fattier components (goat and camel milk) in the formation of the mixture composition. The density in all samples remained comparable (1027.80-1028.87 kg/m³), the titratable acidity value changed slightly.

To study the coagulation processes of the combined milk formula, 3 variants of technological modes were selected – temperature and duration of heat treatment.

1st mode – temperature 30 °C: duration 40 minutes;

2nd mode – temperature 40 °C: duration 40 minutes;

3rd mode – temperature 50 °C: duration 40 minutes.

It should be noted that when using the 1st mode, i.e. at 30°C, the coagulation process of the combined milk formula did not occur due to the low temperature. A study of the 2nd and 3rd coagulation modes at coagulation temperatures of 40 °C and 50 °C showed positive results.

The Table 2 provides data on the effect of temperature conditions on the yield of cheese and whey.

Table 2 – Influence of technological regimes (temperature 40 °C and 50 °C, duration 40 minutes) on the coagulation process of the combined milk mixture during the self-pressing stage

Indicators	Control	1-sample	2-sample	3-sample
	100/0	60/20/20	40/30/30	20/40/40
At 40°C				
Cheese mass yield, g	600	620	550	The clot did not form
Cheese whey yield, ml	400	380	450	The serum did not stand out
At 50°C				
Cheese mass yield, g	560	610	530	An unstable clot has formed
Cheese whey yield, ml	440	990	470	Most of the protein went into the whey

At 40°C, the control sample (100/0) produced 600 g of cheese mass and 400 ml of whey. The highest cheese yield was observed in the 1-sample (60/20/20), reaching 620 g, while the whey yield decreased to 380 ml. In the 2-sample (40/30/30), the cheese mass yield decreased to 550 g, accompanied by an increase in whey separation to 450 ml. In the 3-sample (20/40/40), stable clot formation was not observed, and whey separation did not occur.

At 50°C, a decrease in cheese mass yield was observed in most samples. The control sample produced 560 g of cheese mass and 440 ml of whey, while the 1-sample showed a yield of 610 g. However, in the 1-sample, whey separation increased substantially to 990 ml. The 2-sample demonstrated lower cheese yield (530 g) and 470 ml of whey. In the 3-sample, only an unstable clot was formed, indicating impaired coagulation properties at elevated temperature.

Also, analyzes were carried out on the obtained cheese samples to determine physicochemical parameters. The data is given below on Figure 2.

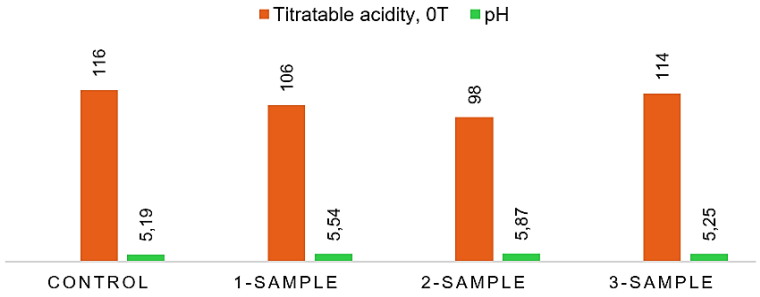


Figure 2 – pH and titratable acidity of cheese from a combined milk mixture

The results showed that the addition of goat and camel milk to cow's milk affected the physicochemical properties of the samples, particularly titratable acidity and pH. Compared to the control, titratable acidity decreased from 116°T to 106°T and 98°T in the 1-sample and 2-sample, while pH increased from 5.19 to 5.54 and 5.87, indicating a decrease in overall acidity.

However, in the 3-sample, titratable acidity increased to 114 °T and pH decreased to 5.25, approaching the control values.

Subsequently, an examination of the protein, fat, and solids mass fractions presented in Figure 3 was conducted.

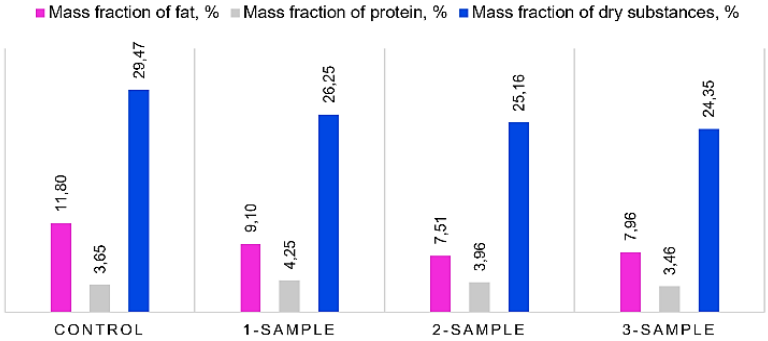


Figure 3 – Physic-chemical characteristics of cheese from a combined milk mixture

The substitution of cow's milk with goat's and camel milk significantly affected the physicochemical properties of the samples. As the proportion of goat and camel milk increased from 60/20/20 to 20/40/40 (cow/goat/camel milk), the fat content gradually decreased from 11,8±1,63% in the control sample to 9,1±1,06%, 7,51±0,02%, and 7,96±1,05% in the 1-, 2-, and 3-samples, respectively. Protein content varied within a relatively narrow range; however, the 1-sample showed the highest value (4,25±1,41%). A gradual decrease in dry substances was also observed, from 29,47±0,86% in the control to 26,25±1,05%, 25,16±1,45%, and 24,35±0,56% in the experimental samples.

It is crucial to study the texture characteristics of cheeses in order to assess their quality and technological suitability. Modern scientific studies emphasize the importance of texture analysis in the development and comparison of cheeses with different compositions. Changes in the composition and ripening stage of cheeses significantly impact their rheological and textural properties, which directly affect the functionality and quality of the final product [17]. Texture indicators such as hardness, elasticity, and cohesion allow for objective differentiation between different types of cheeses and correlate with their structural integrity and organoleptic properties [18]. The Table 3 shows data on texture indicators.

Table 3 – Texture indicators of cheese from a combined milk mixture

Indicator	Control	60/20/20	40/30/30	20/40/40
n=5				
Hardness	8,90±1.02	7,50±1.02	6,70±0.12	3,80±0.12
Gumminess	6,80±0.56	8,90±1.86	5,10±1.52	2,90±0.75
Chewiness	6,90±0.75	9,10±0.15	5,20±0.12	3,00±0.75
Cohesiveness	0,76±0.45	0,79±0.85	0,74±0.85	0,68±0.15
Springiness	0,95±0.95	1,02±0.95	0,96±0.75	0,90±0.25
Resilience	0,28±0.12	0,32±0.15	0,27±0.96	0,22±0.87

According to the research, the sample with a ratio of 60:20:20 demonstrated the highest hardness values (7.50 N), significantly superior to the other tested samples (40:30:30 – 6.70 N; 20:40:40 – 3.80 N). Similarly, this sample had the highest values of stickiness (8.90 N) and chewiness (9.10 N), indicating the formation of a denser and more elastic protein structure. It also showed the best results in cohesion (0.79), elasticity (1.02) and elasticity (0.32), indicating strong internal bonds and good recovery after deformation.

Organoleptic analysis allows you to comprehensively assess the consumer properties of cheese – taste, aroma, consistency, appearance and color, reflecting its quality, degree of maturity and compliance with technological requirements. Figure 4 shows the organoleptic characteristics of ready-made cheeses.

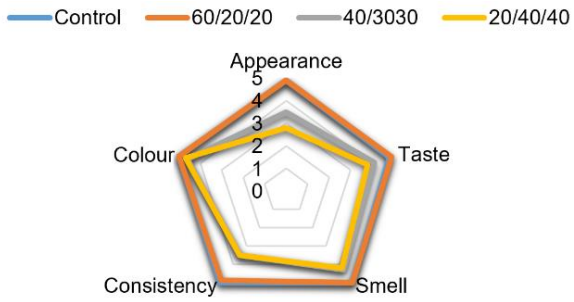


Figure 4 – Diagram of organoleptic characteristics of cheese samples

Organoleptic evaluation showed that the control sample and the sample with a 60/20/20 ratio received the highest scores (4.8-5.0), characterized by harmonious taste, aroma, uniform consistency, attractive appearance and uniform color. Sample 40/30/30 was rated as satisfactory (3.5-4.6 points) with slight deterioration in taste, smell and consistency. The worst results (2.8-4.7 points) were shown by sample 20/40/40, which had noticeably reduced indicators of appearance, taste and consistency. In general, an increase in the proportion of some components in the recipe led to a deterioration in the organoleptic characteristics of the product.

Discussion

The incorporation of goat and camel milk noticeably influenced the physicochemical and technological behavior of the mixed dairy systems. These effects are primarily related to differences in protein structure, fat globule size, mineral composition, and buffering properties of the non-cow milk components [19]. Goat milk, characterized by lower αs1-casein content and smaller fat globules, contributed to the formation of a softer protein matrix, whereas camel milk affected coagulation behavior due to its specific casein profile and reduced coagulation ability [20].

Changes in acidity parameters confirmed the impact of milk composition on the acid-base equilibrium of the system [21]. The decrease in titratable acidity and increase in pH observed in the 1- and 2-samples may be associated with the higher buffering capacity and altered mineral balance of goat and camel milk. However, at higher replacement levels (20/40/40), the acidity profile shifted closer to the control values, suggesting destabilization of the mineral-protein equilibrium and changes in acid formation during coagulation [22].

Coagulation temperature also played a critical role in curd formation and whey separation. The absence of stable coagulation at 30°C indicates insufficient enzymatic activity and slower aggregation of casein micelles in combined milk systems. In contrast, increasing the temperature to

50 °C intensified syneresis and weakened the protein matrix, resulting in higher whey losses and reduced curd stability. These effects were especially pronounced in samples with elevated proportions of goat and camel milk. The most stable coagulation behavior and the highest technological suitability were observed at 40°C, particularly for the 60/20/20 formulation.

The ratio of milk components additionally influenced fat retention, dry matter content, and textural characteristics of the cheeses. Increasing the proportion of goat and camel milk led to a gradual reduction in hardness, cohesiveness, and chewiness, indicating the formation of a softer and less compact structure [23]. This is consistent with literature data describing weaker gel formation and higher moisture retention in cheese systems containing goat and camel milk [24]. Samples with higher levels of camel milk also demonstrated increased whey separation and a more curd-like consistency, reflecting weaker protein network formation.

Sensory evaluation supported the physicochemical and textural findings. The control sample demonstrated organoleptic properties typical of soft cheese, while the 60/20/20 sample combined a mild creamy flavor, uniform consistency, and acceptable structural stability. Further increase in goat and camel milk content negatively affected texture and appearance, resulting in softer, less cohesive products with visible whey release.

Overall, the results indicate that moderate incorporation of goat and camel milk can improve certain nutritional and sensory characteristics of soft cheese while preserving technological stability. Among the studied formulations, the 60/20/20 ratio provided the most balanced combination of coagulation properties, texture, physicochemical characteristics, and sensory quality.

Conclusion

Currently, the use of mixed milk raw materials is of particular importance, as it enables more efficient resource utilization, compensates for the limitations inherent to individual milk types, and provides precise control over the coagulation and structure-forming processes during cheese production.

Blending different types of milk represents an effective technological approach that enhances production stability and facilitates the development of novel cheese varieties with tailored functional and sensory characteristics.

The conducted research demonstrated that the optimal coagulation conditions are a temperature of 40°C and a coagulation time of 40 minutes. These parameters ensure a stable and reproducible coagulation process, resulting in the formation of a high-quality curd.

It was established that the proportions of cow, goat, and camel milk in the mixture significantly influence the quality attributes and overall characteristics of the resulting soft cheese. The best results in terms of taste, aroma, appearance, chemical composition, and texture parameters (hardness, chewiness, elasticity, and cohesiveness) were obtained with the formulation containing 60% cow milk, 20% goat milk, and 20% camel milk. The sensory and textural properties of this variant fully comply with the quality requirements for soft cheeses.

This particular blend also contributed to an increased cheese yield, efficient whey separation, and the achievement of optimal physicochemical properties in the final product.

Thus, the selected coagulation parameters and the composition of the milk mixture have been scientifically substantiated and are recommended for practical application in cheese-making technology.

References

1. El-Sayed S.M. Physicochemical characteristics of novel UF-soft cheese containing red radish roots nanopowder / S.M. El-Sayed, O.A. Ibrahim // Biocatalysis and Agricultural Biotechnology. – 2021. – T. 33. – P. 101980. https://doi.org/10.1016/j.bcab.2021.101980.
2. Regional features of camel milk composition and properties in the Republic of Kazakhstan / A. Yessenova et al. // Slovak Journal of Food Sciences. – 2024. – T. 18. https://doi.org/10.5219/1952.
3. RETRACTED ARTICLE: Influence of the kappa casein genotype on the technological properties of cow milk of Simmental and Alatau breeds / A.Z. Khastayeva et al // Functional & Integrative Genomics. – 2021. – T. 21, № 2. – P. 231-238. https://doi.org/10.1007/s10142-021-00772-1.
4. Milk fat composition modifies the texture and appearance of Cantal-type cheeses but not their flavor / M. Fretin et al //Journal of Dairy Science. – 2019. – T. 102, № 2. – P. 1131-1143. https://doi.org/10.3168/jds.2018-15534.

5. A review on camel milk composition, techno-functional properties and processing constraints / M.A. Arain et al // Food science of animal resources. – 2024. – Т. 44, № 4. – P. 739. https://doi.org/10.5851/kosfa.2023.e18.
6. The effect of mixing milk of different species on chemical, physicochemical, and sensory features of cheeses: A review / O. Boukria et al // Foods. – 2020. – Т. 9, № 9. – P. 1309. https://doi.org/10.3390/foods9091309.
7. Cow milk coagulation: process description, variation factors and evaluation methodologies. A review / T. Troch et al // Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement. – 2017. – Т. 21. https://doi.org/10.25518/1780-4507.13692.
8. Efficiency of cheese making from camel milk by blending with cow milk at different proportion / A. Gemechu et al // Asian J. Anim. Vet Sci. – 2023. – Т. 6. – P. 174-182. https://doi.org/10.9734/AJRAVS/2023/V6I2244.
9. Исследование рассольного сыра из комбинированного молока сельскохозяйственных животных жамбылской области / А.Е. Абдугамитова и др. // Вестник Университета Шакарима. Серия технические науки. – 2024. – № 4(16). – С. 167-174. https://doi.org/10.53360/2788-7995-2024-4(16)-22.
10. Influence of the Blends of Sheep's and Goat's Milk on the Functional Properties and Volatile Compounds of Lighvan Cheese During Ripening: A Comparative Study / S. Saremnezhad et al // Food Science & Nutrition. – 2024. – Т. 12, № 11. – P. 9764-9776. https://doi.org/10.1002/fsn3.4543.
11. Elgaml N. Comparison of the properties of Halloumi cheese made from goat milk, cow milk and their mixture / N. Elgaml, M.A.M. Moussa, A.E. Saleh //Journal of Sustainable Agricultural Sciences. – 2017. – Т. 43, № 2. – P. 77-87. https://doi.org/10.21608/jsas.2017.1065.1006.
12. Physicochemical and nutritional properties of different non-bovine milk and dairy products: A review / S.A. Siddiqui et al // International Dairy Journal. – 2024. – Т. 148. – P. 105790. https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2023.105790.
13. ГОСТ Р 54758-2011. Молоко и продукты переработки молока. Методы определения плотности. – Введ. 2013-01-01. – Москва : Стандартинформ, 2012. – 12 с.
14. ГОСТ 3626-73. Молоко и молочные продукты. Методы определения влаги и сухого вещества. – Взамен ГОСТ 3626-47 ; введ. 1974-07-01. – Москва : Стандартинформ, 2009. – 8 с.
15. ГОСТ 26188-84. Продукты переработки плодов и овощей, консервы мясные и мясорастительные. Метод определения pH. – Введ. 1986-01-01. – Москва : Стандартинформ, 2010. – 6 с.
16. ГОСТ Р ИСО 22935-2-2011. Молоко и молочные продукты. Органолептический анализ. Часть 2. Рекомендуемые методы органолептической оценки. – Введ. 2012-07-01. – Москва: Стандартинформ, 2011. – 16 с.
17. Burgos L.S. Textural, rheological and sensory properties of spreadable processed goat cheese / L.S. Burgos, N.B.C. Pece Azar, S. Maldonado – 2020. https://doi.org/10.7455/ijfs/9.SI.2020.a5.
18. Dairy versus non-dairy cheese texture: Sensory and instrumental contrasts / S. Hutchings et al // Journal of texture studies. – 2024. – Т. 55, № 4. – P. e12863. https://doi.org/10.1111/jtxs.12863.
19. Milk coagulation properties and methods of detection / S. Beux et al // Ciência Rural. – 2017. – Т. 47, № 10. – P. e20161042. https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20161042.
20. Effect of composition on coagulation, curd firming, and syneresis of goat milk / G. Stocco et al // Journal of Dairy Science. – 2018. – Т. 101, № 11. – P. 9693-9702. https://doi.org/10.3168/jds.2018-15027.
21. Influence of protein concentration and coagulation temperature on rennet-induced gelation characteristics and curd microstructure / R.R. Panthi et al // Journal of Dairy Science. – 2019. – Т. 102, № 1. – P. 177-189. https://doi.org/10.3168/jds.2018-15039.
22. Britten M. Rennet coagulation of heated milk: A review / M. Britten, H.J. Giroux // International Dairy Journal. – 2022. – Т. 124. – P. 105179. https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2021.105179.
23. Fundamentals of cheese science / P.F. Fox et al. – Boston, MA, USA: Springer, 2017. – Т. 1. – P. 271. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-7681-9.
24. Yap M. Microbiota of Raw Milk and Raw Milk Cheeses / M. Yap, O. O'Sullivan, P.D. Cotter // Cheese. – Academic Press, 2025. – P. 335-347. https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15956-5.00032-4.

References

1. El-Sayed S.M. Physicochemical characteristics of novel UF-soft cheese containing red radish roots nanopowder / S.M. El-Sayed, O.A. Ibrahim // Biocatalysis and Agricultural Biotechnology. – 2021. – T. 33. – R. 101980. https://doi.org/10.1016/j.bcab.2021.101980. (In English).
2. Regional features of camel milk composition and properties in the Republic of Kazakhstan / A. Yessenova et al. // Slovak Journal of Food Sciences. – 2024. – T. 18. https://doi.org/10.5219/1952. (In English).
3. RETRACTED ARTICLE: Influence of the kappa casein genotype on the technological properties of cow milk of Simmental and Alatau breeds / A.Z. Khastayeva et al // Functional & Integrative Genomics. – 2021. – T. 21, № 2. – R. 231-238. https://doi.org/10.1007/s10142-021-00772-1. (In English).
4. Milk fat composition modifies the texture and appearance of Cantal-type cheeses but not their flavor / M. Fretin et al //Journal of Dairy Science. – 2019. – T. 102, № 2. – R. 1131-1143. https://doi.org/10.3168/jds.2018-15534. (In English).
5. A review on camel milk composition, techno-functional properties and processing constraints / M.A. Arain et al // Food science of animal resources. – 2024. – T. 44, № 4. – R. 739. https://doi.org/10.5851/kosfa.2023.e18. (In English).
6. The effect of mixing milk of different species on chemical, physicochemical, and sensory features of cheeses: A review / O. Boukria et al // Foods. – 2020. – T. 9, № 9. – R. 1309. https://doi.org/10.3390/foods9091309. (In English).
7. Cow milk coagulation: process description, variation factors and evaluation methodologies. A review / T. Troch et al // Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement. – 2017. – T. 21. https://doi.org/10.25518/1780-4507.13692. (In English).
8. Efficiency of cheese making from camel milk by blending with cow milk at different proportion / A. Gemechu et al // Asian J. Anim. Vet Sci. – 2023. – T. 6. – R. 174-182. https://doi.org/10.9734/AJRAVS/2023/V6I2244. (In English).
9. Issledovanie rassol'nogo syra iz kombinirovannogo moloka sel'skokhozyaistvennykh zhivotnykh zhambylskoi oblasti / A.E. Abdugamitova i dr. // Vestnik Universiteta Shakarima. Seriya tekhnicheskie nauki. – 2024. – № 4(16). – S. 167-174. https://doi.org/10.53360/2788-7995-2024-4(16)-22. (In Russian).
10. Influence of the Blends of Sheep's and Goat's Milk on the Functional Properties and Volatile Compounds of Lighvan Cheese During Ripening: A Comparative Study / S. Saremnezhad et al // Food Science & Nutrition. – 2024. – T. 12, № 11. – R. 9764-9776. https://doi.org/10.1002/fsn3.4543. (In English).
11. Elgaml N. Comparison of the properties of Halloumi cheese made from goat milk, cow milk and their mixture / N. Elgaml, M.A.M. Moussa, A.E. Saleh //Journal of Sustainable Agricultural Sciences. – 2017. – T. 43, № 2. – R. 77-87. https://doi.org/10.21608/jsas.2017.1065.1006. (In English).
12. Physicochemical and nutritional properties of different non-bovine milk and dairy products: A review / S.A. Siddiqui et al // International Dairy Journal. – 2024. – T. 148. – R. 105790. https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2023.105790. (In English).
13. GOST R 54758-2011. Moloko i produkty pererabotki moloka. Metody opredeleniya plotnosti. – Vved. 2013-01-01. – Moskva : Standartinform, 2012. – 12 s. (In Russian).
14. GOST 3626-73. Moloko i molochnye produkty. Metody opredeleniya vlagi i sukhogo veshchestva. – Vzamen GOST 3626-47 ; vved. 1974-07-01. – Moskva : Standartinform, 2009. – 8 s. (In Russian).
15. GOST 26188-84. Produkty pererabotki plodov i ovoshchei, konservy myasnye i myasorastitel'nye. Metod opredeleniya pH. – Vved. 1986-01-01. – Moskva : Standartinform, 2010. – 6 s. (In Russian).
16. GOST R ISO 22935-2-2011. Moloko i molochnye produkty. Organolepticheskii analiz. Chast' 2. Rekomenduemye metody organolepticheskoi otsenki. – Vved. 2012-07-01. – Moskva: Standartinform, 2011. – 16 s. (In Russian).
17. Burgos L.S. Textural, rheological and sensory properties of spreadable processed goat cheese / L.S. Burgos, N.B.C. Pece Azar, S. Maldonado – 2020. https://doi.org/10.7455/ijfs/9.SI.2020.a5. (In English).

18. Dairy versus non-dairy cheese texture: Sensory and instrumental contrasts / S. Hutchings et al // Journal of texture studies. – 2024. – Т. 55, № 4. – R. e12863. https://doi.org/10.1111/jtxs.12863. (In English).
19. Milk coagulation properties and methods of detection / S. Beux et al // Ciência Rural. – 2017. – Т. 47, № 10. – R. e20161042. https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20161042. (In English).
20. Effect of composition on coagulation, curd firming, and syneresis of goat milk / G. Stocco et al // Journal of Dairy Science. – 2018. – Т. 101, № 11. – R. 9693-9702. https://doi.org/10.3168/jds.2018-15027. (In English).
21. Influence of protein concentration and coagulation temperature on rennet-induced gelation characteristics and curd microstructure / R.R. Panthi et al // Journal of Dairy Science. – 2019. – Т. 102, № 1. – R. 177-189. https://doi.org/10.3168/jds.2018-15039. (In English).
22. Britten M. Rennet coagulation of heated milk: A review / M. Britten, H.J. Giroux // International Dairy Journal. – 2022. – Т. 124. – R. 105179. https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2021.105179. (In English).
23. Fundamentals of cheese science / P.F. Fox et al. – Boston, MA, USA: Springer, 2017. – Т. 1. – R. 271. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-7681-9. (In English).
24. Yap M. Microbiota of Raw Milk and Raw Milk Cheeses / M. Yap, O. O'Sullivan, P.D. Cotter // Cheese. – Academic Press, 2025. – R. 335-347. https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15956-5.00032-4. (In English).

Acknowledgements

This research was carried out within the framework of the targeted scientific and technical program IRN BR24892775, entitled «Development of Technology for the Integrated and Advanced Processing of Agricultural Raw Materials for the Production of High-Quality and Safe Food Products».

Г.Н. Жакупова[1], К.К. Макангали[1], А.Е. Шоман[2], Кейзо Арихара[3], К.Ш. Даирова[1]*
[1]Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина,
010000, Казахстан, г. Астана, ул. Женис, 62.
[2]Astana IT Университет, 010000, Казахстан, г. Астана, проспект Мангилик Ел, С1.
[3]Университет Китасато, Япония, г. Токио, район Минато, Широкане 5-9-1.
*e-mail: dairova111@mail.ru

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ МЯГКОГО СЫРА НА ОСНОВЕ СМЕСИ КОРОВЬЕГО, КОЗЬЕГО И ВЕРБЛЮЖЬЕГО МОЛОКА С ОПТИМИЗАЦИЕЙ ПАРАМЕТРОВ КОАГУЛЯЦИИ

Рациональное использование смешанного молочного сырья является перспективным направлением в технологии мягких сыров, поскольку позволяет повысить сыропригодность и улучшить качество готового продукта. В работе исследовали влияние соотношения коровьего, козьего и верблюжьего молока на процессы коагуляции и качество мягкого сыра. Изучались температурные режимы свертывания, продолжительность коагуляции, органолептические, физико-химические и текстурные показатели продукта.

Установлено, что оптимальные условия коагуляции комбинированного молочного сырья достигаются при температуре 40 °С и продолжительности 40 минут. Наилучшие результаты показал образец с соотношением 60 % коровьего, 20 % козьего и 20 % верблюжьего молока, обеспечивший повышение выхода сырной массы на 3,3 % по сравнению с контролем, стабильное свертывание и формирование однородной структуры продукта и снижение титруемой кислотности до 106 °Т против 116 °Т у контрольного образца из коровьего молока.

Повышенный выход сыра и стабильность коагуляции в образце 1 обусловлены сбалансированным соотношением белков и жиров в комбинированном молочном сырье.

Полученные результаты подтверждают перспективность использования комбинированного молочного сырья в технологии мягких сыров и могут быть использованы при разработке продуктов с улучшенными органолептическими и структурно-механическими свойствами.

***Ключевые слова**: мягкий сыр, комбинированное молочное сырье, свертывание молока, козье молоко, верблюжье молоко, текстурные свойства сыра, сырная пригодность молока.*

Г.Н. Жакупова[1], К.К. Макангали[1], А.Е. Шоман[2], Кейзо Арихара[3], Қ.Ш. Даирова[*]
С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті,
010000, Қазақстан, Астана қ., Жеңіс көшесі, 62.
Astana IT Университеті, 010000, Қазақстан, Астана қ., Мәңгілік Ел даңғылы, С1.
Китасато университеті, Жапония, Токио қ., Минато ауданы, Широкане 5-9-1.
*e-mail: dairova111@mail.ru

СИЫР, ЕШКІ ЖӘНЕ ТҮЙЕ СҮТІНІҢ ҚОСПАСЫ НЕГІЗІНДЕ ҰЙЫТУ ПАРАМЕТРЛЕРІН ОҢТАЙЛАНДЫРУ АРҚЫЛЫ ЖҰМСАҚ ІРІМШІК ТЕХНОЛОГИЯСЫН ӘЗІРЛЕУ

Комбинирленген сүт шикізатын ұтымды пайдалану жұмсақ ірімшік технологиясының перспективалы бағыты болып табылады, өйткені ол ірімшікке жарамдылықты арттыруға және дайын өнімнің сапасын жақсартуға мүмкіндік береді. Бұл зерттеуде сиыр, ешкі және түйе сүтінің арақатынасының коагуляция процестеріне және жұмсақ ірімшіктің сапасына әсері зерттелді. Ұйытудың температуралық режимдері, ұйыту ұзақтығы, өнімнің органолептикалық, физика-химиялық және текстуралық көрсеткіштері зерттелді.

Комбинирленген сүт шикізатының коагуляциясының оңтайлы шарттарына 40 °С температурада және ұзақтығы 40 минутта қол жеткізілетіні анықталды. Оңтайлы нәтиже 60% сиыр, 20% ешкі және 20% түйе сүтінің арақатынасы бар үлгі көрсетті, бұл бақылаумен салыстырғанда ірімшік массасының 3,3% жоғарылауын, өнімнің біркелкі құрылымының тұрақты ұюы мен қалыптасуын және титрленетін қышқылдықтың 106 °Т дейін төмендеуін қамтамасыз етті.

1-үлгідегі ірімшік өнімділігі мен коагуляция тұрақтылығының жоғарылауы аралас сүт шикізатындағы ақуыздар мен майлардың теңдестірілген қатынасына байланысты болуы мүмкін.

Нәтижелер жұмсақ ірімшік технологиясында комбинирленген сүт шикізатын пайдалану амалын растайды және органолептикалық және құрылымдық-механикалық қасиеттері жақсартылған өнімдерді әзірлеу кезінде пайдаланылуы мүмкін.

Түйін сөздер: *жұмсақ ірімшік, аралас сүт шикізаты, сүттің ұюы, ешкі сүті, түйе сүті, ірімшіктің құрылымдық қасиеттері, сүттің ірімшікке жарамдылығы.*

Information about the authors

Gulmira Nurtaevna Zhakupova – Candidate of Technical Sciences, Professor, Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin, Kazakhstan; e-mail: gulmira-zhak@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7714-4836.

Kadyrzhan Konysbayuli Makangali – PhD, Director of the Engineering center Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin, Kazakhstan; e-mail: k.makangali@kazatu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4128-6482.

Aruzhan Erbolkyzy Shoman – PhD, Director of the Research and Innovation Center «Agrotechnology», Astana IT University, Kazakhstan; e-mail: shoman.aruzhan0403@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7844-8601.

Keizo Arihara – Ph.D. Professor, Kitasato University, Japan; e-mail: arihara@vmas.kitasato-u.ac.jp. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9035-3189.

Kalamkas Sharapatkyzy Dairova* – Master's student, Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin, Kazakhstan; e-mail: Dairova111@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-4487-4625.

Авторлар туралы мәліметтер

Гульмира Нуртаевна Жакупова – т.ғ.к., профессор, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана, Қазақстан; e-mail: gulmira-zhak@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7714-4836.

Кадыржан Конысбайулы Макангали – PhD, Инжиниринг орталығының директоры, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Қазақстан; e-mail: k.makangali@kazatu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4128-6482.

Аружан Ерболқызы Шоман – PhD, «Агротехнология» ғылыми-инновациялық орталығының директоры, Astana IT University, Қазақстан; e-mail: shoman.aruzhan0403@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7844-8601.

Кейзо Арихара – PhD, профессор, Китасато университеті, Жапония; e-mail: arihara@vmas.kitasato-u.ac.jp. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9035-3189.

Қаламқас Шарапатқызы Даирова* – магистрант, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана, Қазақстан; e-mail: dairova111@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-4487-4625.

Сведения об авторах

Гульмира Нуртаевна Жакупова – к.т.н., профессор, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Астана, Казахстан; e-mail: gulmira-zhak@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7714-4836.

Кадыржан Конысбайулы Макангали – PhD, директор Инжинирингового центра, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина», Казахстан; e-mail: k.makangali@kazatu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4128-6482.

Аружан Ерболкызы Шоман – PhD, директор Научно-инновационного центра «Агротехнология», Astana IT Университет, Казахстан; e-mail: shoman.aruzhan0403@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7844-8601.

Кейзо Арихара – PhD, профессор, Университет Китасато, Япония; e-mail: arihara@vmas.kitasato-u.ac.jp. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9035-3189.

Каламкас Шарапаткызы Даирова* – магистрант, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Астана, Казахстан; e-mail: dairova111@mail.ru. ORCID:https://orcid.org/0009-0006-4487-4625.

Received 30.03.2026
Revised 13.05.2026
Accepted 25.05.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-52

CC BY 4.0
Check for updates

МРНТИ: 65.59.29

А.У. Шингисов[1], О.Т. Азизов[2], Э.У. Майлыбаева[1], У.У. Тастемирова[1]*, Ж.С. Набиева[3]
[1]Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова,
160000, Республика Казахстан г. Шымкент,пр.Тауке-хана,5
[2]Ташкентский химико-технологический институт,
100011, Республика Узбекистан г. Ташкент, пр. Навои, 32
[3]Алматинский технологический университет,
050012, Республика Казахстан г. Алматы, ул.Толе би, 100
*e-mail: ib_tu@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ АНТИОКСИДАНТНОГО СЫРЬЯ И РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЛОДОВО-ЯГОДНО-ОВОЩНОГО КИЁМА

Аннотация: *В статье представлены результаты исследования физико-химических показателей, антиоксидантных и реологических свойств растительного сырья и десертного продукта «киёма» на его основе. В качестве объектов исследования использованы шафран, куркума и имбирь, а также образцы киёмов, разработанные с применением различных рецептурных решений.*

Целью настоящего исследования является обоснование целесообразности использования растительных ингредиентов с высокой антиоксидантной активностью при разработке функционального плодово-овощного-ягодного десерта «киёма», а также оценка их влияния на структурно-механические характеристики готового продукта. Развитие ассортимента натуральных десертов на основе фруктов, овощей и пряно-ароматического сырья способствует формированию рационального питания за счёт замещения традиционных сахаросодержащих сладких изделий продуктами с повышенной пищевой и биологической ценностью.

В ходе экспериментальных исследований определены показатели влажности, зольности, pH, содержания биологически активных соединений и антиоксидантной активности растительного сырья. Установлено, что шафран характеризуется наибольшей антиоксидантной активностью, обусловленной высоким содержанием кроцина и флавоноидов, тогда как куркума и имбирь дополняют композицию за счёт куркумина.

Реологические свойства киёма оценивали по показателям вязкости, крутящего момента, текучести, липкости и адгезии. Показано, что исследуемые образцы относятся к вязко-пластичным системам с псевдо пластическим характером течения, а рецептурные различия

©А.У. Шингисов, О.Т. Азизов, Э.У. Майлыбаева, У.У. Тастемирова, Ж.С. Набиева, 2026

существенно влияют на формирование их структурно-механических свойств. Полученные результаты подтверждают перспективность разработанного десерта «киёма» как функционального продукта питания.

Ключевые слова: *киёма, шафран, куркума, имбирь, антиоксидантная активность, реологические свойства, растительное сырьё.*

Введение

В условиях развития пищевой промышленности Республики Казахстан актуальной задачей является разработка продуктов переработки растительного сырья, обладающих стабильными структурно-механическими свойствами и высокой пищевой ценностью.

Исследование казахстанских учёных показало, что функциональные пищевые продукты обладают значительным потенциалом в улучшении состояния здоровья населения и формировании профилактического питания [1]. Авторы отмечают рост интереса потребителей к продуктам функционального назначения и подчёркивают необходимость учёта пищевого статуса и заболеваемости населения при формировании ассортимента таких продуктов в Казахстане, что подтверждает перспективность разработки продуктов с повышенной биологической ценностью и антиоксидантной активностью.

Согласно данным исследований, полученные результаты подчёркивают перспективность применения растительного сырья регионального происхождения в технологиях функциональных продуктов, ориентированных на повышение биологической ценности и антиоксидантных свойств [2].

Изменение моделей питания и рост интереса к продуктам с повышенной пищевой ценностью формируют предпосылки для развития функциональных продуктов, в том числе на основе плодо-ягодно-овощного сырья, что подтверждает актуальность разработки продуктов с заданными качественными и функциональными характеристиками [3].

Применение усовершенствованных методов переработки растительного сырья позволяет повысить качество готовой продукции и расширить ассортимент продуктов переработки, при этом подчёркивается наличие перспективных направлений для дальнейшего развития технологий плодоовощной переработки. Рассматриваются современные технологические подходы к производству плодоовощных джемов, пюре и соков в условиях Республики Казахстан [4].

Несмотря на значительное количество работ, посвящённых производству джемов и варенья, вопросы создания продуктов с пониженным содержанием сахара и сохранённой биологической ценностью требуют дальнейших исследований [5].

В работе [6] проведено исследование органолептических показателей и минерального состава плодоовощно-ягодного десерта «киёма». Авторами показано, что данный продукт характеризуется сбалансированными органолептическими свойствами и содержит значительное количество минеральных веществ, что подтверждает его пищевую и биологическую ценность и перспективность использования киёма в качестве продукта функционального назначения.

Роль растительного сырья для производства плодоовощно-ягодного киёма должен основываться на его химическом составе, антиоксидантном потенциале и технологической пригодности. В научных исследованиях показано, что плоды и овощи, богатые фенольными соединениями, витаминами, каротиноидами и минеральными веществами, представляют наибольший интерес для создания продуктов функционального назначения.

Отдельные виды растительного сырья оказывают специфическое влияние на реологические характеристики продуктов переработки. Так, исследования реологических свойств плодово-ягодных пюре показывают, что сырьё, богатое полисахаридами и пектинами, формирует устойчивые вязко-пластичные системы с выраженным псевдопластическим характером течения [7].

Отдельные виды растительного сырья оказывают специфическое влияние на реологические характеристики продуктов переработки. Так, современные исследования показывают, что пастообразные системы, включающие овощное пюре, обладают выраженным вязко-пластичным поведением и устойчивой структурой, обусловленной содержанием полисахаридов и пищевых волокон, что влияет на их вязкость и сопротивление течению в условиях сдвига [8].

В частности, исследование реологических свойств тыквенного пюре продемонстрировало, что высокая биологическая ценность данного сырья сопровождается повышенной вязкостью, что затрудняет текучесть и определяет необходимость корректировки рецептуры при использовании тыквенного компонента в продуктовом составе [9]. Анализ стабильности ягодных пюре также свидетельствует о влиянии состава сырья на физико-химические свойства полуфабрикатов, которые напрямую коррелируют с реологическими характеристиками продукта [10]. Современные исследования методов модификации реологических параметров показывают, что такие факторы, как температура обработки и влажность, существенно изменяют вязкость и индекс поведения потока пастообразных продуктов растительного происхождения [11].

Современные публикации подчёркивают необходимость комплексной оценки не только классических реологических показателей, но и параметров липкости и адгезии, которые характеризуют взаимодействие продукта с рабочими поверхностями оборудования и оказывают влияние на потребительские свойства. В работах последних лет показано, что для смешанных плодово-ягодных продуктов данные показатели являются важными критериями качества.

Анализ литературных источников показывает, что реологические характеристики плодово-ягодных продуктов в значительной степени зависят от рецептурного состава и технологических режимов переработки. Однако данные, посвящённые комплексному исследованию вязкости, крутящего момента, текучести, липкости и адгезии именно плодово-ягодно-овощных киёмов, представлены ограниченно. В связи с этим проведение соответствующих исследований является актуальной задачей.

Целью настоящей работы является исследование реологических свойств плодово-ягодно-овощного киёма и оценка влияния его компонентного состава на структурно-механические характеристики.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования служили: шафран, куркума и имбирь, 2 образца киёмов. При приготовлении рецептов киёмы был проведен подбор плодов, ягод и овощей в зависимости от сочетаемости функциональных свойств, цветовых, вкусовых и ароматических показателей.

Выбранное сырье является источником биологически активных веществ, обеспечивающих многофункциональный профилактический эффект. Это сырье экологически чистое и доступно в нашем регионе.

Физико-химические и антиоксидантные свойства растительного сырья изучались в испытательной лаборатории по контролью и оборота ветеринарных лекарственных средств и кормовых добавок при Государственном научном центре по контролю качества и оборота ветеринарных лекарственных средств и кормовых добавок в г. Ташкент Республики Узбекистан.

Исследования реологических характеристик киёмов, обогащенных натуральными нутриентами и антиоксидантами изучались в лабораторной базе Казахского научно-исследовательского института пищевой и перерабатывающей промышленности.

Результаты исследований и их обсуждение

Исследование физико-химических показателей и антиоксидантных свойств шафрана, куркумы, имбиря производились на базе испытательной лаборатории по контролью и оборота ветеринарных лекарственных средств и кормовых добавок при Государственном научном центре по контролю качества и оборота ветеринарных лекарственных средств и кормовых добавок в г. Ташкент Республики Узбекистан.

Результаты исследования физико-химических показателей и антиоксидантных свойств шафрана, куркумы и имбиря приведены в таблице 1.

Анализ данных, представленных в таблице 1, свидетельствует о том, что наименьшее содержание влаги обнаружено в образцах имбиря и составляет 6,76%. Вместе с тем уровень влажности в куркуме превышает этот показатель на 13,6%, а наибольшее содержание влаги обнаружено в шафране (73,07%).

Таким образом, шафран характеризуется наиболее высокой гигроскопичностью среди исследуемых образцов.

Таблица 1 – Физико-химические и антиоксидантные характеристики растительного сырья

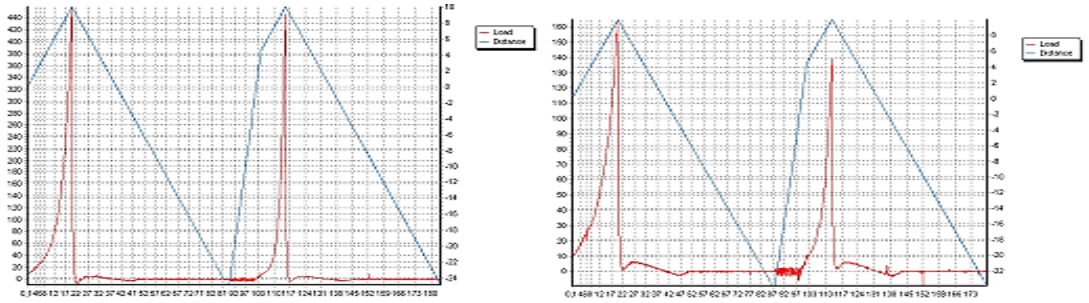
№ п/п	Физико-химические и антиоксидантные характеристики растительного сырья	Куркума	Шафран	Имбирь
1	Влажность,%	9,18	11,70	6,76
2	Зольность	5,18	6,72	5,76
3	Уровень pH	6,76	-	-
4	Содержание кроцина	-	7,14	-
4	Содержание сухих веществ (эфирные масла),%	-	-	2,24
5	Пектин,%	-	-	1,88
6	ИК спектор куркумина,%	98,0		

Как известно, что индикатором общего содержания минеральных веществ является зольность. Данные приведенные в таблице по зольности показывают, что наибольшее значение показателя установлено у шафрана, что может указывать на высокую концентрацию неорганических компонентов. За ним следуют имбирь и куркума, которые демонстрируют умеренные уровни зольного остатка. Такая последовательность свидетельствует о различиях в минеральном составе и, возможно, различиях в агротехнических условиях выращивания и послепроизводственной обработке каждого из продуктов.

Анализ данных приведенных в таблице 1 по антиоксидантной активностью показывают, что шафран обладает наибольшей антиоксидантной активностью среди исследованных продуктов, что связано с высоким содержанием кроцина и флавоноидов. Куркума занимает второе место благодаря наличию куркумина, а имбирь, хотя и уступает по антиоксидантной активности, остаётся ценным источником гингеролов и шогаолов.

Таким образом на основании вышеизложенных можно сделать вывод о том, что изучение физико-химических и антиоксидантных характеристик шафрана, куркумы и имбиря представляет собой важное направление в науке о пищевых продуктах. Шафран, куркума и имбирь демонстрируют высокий потенциал как натуральные антиоксиданты, способные служить в качестве функциональных добавок к пище, которые при систематическом употреблении оказывают лечебно-профилактический эффект посредством целенаправленного улучшения физиологических функций организма и его отдельных органов и систем.

Результаты экспериментального исследования реологических характеристик образцов киемы приведены на рисунке 1, а числовые значения реологических характеристик образцов киемы представлены в таблице 2.



а) б)

Рисунок 1 – График реологических показателей киёмов: а) образец № 1; б) образец № 2

Таблица 2 – Основные реологические параметры киёмов

№ п/п	Опытные образцы десертного продукта	Вязкость, (с·Р)	Крутящийся момент	Текучесть, ($Па^{-1}.с^{-1}$)	Липкость, (N)	Адгезия, (N·s)
Киема						
1	№ 1	11050	22,1	0,0905	0,082	3,5
2	№ 2	19350	38,7	0,0517	0,232	2,5

Анализ таблицы 2 показывает, что такие показатели как вязкость и крутящий момент в образце № 1 ниже на 24,9% по сравнению с обрацом № 2. По показателю текучести образец № 2 2,82 раза больше чем в образце №1 и составляет 0,0527 (Па-1.с-1). Как известно, что липкость киемы связана с вязкостью и содержанием сахара в продукте. Так как в образце № 2 содержится сироп сахара в количестве 24,27% от его массы, поэтому вязкость в образце № 2 в 2,83 раза больше чем в образце № 1 (в образце вместо сахара использован сок дыни). Данные приведенные в таблице по показателю адгезий показывает, что в образце № 1 показатель адгезия на 28,72% больше чем в образце № 2.

Анализ данных, представленных в таблице 2, демонстрирует, что показатели вязкости и крутящего момента в образце № 1 на 24,9% ниже по сравнению с образцом № 2. Показатель текучести у образца № 2 составляет 0,0527 $Па^{-1} \cdot с^{-1}$, что в 2,82 раза превышает соответствующее значение для образца № 1.

Известно, что липкость пищевых продуктов обусловлена, прежде всего, их вязкостью и содержанием легкорастворимых сахаров. В образце № 2 используется сахарный сироп, составляющий 24,27% от общей массы продукта, что, по-видимому, является определяющим фактором более высокой вязкости – она в 2,83 раза превышает вязкость образца № 1, в котором вместо сиропа применён дынный сок, обладающий меньшей концентрацией сахаров и, соответственно, меньшим влиянием на структурно-механические свойства системы.

Что касается адгезионных характеристик, то согласно данным таблицы, в образце № 1 наблюдается повышение показателя адгезии на 28,72% по сравнению с образцом № 2, что может быть связано с различиями в молекулярной структуре компонентов, используемых в рецептуре.

Таким образом, на основании реологических свойств исследованных образцов, установлено, что оптимальными с точки зрения технологических и потребительских показателей являются для десерта киёмы образец № 1. Выбор данного образца обусловлен его сбалансированным составом, высокой сенсорной привлекательностью и благоприятными структурно-механическими антиоксидантными свойствами, что позволяет рекомендовать его в качестве предпочтительного варианта при разработке функциональных фруктово-ягодных десертов.

Заключение

В ходе проведённых исследований установлено, что использование шафрана, куркумы и имбиря в составе плодово-овощно-ягодного десерта «Киёма» позволяет сформировать продукт с выраженными функциональными свойствами и стабильными структурно-механическими характеристиками. Анализ физико-химических показателей и антиоксидантной активности растительного сырья подтвердил целесообразность его применения при разработке десертов профилактического назначения.

Выявлено, что шафран характеризуется наибольшей антиоксидантной активностью за счёт высокого содержания кроцина, тогда как куркума и имбирь обеспечивают дополнительный вклад благодаря наличию куркумина, гингеролов и шогаолов. Совместное использование данных компонентов способствует усилению антиоксидантного потенциала готового продукта.

Реологические исследования показали, что киёма относится к вязко-пластичным структурированным системам с псевдопластическим характером течения. Установлено влияние рецептурных факторов на показатели вязкости, текучести, липкости и адгезии, что имеет практическое значение при выборе оптимальных технологических режимов производства.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке новых видов функциональных плодово-овощно-ягодных десертов, ориентированных на расширение ассортимента продуктов здорового питания.

Список литературы

1. Impact of Functional Foods on Improving the Health of the Kazakh Population / Z. Kozhanov et al // Advancements in Life Sciences. – 2023. – Vol. 10, № 4. – P. 555-562.

2. Kazhygeldiyeva L. Определение химического состава и антиоксидантной активности экстрактов плодов растений Hippophae rhamnoides L. и Crataegus sanguinea L. / L. Kazhygeldiyeva, B. Mussabayeva, A. Sabitova // Academic Scientific Journal of Chemistry. – 2025. – № 1. – P. 68-78.

3. Analysis of the food consumption mode and its influencing factors in Kazakhstan / Y. Liang et al // Journal of Resources and Ecology. – 2020. – Vol. 11, № 1. – P. 121-127. https://doi.org/10.5814/j.issn.1674-764x.2020.01.012.
4. Изучение районированных сортов плодоовощной продукции для разработки технологий получения биоэкологических продуктов с функциональными свойствами / М.Т. Велямов и др. // Вестник Алматинского технологического университета. – 2022. – № 2. – С. 30-36. https://doi.org/10.48184/2304-568X-2022-1-30-36.
5. Optimization of physicochemical and rheological properties of jam / A. Sánchez-Nourmohammadi et al // Food Science & Nutrition. – 2021.
6. Исследование органолептических показателей и минерального состава плодоовощного-ягодного десерта «Киёма» / А.У. Шингисов и др. // Вестник Университета Шакарима. Серия технические науки. – 2025. – № 3. – С. 380-390.
7. Diamante L.M. Rheological properties of fruits and vegetables: A review / L.M. Diamante, M. Umemoto // International Journal of Food Properties. – 2015.
8. Szulc K. Structural and Rheological Characterization of Vegetable Crispbread Enriched with Legume Purée / K. Szulc, S. Galus // Molecules. – 2024. – № 29. – P. 1880. https://doi.org/10.3390/molecules29081880.
9. Study of the rheological properties of a multicomponent carbohydrate complex with pumpkin puree / A. Makarenko et al // Thermophysics and Thermal Power Engineering. – 2025. – № 50. – P. 58-66. https://doi.org/https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2025.6.
10. Стабильность при хранении полуфабрикатов-пюре из ягод крыжовника / О.В. Голуб и др. // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2024. – № 2. https://cyberleninka.ru/article/n/stabilnost-pri-hranenii-polufabrikatov-pyure-iz-yagod-kryzhovnika (дата обращения: 27.01.2026).
11. The Influence of Temperature on Rheological Parameters and Energy Efficiency of Digestate in a Fermenter of an Agricultural Biogas Plant / MF. Gruszczyński et al // Dach J. Energies. – 2024. – № 17(23). – P. 6111. https://doi.org/10.3390/en17236111.

References

1. Impact of Functional Foods on Improving the Health of the Kazakh Population / Z. Kozhanov et al // Advancements in Life Sciences. – 2023. – Vol. 10, № 4. – P. 555-562. (In English).
2. Kazhygeldiyeva L. Opredelenie khimicheskogo sostava i antioksidantnoi aktivnosti ehkstraktov plodov rastenii Hippophae rhamnoides L. i Crataegus sanguinea L. / L. Kazhygeldiyeva, B. Mussabayeva, A. Sabitova // Academic Scientific Journal of Chemistry. – 2025. – № 1. – R. 68-78. (In Russian).
3. Analysis of the food consumption mode and its influencing factors in Kazakhstan / Y. Liang et al // Journal of Resources and Ecology. – 2020. – Vol. 11, № 1. – P. 121-127. https://doi.org/10.5814/j.issn.1674-764x.2020.01.012. (In English).
4. Izuchenie raionirovannykh sortov plodoovoshchnoi produktsii dlya razrabotki tekhnologii polucheniya bioehkologicheskikh produktov s funktsional'nymi svoistvami / M.T. Velyamov i dr. // Vestnik Almatinskogo tekhnologicheskogo universiteta. – 2022. – № 2. – S. 30-36. https://doi.org/10.48184/2304-568X-2022-1-30-36. (In Russian).
5. Optimization of physicochemical and rheological properties of jam / A. Sánchez-Nourmohammadi et al // Food Science & Nutrition. – 2021. (In English).
6. Issledovanie organolepticheskikh pokazatelei i mineral'nogo sostava plodoovoshchnogo-yagodnogo deserta «Kiema» / A.U. Shingisov i dr. // Vestnik Universiteta Shakarima. Seriya tekhnicheskie nauki. – 2025. – № 3. – S. 380-390. (In Russian).
7. Diamante L.M. Rheological properties of fruits and vegetables: A review / L.M. Diamante, M. Umemoto // International Journal of Food Properties. – 2015. (In English).
8. Szulc K. Structural and Rheological Characterization of Vegetable Crispbread Enriched with Legume Purée / K. Szulc, S. Galus // Molecules. – 2024. – № 29. – R. 1880. https://doi.org/10.3390/molecules29081880. (In English).
9. Study of the rheological properties of a multicomponent carbohydrate complex with pumpkin puree / A. Makarenko et al // Thermophysics and Thermal Power Engineering. – 2025. – № 50. – R. 58-66. https://doi.org/https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2025.6. (In English).

10. Stabil'nost' pri khranenii polufabrikatov-pyure iz yagod kryzhovnika / O.V. Golub i dr. // Khranenie i pererabotka sel'khozsyr'ya. – 2024. – № 2. https://cyberleninka.ru/article/n/stabilnost-pri-hranenii-polufabrikatov-pyure-iz-yagod-kryzhovnika (data obrashcheniya: 27.01.2026). (In Russian).
11. The Influence of Temperature on Rheological Parameters and Energy Efficiency of Digestate in a Fermenter of an Agricultural Biogas Plant / MF. Gruszczyński et al // Dach J. Energies. – 2024. – № 17(23). – R. 6111. https://doi.org/10.3390/en17236111. (In English).

Информация о финансировании

Авторы выражают благодарность Комитету науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан за поддержку в рамках программно-целевого финансирования научного проекта на тему «Разработка технологии производства фруктово-ягодных десертов (киёма и конфитюр), обогащённых природными нутриентами и натуральными антиоксидантами» (BR24993031).

А.У. Шингисов[1], О.Т. Азизов[2], Э.У. Майлыбаева[1], У.У. Тастемирова[1]*, Ж.С. Набиева[3]

[1]М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті,
160000, Қазақстан Республикасы, Шымкент қ., Тәуке хан даңғылы, 5
[2]Ташкент химия-технология институты,
100011, Өзбекстан Республикасы, Ташкент қ., Науаи даңғылы, 32
[3]Алматы технологиялық университеті,
050012, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Төле би көшесі, 100
*e-mail: ib_tu@mail.ru

АНТИОКСИДАНТТЫҚ ШИКІЗАТТЫ ЖӘНЕ ЖЕМІС-КӨКӨНІС-ЖИДЕК КИЁМАСЫНЫҢ РЕОЛОГИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ

Мақалада өсімдік тектес шикізаттың және оның негізінде дайындалған «киёма» десерт өнімінің физика-химиялық көрсеткіштері, антиоксиданттық және реологиялық қасиеттерін зерттеу нәтижелері ұсынылған. Зерттеу нысандары ретінде шафран, куркума және зімбір, сондай-ақ әртүрлі рецептуралық шешімдер қолдану арқылы әзірленген киёма үлгілері пайдаланылды.

Осы зерттеудің мақсаты – антиоксиданттық белсенділігі жоғары өсімдік ингредиенттерін функционалдық жеміс-көкөніс-жидек негізіндегі «киёма» десертін әзірлеуде қолданудың мақсаттылығын негіздеу, сондай-ақ олардың дайын өнімнің құрылымдық-механикалық сипаттамаларына әсерін бағалау болып табылады. Жемістер, көкөністер және дәмдік-хош иісті өсімдік шикізаты негізінде табиғи десерттер ассортиментін дамыту дәстүрлі қантты тәтті өнімдерді тағамдық және биологиялық құндылығы жоғары өнімдермен алмастыру арқылы рационалды тамақтануды қалыптастыруға мүмкіндік береді.

Эксперименттік зерттеулер барысында өсімдік шикізатының ылғалдылығы, күлділігі, pH көрсеткіші, биологиялық белсенді қосылыстардың мөлшері және антиоксиданттық белсенділігі анықталды. Зерттеу нәтижелері шафранның кроцин мен флавоноидтардың жоғары мөлшеріне байланысты ең жоғары антиоксиданттық белсенділікке ие екенін, ал куркума мен зімбірдің куркумин есебінен композицияны толықтыратынын көрсетті.

Киёманың реологиялық қасиеттері тұтқырлық, айналу моменті, ағымдылық, жабысқақтық және адгезия көрсеткіштері бойынша бағаланды. Зерттелген үлгілердің псевдопластикалық ағу сипатына ие тұтқыр-пластикалық жүйелерге жататыны анықталды, сондай-ақ рецептуралық айырмашылықтардың олардың құрылымдық-механикалық қасиеттерінің қалыптасуына елеулі әсер ететіні көрсетілді. Алынған нәтижелер әзірленген «киёма» десертінің функционалдық тағам өнімі ретінде перспективалы екенін растайды.

Түйін сөздер: *киёма, шафран, куркума, зімбір, антиоксиданттық белсенділік, реологиялық қасиеттер, өсімдік тектес шикізат.*

A.U. Shingisov[1], O.T. Azizov[2], E.U. Mailybayeva[1], U.U. Tastemirova[1]*, Zh.S. Nabiyeva [3]

M.Auezov South Kazakhstan University, 160000, Shymkent, Republic of Kazakhstan,Tauke Khan avenue, 5
[2] Tashkent Chemical-Technological Institute,
32 Navoi Ave., Tashkent, 100011, Republic of Uzbekistan
[3] Almaty Technological University, 100 Tole Bi St., Almaty, 050012, Republic of Kazakhstan
*e-mail: ib_tu@mail.ru

STUDY OF ANTIOXIDANT RAW MATERIALS AND RHEOLOGICAL PROPERTIES OF FRUIT–VEGETABLE –BERRY KIYOMA

The article presents the results of a study on the physicochemical parameters, antioxidant activity, and rheological properties of plant-based raw materials and the dessert product “kiyoma” developed on their basis. Saffron, turmeric, and ginger were used as the objects of the study, as well as kiyoma samples formulated using various recipe solutions.

The aim of this study is to substantiate the feasibility of using plant ingredients with high antioxidant activity in the development of a functional fruit-vegetable-berry dessert “kiyoma”, as well as to assess their influence on the structural and mechanical characteristics of the finished product. The expansion of the range of natural desserts based on fruits, vegetables, and spice-aromatic raw materials contributes to the formation of rational nutrition by replacing traditional sugar-containing confectionery products with foods of increased nutritional and biological value.

During the experimental studies, moisture content, ash content, pH value, content of biologically active compounds, and antioxidant activity of the plant raw materials were determined. It was established that saffron is characterized by the highest antioxidant activity due to its high content of crocin and flavonoids, while turmeric and ginger complement the composition through the presence of curcumin.

The rheological properties of kiyoma were evaluated by viscosity, torque, flowability, stickiness, and adhesion parameters. It was shown that the studied samples belong to viscoplastic systems with a pseudoplastic flow behavior, and that formulation differences significantly affect the formation of their structural and mechanical properties. The obtained results confirm the prospects of the developed «kiyoma» dessert as a functional food product.

Key words: *kiyoma, saffron, turmeric, ginger, antioxidant activity, rheological properties, plant raw materials.*

Сведения об авторах

Азрет Утебаевич Шингисов – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология и безопасность продовольственных продуктов», Южно-Казахстанский университет имени М. Ауэзова, Республика Казахстан; e-mail: azret_utebai@mail.ru. ORCID:http://orcid.org/0000-0002-0726-8232.

Олимжон Тохирович Азизов – кандидат химических наук, доцент кафедры «Технология функциональных продуктов», Ташкентский химико-технологический институт, Республика Узбекистан; e-mail: olimjonazizov@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4483-423X.

Эльвира Урисбаевна Майлыбаева – старший преподаватель кафедры «Технология и безопасность продовольственных продуктов», Южно-Казахстанский университет имени М. Ауэзова, Республика Казахстан; e-mail: emu1204@mail.ru. ORCID:https://orcid.org/0000-0002-6322-4496.

Укилим Убайдуллаевна Тастемирова* – phD, доцент кафедры «Технология и безопасность продовольственных продуктов», Южно-Казахстанский университет имени М. Ауэзова, Республика Казахстан; e-mail: ib_tu@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7078-0044.

Жанар Серикболовна Набиева – PhD, Алматинский технологический университет, кафедра «Пищевая биотехнология», Научно-исследовательский институт пищевой безопасности, Казахстан; e-mail: atu_nabiyeva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7258-746X.

Авторлар туралы мәліметтер

Азрет Утебаевич Шингисов – техника ғылымдарының докторы, «Азық-түлік өнімдерінің технологиясы және қауіпсіздігі» кафедрасының профессоры, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Қазақстан; e-mail: azret_utebai@mail.ru. ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0726-8232.

Олимжон Тохирович Азизов – «Функционалдық өнімдер технологиясы» кафедрасының доценті, техника ғылымдарының кандидаты, Ташкент химия-технологиялық институты, Ташкент, Өзбекстан; e-mail: olimjonazizov@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4483-423X.

Эльвира Урисбаевна Майлыбаева – «Азық-түлік өнімдерінің технологиясы және қауіпсіздігі» кафедрасының аға оқытушысы, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Қазақстан; e-mail: emu1204@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6322-4496.

Укилим Убайдуллаевна Тастемирова* – «Азық-түлік өнімдерінің технологиясы және қауіпсіздігі» кафедрасының доценті, phD, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Қазақстан; e-mail: ib_tu@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7078-0044.

Жанар Серикболовна Набиева – PhD, Алматы технологиялық университеті, «Тағамдық биотехнология» кафедрасы, Тамақ қауіпсіздігін ғылыми-зерттеу институты, Алматы, Қазақстан; e-mail: atu_nabiyeva@mail.ru. ORCID:https://orcid.org/0000-0001-7258-746X.

Information about authors

Azret U. Shingisov – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Technology and Food Safety, M. Auezov South Kazakhstan University, Kazakhstan; e-mail: azret_utebai@mail.ru. ORCID:http://orcid.org/0000-0002-0726-8232.

Olimjon T. Azizov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of «Functional Food Technology», Tashkent Chemical Technological Institute, Uzbekistan; e-mail: olimjonazizov@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4483-423X.

Elvira U. Mailybayeva – Senior Lecturer of the Department of Food Technology and Safety, M. Auezov South Kazakhstan University, Kazakhstan; e-mail: emu1204@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6322-4496.

Ukilim U. Tastemirova* – PhD, Associate Professor of the Department of Food Technology and Safety, M. Auezov South Kazakhstan University, Kazakhstan; e-mail: ib_tu@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7078-0044.

Zhanar S. Nabiyeva – PhD, Department of Food Biotechnology, Research Institute of Food Safety, Almaty Technological University, Kazakhstan; e-mail: atu_nabiyeva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7258-746X.

Поступила в редакцию 30.03.2026
Принята к публикации 26.05.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-53

МРНТИ: 65.63.33

Д.Н. Туйгунов*, Ю.А. Синявский[1], Ж. Қалибекқызы[2], Е.Н. Омаров[1], А.Б. Бердыгалиев[3]
[1]Казахская академия питания,
050008, Республика Казахстан, г. Алматы, улица Клочкова, 66
[2]Шакарим университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинка 20 А
[3]Казахский национальный медицинский университет им. С.Д. Асфендиярова,
050012, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Толе би, 94
*e-mail: dilyar117@gmail.com

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ СУБЛИМИРОВАННОГО КОБЫЛЬЕГО МОЛОКА И КИСЛОМОЛОЧНЫХ НАПИТКОВ НА ЕГО ОСНОВЕ

Аннотация: *Статья посвящена актуальной проблеме пищевой биотехнологии – совершенствованию технологии получения сублимированного кобыльего молока и разработке на его основе кисломолочного напитка с длительным сроком хранения. Актуальность исследования обусловлена высокой пищевой и биологической ценностью кобыльего молока, содержащего легкоусвояемые белковые фракции, биологически активные компоненты и полиненасыщенные жирные кислоты. Вместе с тем повышенное содержание ненасыщенных липидов обусловливает чувствительность молочного жира к окислительным процессам в период хранения, что требует применения технологических способов стабилизации продукта.*

В работе представлены технологические стадии получения сублимированного кобыльего молока, включающие предварительную пастеризацию, охлаждение, глубокое замораживание, первичную сушку в условиях вакуума и досушивание до достижения остаточной массовой доли влаги не более 5%. Проведен сравнительный анализ показателей безопасности, химического состава и пищевой ценности нативного и сублимированного кобыльего молока. Для повышения окислительной стабильности липидной фракции исследована возможность внесения природных антиоксидантов – дигидрокверцетина, α- и γ-токоферолов в технологически обоснованных концентрациях относительно массы жировой фракции молока. Полученные данные свидетельствуют, что применение дигидрокверцетина и γ-токоферола способствует замедлению накопления продуктов перекисного окисления липидов в процессе хранения сухого кобыльего молока. Наиболее выраженный стабилизирующий эффект был отмечен при использовании данных антиоксидантов в концентрации 2,0% от массы жировой фракции, что сопровождалось более низкими значениями перекисного числа по сравнению с контрольным образцом. На основе нативного и восстановленного сублимированного кобыльего молока разработан кисломолочный напиток, обогащенный витаминами А, Е и дигидрокверцетином. Использование антиоксидантного комплекса позволяет увеличить срок годности напитка до 25 суток, сохраняя его

©Д.Н. Туйгунов, Ю.А. Синявский[1], Ж. Қалибекқызы, Е.Н. Омаров, А.Б. Бердыгалиев, 2026

органолептические свойства и пищевую ценность. Результаты исследования имеют практическое значение для разработки специализированных молочных продуктов на основе традиционного отечественного сырья и могут быть использованы при создании функциональных пищевых продуктов с повышенной устойчивостью к окислительным изменениям.

Ключевые слова: *сублимационная сушка, кобылье молоко, антиоксиданты, дигидрокверцетин, токоферолы, срок хранения, перекисное число, кисломолочный напиток.*

Введение

В последние десятилетия наблюдается устойчивый рост интереса потребителей к специализированным и функциональным пищевым продуктам, обусловленный стремлением общества к укреплению здоровья, профилактике неинфекционных заболеваний и повышению качества жизни [1-3]. Особенно актуальна эта тенденция для стран с высоким уровнем урбанизации и изменившимися моделями питания, включая Республику Казахстан. Среди натуральных пищевых ингредиентов с учетом национальных и этнических особенностей питания, особый интерес представляет кобылье молоко благодаря уникальности его химического состава и выраженных функциональных свойств [4]. Широкое его использование независимо от сезона года требует разработки методов сохранности, качества и безопасности. В данном аспекте особый интерес представляет сублимационная сушка кобыльего молока, которая существенно увеличивает сроки хранения кобыльего молока и позволяет использовать его независимо от времени года, сохранив высокие органолептические и физико-химические характеристики [5, 6].

Однако, несмотря на очевидные преимущества сублимационной сушки, сохраняется проблема окислительной порчи липидной фракции молока в процессе длительного хранения [7]. Высокое содержание полиненасыщенных жирных кислот (ПНЖК), обусловливающих функциональные свойства кобыльего молока, одновременно повышает его подверженность перекисному окислению, что приводит к накоплению токсичных продуктов липопероксидации, ухудшению органолептических показателей и снижению пищевой ценности [8]. В этой связи актуальной задачей является поиск эффективных и безопасных способов ингибирования окислительных процессов в сублимированном кобыльем молоке.

Перспективным направлением решения данной проблемы представляется обогащение молока на этапе сушки природными антиоксидантами, способствующих замедлению реакций свободнорадикального окисления. Особый интерес в данном вопросе вызывают токоферолы, проявляющие как витаминную, так и антиоксидантную активность, а также дигидрокверцетин – флавоноид с выраженными общеукрепляющими, антиоксидантными и иммуностимулирующими свойствами [9-11].

Стабилизация липидной фракции сублимированного кобыльего молока с использованием комплекса природных антиоксидантов открывает перспективы для его дальнейшей переработки в продукты с длительными сроками хранения. Традиционные кисломолочные напитки на основе кобыльего молока, несмотря на высокую биологическую ценность, характеризуются ограниченными сроками хранения (5-15 суток), что существенно затрудняет их транспортировку и реализацию в отдаленных регионах.

Учитывая вышеизложенное, целью настоящего исследования явилось совершенствование технологии получения сублимированного кобыльего молока, стабилизированного комплексом природных антиоксидантов, и создание на его основе функционального кисломолочного напитка.

Материалы и методы исследований

В качестве объектов исследования использовались образцы нативного и сухого кобыльего молока, полученные методом сублимационной сушки, а также разработанный кисломолочный напиток на их основе:

В работе использовали:

– Молоко кобылье натуральное по ГОСТ 34851-2022;
– Молоко кобылье сухое по СТ РК 3270-2018;
– Сухие культуры молочнокислых бактерий по ГОСТ 33951-2016;
– Альфа-токоферол по действующей нормативной документации;
– Гамма-токоферол по действующей нормативной документации;
– Дигидрокверцетин по действующей нормативной документации.

Получение сублимированного кобыльего молока предусматривало последовательную термическую и криогенную обработку сырья, лиофилизацию и последующую оценку стабильности продукта при хранении. Нативное молоко подвергали пастеризации, после чего охлаждали и замораживали при температуре -25°С в течение 2 часов. Замороженное сырье направляли на первичную сублимационную сушку, проводимую при температуре -40°С и остаточном давлении 60 Па в течение 15 часов. Досушивание осуществляли в диапазоне температур 37-42°С с целью удаления связанной влаги до достижения остаточной массовой доли влаги не более 5%. Готовый порошок расфасовывали под вакуумом и хранили в течение 6 месяцев.

На этапе подготовки к сушке в молоко с массовой долей жира 1,92% вносили антиоксиданты (дигидрокверцетин, α- и γ-токоферол) в концентрациях 0,5; 1,0 и 2,0% от массы молочного жира, что эквивалентно внесению 9,6, 19,2 и 38,4 мг указанных соединений на 100 г нативного молока соответственно. В качестве контроля использовали образцы, высушенные без добавления антиоксидантов.

Учитывая, что избыточное внесение антиоксидантов может оказывать влияние на органолептические показатели и в отдельных условиях проявлять прооксидантный эффект, оценку эффективности проводили с учетом динамики перекисного числа и органолептических характеристик продукта.

Оценку физико-химических и органолептических свойств, а также показателей безопасности кобыльего молока в зависимости от условий пастеризации, сушки и хранения проводили с использованием стандартизированных методик:

– Отбор проб проводили по ГОСТ 26809 и ГОСТ 13928;

– Определение массовой доли влаги – по ГОСТ 29246-91;

– Определение индекса растворимости – по ГОСТ 30305.4-95;

– Определение массовой доли жира – по ГОСТ 29247-91;

– Определение массовой доли белка – по ГОСТ 23327-98;

– Определение кислотности – по ГОСТ 30305.3-95;

– Определение содержания углеводов проводили по Р 4.1.1672-2003, р. III, п. 4. Метод Р 4.1.1672-03, «Руководство по методам контроля качества и безопасности биологически активных добавок к пище»;

– Определение золы – по ГОСТ 15113.8-77;

– Определение микробиологических показателей – по ГОСТ 9225-84; ГОСТ 31659-2012, ГОСТ 31747-2012, ГОСТ 30347-2016, ГОСТ 30705-2000, ГОСТ 32031-2012;

Оценку уровня Малонового диальдегида проводили по методу [12].

Антиоксидантную активность определяли титриметрическим перманганатным методом в водных и спиртовых экстрактах молока по методу [13].

Для получения кисломолочного напитка использовали нативное, а также восстановленное кобылье молоко, полученное из сублимированного порошка. Сквашивание проводили производственной закваской производства “Genesis” (Болгария), содержащей *Lactobacillus rhamnosus* и *Lactobacillus casei* в соотношении 1:1. Закваску вносили в количестве 3,5-4,5% от объема молока. На стадии ферментации дополнительно вводили комплекс антиоксидантов, включающий витамин А, Витамин Е и дигидрокверцетин. Содержание компонентов подбирали с учетом технологической совместимости, органолептической приемлемости и требований безопасности пищевой продукции.

Ферментацию проводили до достижения нормативных значений кислотности и формирования характерных органолептических свойств кисломолочного продукта. После завершения ферментации напиток охлаждали и хранили при температуре 4±2°С. Контроль качества осуществляли в динамике хранения до 25 суток.

Исследование органолептических характеристик сублимированного кобыльего молока и кисломолочного напитка на его основе проводили на базе лаборатории пищевых биотехнологий и специализированных продуктов питания в ТОО «Казахская академия питания». Работу выполняли в соответствии с требованиями международного стандарта ГОСТ ISO 6658-2016 «Органолептический анализ. Методология. Общее руководство». Оценку осуществляли в специально оборудованном помещении, исключающем присутствие посторонних запахов. Определяли следующие показатели разработанных продуктов:

внешний вид, цвет, вкус и запах. Методы анализа включали визуальную оценку исследуемых образцов, а также дегустационный анализ

Исследования проводили в трехкратной повторности. Результаты представлены в виде средней арифметической величины и стандартной ошибки среднего (M±m). Статистическую обработку данных осуществляли с использованием методов вариационной статистики. Различия между контрольными и опытными образцами считали статистически значимыми при $p<0,05$.

Результаты и обсуждение научных результатов

Сублимационная сушка является одним из наиболее щадящих методов обезвоживания пищевого сырья, поскольку удаление влаги происходит из замороженного состояния в условиях пониженного давления. Это особенно важно для кобыльего молока, содержащего термолабильные биоактивные компоненты и ненасыщенные липиды.

Предварительное замораживание молока обеспечивало подготовку продукта к стадии первичной сушки. Последующая лиофилизация позволяла удалить основную часть влаги без интенсивного теплового воздействия на продукт. Вторичное досушивание при температуре полок 37-42°С способствовало снижению остаточной влажности до нормативного уровня.

В таблице 1 представлены данные по химическому составу и показателям безопасности сублимированного кобыльего молока, полученного с использованием вакуумной упаковки, в сравнении с соответствующими показателями нативного молока до сушки.

Как видно из данных, представленных в таблице 1, при сублимационной сушке кобыльего молока максимально сохраняются его не только органолептические, но и физико-химические показатели. Установлено, что сублимационная сушка позволяет получить сухое кобылье молоко с остаточной массовой долей влаги 2,64%, что соответствует требованиям нормативной документации. Индекс растворимости составил 0,1 $см^3$ сырого осадка, что указывает на хорошую способность порошка к восстановлению.

После сушки массовая доля белка составила 17,52 г на 100 г продукта, жира – 15,4 г, углеводов – 63,05 г. Полученные значения соответствуют требованиям, предъявляемым к сухому кобыльему молоку согласно действующей нормативной документации. Показатели безопасности находились в допустимых пределах: антибиотики, патогенные микроорганизмы, пестициды и радионуклиды не обнаружены. Следует подчеркнуть, что в настоящем исследовании оценивались основные показатели пищевой ценности и безопасности. Для расширенной характеристики биологической ценности продукта в дальнейших исследованиях целесообразно дополнительно определить аминокислотный профиль, витаминный состав и содержание отдельных макро- и микроэлементов.

Скорость окислительных процессов оказывает прямое влияние на продолжительность хранения пищевых продуктов. Данный процесс заключается в окислении липидов под воздействием атмосферного кислорода, сопровождающегося образованием короткоцепочечных альдегидов и кислот, а также гидролитическим расщеплением, катализируемым микроорганизмами. Следствием этих реакций является существенное ухудшение органолептических и физико-химических характеристик продукта, что приводит к сокращению сроков его годности.

Для ингибирования окислительной порчи жиров (стабилизации) применяются антиоксиданты (антиокислители). В качестве ингибиторов окислительных процессов использовали α-токоферол, γ-токоферол и дигидрокверцетин, вносимые на этапе сублимационной сушки в различных концентрациях.

Среди токоферолов, оказывающих положительное влияние как на пищевые продукты, так и на организм человека, наибольшей антиоксидантной активностью обладает δ-токоферол, тогда как α-токоферол проявляют максимальную витаминную, но минимальную антиокислительную активность. При повышенных концентрациях жира, антиоксидантный эффект может сменяться прооксидантным действием. Кроме того, имеются данные о потенциальных негативных последствиях для здоровья при избыточном поступлении этих соединений [14].

Таблица 1 – Химический состав, показатели безопасности нативного и сухого кобыльего молока полученного с помощью метода сублимационной сушки

Наименование показателей, единицы измерений	Допустимые нормы по НД	До сушки	После сушки
Антибиотики, мг/кг:			
Левомицетин	Не допускается	Не обнаружено	Не обнаружено
Пенициллин	Не допускается	Не обнаружено	Не обнаружено
Стрептомицин	Не допускается	Не обнаружено	Не обнаружено
Тетрациклиновая гр.	Не допускается	Не обнаружено	Не обнаружено
Токсические элементы, мг/кг, не более:			
Свинец	0,02	0,001	0,015
Кадмий	0,02	0,0001	0,001
Мышьяк	0,05	Не обнаружено	Не обнаружено
Ртуть	0,005	Не обнаружено	Не обнаружено
Меламин, мг/кг	Менее 1	Не обнаружено	Не обнаружено
Микробиологические показатели:			
КМАФАнМ,КОЕ/см^3,не более	2,5х10^4	<1,5х10^2	<1,5х10^2
БГКП (колиформы) в 1,0 см3	Не допускается	Не обнаружено	Не обнаружено
S.aureus, в 1,0 см^3	Не допускается	Не обнаружено	Не обнаружено
Патогенные м-мы, в т.ч. сальмонеллы, в 25 г	Не допускается	Не обнаружено	Не обнаружено
Плесени,КОЕ/см^3, не более	100	<10	<10
Дрожжи,КОЕ/см^3, не более	50	<10	<10
Пестициды, мг/кг, не более:			
ГХЦН (α-, β-, γ-изомеры)	1,25	Не обнаружено	Не обнаружено
ДДТ и его метаболиты	1,0	Не обнаружено	Не обнаружено
Радионуклиды, Бк/кг, не более:			
Цезий-137	500	Не обнаружено	Не обнаружено
Стронций-90	200	Не обнаружено	Не обнаружено
Органолептические показатели:			
Внешний вид	ГОСТ Р 52973-2008 ГОСТ Р 52975-2008	Белая жидкость, с голубоватым оттенком	Однородный порошок
Консистенция	ГОСТ Р 52973-2008 ГОСТ Р 52975-2008	Однородная жидкость, без осадка и хлопьев	Мелкий сухой порошок
Вкус и запах	Свойственные кобыльему молоку	Свойственные свежему кобыльему молоку	Свойственные сухому кобыльему молоку
Физико-химические показатели:			
Индекс растворимости, см3сырого осадка (для сухого молока)	Не более 0,2	-	0,1
Кислотность, Т°	Не более 6Т°	4,2	4,5
Массовая доля белка %	для сухого не менее 16,0 для свежего не менее 2,0	2,19±0,23	17,52±1,70
Массовая доля жира %	Не менее 1,0	1,92±0,19	15,4±1,5
Массовая доля углеводов %	Для сухого не менее 58,0 Для свежего не менее 5,8	7,88±0,69	63,05±6,30
Массовая доля влаги %	Не более 5	Не нормируется	2,64±0,10
Энергетическая ценность, ккал/кДж/100гр продукта	Не нормируется	57/236	461/1929

Мощным природным антиоксидантом также является дигидрокверцетин (таксифолин), который относится к биофлавоноидам с Р-витаминной активностью. Дигидрокверцетин обладает антиоксидантным, радиопротекторным, мембранопротекторным, гиполипидемическим, противовоспалительным, гепатопротекторным, иммуномодулирующим действием.

Дигидрокверцетин, α-токоферол и γ-токоферол при использовании в регламентированных дозировках являются безопасными. Данные пищевые добавки согласно ТР ТС 029/2012 разрешены к использованию в пищевых продуктах.

Величина перекисного числа характеризует сохранность и сроки хранения продуктов и, безусловно, зависит от условий его хранения. Результаты исследования выявили неоднозначное ингибирование окислительных процессов в молочном жире. Контрольные образцы сухого молока (без антиокислителей) по истечении 6 месяцев хранения достигли предельных значений окислительной порчи, соответствующих окончанию срока годности. Наибольшая антиоксидантная активность наблюдалась при применении дигидрокверцетина и γ-токоферола в концентрации 2% от массы жира. При этом образец с добавлением α-токоферола продемонстрировал менее выраженный ингибирующий эффект (табл. 2).

Таблица 2 – Изменение перекисного числа в молочном жире в зависимости от используемого антиоксиданта и сроков хранения (M±m)

Антиоксидант / концентрация по отношению к жиру	Перекисное число, мкмоль активного кислорода/кг жира		
	Исходный продукт	После 3 месяцев хранения (мкмоль активного кислорода/кг жира)	После 6 месяцев хранения
Дигидрокверцетин			
0,5% (9,6 мг)	1,8±0,05	2,3±0,08	2,7±0,04
1,0% (19,2 мг)	1,7±0,09	2,2±0,04	2,5±0,09
2,0% (38,4 мг)	1,8±0,06	2,0±0,05	2,3±0,06
γ-токоферол			
0,5% (9,6 мг)	1,8±0,05	2,4±0,09	2,8±0,08
1,0% (19,2 мг)	1,8±0,04	2,2±0,07	2,6±0,06
2,0% (38,4 мг)	1,7±0,08	2,1±0,07	2,4±0,02
α-токоферол			
0,5% (9,6 мг)	1,7±0,07	2,6±0,07	3,2±0,04
1,0% (19,2 мг)	1,8±0,06	2,4±0,09	3,0±0,05
2,0% (38,4 мг)	1,8±0,05	2,3±0,06	2,9±0,08
Сухое молоко без консервантов	1,7±0,1	2,8±0,08	3,9±0,04

В контрольном образце без антиоксидантов перекисное число за 6 месяцев хранения увеличилось с 1,7 до 3,9 мкмоль активного кислорода/кг жира. Это свидетельствует об интенсивном накоплении первичных продуктов окисления липидов.

Внесение антиоксидантов замедляло рост перекисного числа. Наиболее выраженный эффект был отмечен при использовании дигидрокверцетина в концентрации 2,0% от массы жировой фракции (38,4 мг на 100 г нативного молока): после 6 месяцев хранения перекисное число составило 2,3 мкмоль активного кислорода/кг жира. Близкие результаты были получены при внесении γ-токоферола в концентрации 2,0%, при котором показатель составил 2,4 мкмоль активного кислорода/кг жира. Менее выраженный эффект наблюдался при использовании α-токоферола. Даже при концентрации 2,0% от массы жира перекисное число через 6 месяцев хранения составляло 2,9 мкмоль активного кислорода/кг жира, что выше аналогичных значений для дигидрокверцетина и γ-токоферола.

Наряду с оценкой перекисного числа в молочном жире было проведено определение уровня малонового диальдегида (МДА) – ключевого промежуточного продукта перекисного окисления липидов (ПОЛ) – в сухом молоке в зависимости от концентрации вносимых антиоксидантов и сроков хранения. Уровень МДА в сухом молоке по мере хранения увеличивался, но, тем не менее, антиоксидант оказывал выраженное защитное антиокислительное действие и способствовал достоверному снижению уровня МДА. Наименьшее содержание МДА как после трех, так и после шести месяцев хранения наблюдалось при введении дигидрокверцетина в концентрации 2,0%.

Проведенный сравнительный анализ показал, что в контрольном образце (без антиоксидантов) уровень МДА за 6 месяцев хранения возрастал более чем в 11 раз, достигая предельно допустимых значений. Это свидетельствует о том, что срок хранения сухого молока без применения антиокислителей не превышает шести месяцев. В то же время, при добавлении дигидрокверцетина (38,4 мг на 100 г нативного молока) концентрация МДА оказалась в 3 раза ниже, чем в исходном образце, что подтверждает выраженный антиоксидантный эффект данного соединения.

При использовании α- и γ-токоферола также были получены данные свидетельствующие о замедлении накопления продуктов ПОЛ в сухом кобыльем молоке. Так, при их добавлении в концентрации 2,0% от массы жира, содержание малонового диальдегида через 6 месяцев хранения оказалось в 3 и 4 раза ниже (соответственно для α- и γ-форм), чем в контрольном образце. Применение дигидрокверцетина способствовало снижению общей антиоксидантной активности при хранении. Наилучшие показатели при этом наблюдаются при использовании дигидрокверцетина в количестве 2,0% от массы жира.

На основе нативного и восстановленного сублимированного кобыльего молока был разработан кисломолочный напиток, обогащённый витамином А, витамином Е и дигидрокверцетином. Использование антиоксидантного комплекса было направлено на повышение устойчивости липидной фракции к окислительным изменениям в процессе хранения, а также повышения биологической ценности продукта.

Состав напитка включает следующие ингредиенты:

Закваска производственная с видовым составом *Lactobacillus rhamnosus u Lactobacillus casei* (в соотношении 1:1) – 3,5-4,5 г

Витамин А – 1,0-1,1 мг

Витамин Е – 8-8,5 мг

Дигидрокверцетин – 20,0-22,0 мг

Молоко кобылье сырое – остальное до 100%.

Для приготовления напитка можно использовать как нативное, так и восстановленное после сублимационной сушки кобылье молоко, которое предварительно в процессе высушивания обогащается вышеуказанным антиоксидантным комплексом.

По своему составу напиток на основе нативного и сухого кобыльего молока характеризуется сбалансированным содержанием биоактивных соединений, вследствие присутствия в нем таких важных антиоксидантов, как Витамин А – 1,0 мг; Витамин Е – 8 мг; Дигидрокверцетин – 20,0 мг.

Для оценки влияния вносимого антиоксидантного комплекса (витамин А, витамин Е, дигидрокверцетин) на потребительские характеристики продукта, а также для подтверждения стабильности органолептических свойств в процессе хранения, был проведен органолептический анализ образцов кисломолочного напитка. Оценку осуществляли в динамике на 1-е, 15-е и 25-е сутки хранения при температуре 4±2°С по пятибалльной шкале, руководствуясь ГОСТ ISO 6658-2016. Результаты исследования органолептических свойств приведены в Таблице 3.

Таблица 3 – Органолептическая оценка кисломолочного напитка на основе кобыльего молока в процессе хранения (M±m)

Наименование показателей	Характеристика образца	Сроки хранения, сутки		
		1-е сутки	15-е сутки	25-е сутки
Внешний вид	Однородная жидкость, без осадка	4,9±0,1	4,8±0,1	4,6±0,2
Консистенция	В меру вязкая, однородная	4,8±0,1	4,7±0,2	4,5±0,2
Цвет	Молочно-белый, равномерный	4,9±0,1	4,8±0,1	4,7±0,1
Вкус	Чистый, кисломолочный, без горечи	4,8±0,1	4,7±0,2	4,5±0,2
Запах	Характерный кисломолочный, без посторонних запахов	4,8±0,1	4,7±0,2	4,6±0,2
Итоговая оценка		4,8±0,1	4,7±0,1	4,6±0,1

Образцы оценивались по 5-балльной шкале: 5 – отличное качество, 4 – хорошее, 3 – удовлетворительное, 2 – неудовлетворительное, 1 – неприемлемое.

Введение природных антиоксидантов не оказало негативного влияния на органолептические свойства готового напитка. На 1-е сутки хранения итоговая средняя оценка составила 4,8 балла, что соответствует категории высоким органолептическим характеристикам продукта. В течение всего заявленного срока годности (25 суток) продукт сохранял высокие потребительские характеристики: итоговая оценка на 25-е сутки составила 4,6 балла. Не отмечались появления посторонних привкусов, горечи, осадка или расслоения, что подтверждает как совместимость антиоксидантного комплекса с молочной основой, так и его эффективность в предотвращении окислительной порчи, неизбежно отражающейся на сенсорных свойствах продукта. Таким образом, разработанный напиток по органолептическим характеристикам полностью соответствует предъявляемым к кисломолочным продуктам требованиям и сохраняет свои свойства на протяжении всего заявленного срока хранения.

Наряду с оценкой окислительной стабильности липидной фракции, принципиальное значение для подтверждения заявленного срока годности напитка имеет изучение его микробиологических показателей в динамике хранения при температуре 4±2°С. Результаты микробиологического анализа разработанного кисломолочного напитка представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Микробиологические показатели кисломолочного напитка в процессе хранения (M±m)

Наименование показателей	Допустимые нормы по НД	Сроки хранения, сутки		
		1-е сутки	15-е сутки	25-е сутки
КМАФАнМ,КОЕ/см^3, не более	2,5х104	<3х102	<5х102	<5х102
БГКП (колиформы) в 1,0 см^3	Не допускается	Не обнаружено	Не обнаружено	Не обнаружено
S.aureus, в 1,0 см^3	Не допускается	Не обнаружено	Не обнаружено	Не обнаружено
Патогенные м-мы, в т.ч. сальмонеллы, в 25 г	Не допускается	Не обнаружено	Не обнаружено	Не обнаружено
Плесени,КОЕ/см^3, не более	100	<10	<10	<10
Дрожжи,КОЕ/см^3, не более	50	<10	15±3	24±5

КМАФАнМ – количество мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов; КОЕ – колониеобразующие единицы; НД – нормативная документация; БГКП – бактерии группы кишечных палочек (колиформные бактерии).

Условно-патогенные и патогенные микроорганизмы, включая БГКП, S. aureus и сальмонеллы, не были обнаружены ни в одном из исследуемых образцов. Отмечалась незначительная тенденция к росту количества дрожжей к 25-м суткам, однако их уровень оставался существенно ниже допустимых пределов, установленных в нормативной документации. Результаты исследования подтверждают возможность хранения разработанного напитка в течение 25 суток при соблюдении температурного режима 4±2°С без потери микробиологической безопасности.

При этом установлено, что по истечении 25 суток значение перекисного числа в исследуемом напитке было на 45% ниже, чем в контрольном образце, что свидетельствовало об уменьшении процессов окисления жира, по сравнению продуктами, в частности с кумысом не обогащенным данным комплексом антиоксидантов. Отмечалось также снижение накопление конечных и промежуточных продуктов перекисного окисления липидов (основания Шиффа и малоновый диальдегид) через 25 дней хранения напитка на основе кобыльего молока на 36,54 и 48,30% соответственно по сравнению с прототипом.

Заключение

В ходе проведенного исследования научно обоснованы и экспериментально подтверждены оптимальные параметры сублимационной сушки кобыльего молока, обеспечивающие максимальную сохранность его нативных свойств, пищевой и биологической ценности. Доказана эффективность применения комплекса природных антиоксидантов (дигидрокверцетин, α- и γ-токоферол) для ингибирования окислительной порчи липидной фракции, что позволяет существенно повысить стабильность сублимированного продукта в процессе хранения. Также на основе разработанной технологии

создан новый кисломолочный напиток, обогащенный витаминами А, Е и дигидрокверцетином. Продукт характеризуется продолжительным сроком годности (до 25 суток), высокими органолептическими показателями и антиоксидантной активностью.

Список литературы

1. Consumer trends and attitudes to functional foods / C. Karelakis et al //Journal of International Food & Agribusiness Marketing. – 2020. – Vol. 32, Issue. 3. – P. 266-294. https://doi.org/10.1080/08974438.2019.1599760.
2. Consumer acceptance toward functional foods: A scoping review / M.T. Baker et al // International journal of environmental research and public health. – 2022. – Vol. 19, Issue. 3. – P. 1217. https://doi.org/10.3390/ijerph19031217.
3. Белякова Н.И. Достижения и перспективы разработки продуктов функционального и специализированного назначения / Н.И. Белякова, В.В. Шилов, А.А. Журня // Пищевая промышленность: наука и технологии. – 2021. – Т. 14, № 2. – С. 30-36. https://doi.org/10.47612/2073-4794-2021-14-2(52)-30-36.
4. Создание нового специализированного продукта на основе кобыльего молока для профилактики обменно-алиментарных нарушений / Ш.Н. Толекова и др. // Вестник КазНУ. Серия биологическая. – 2019. – Т. 80, № 3. – С. 58-67. https://doi.org/10.26577/eb-2019-3-b6.
5. Cais-Sokolińska D. Foaming and other functional properties of freeze-dried mare's milk / D. Cais-Sokolińska, J. Teichert, J. Gawałek // Foods. – 2023. – Vol. 12, Issue 11. – P. 2274. https://doi.org/10.3390/foods12112274.
6. Modeling of freeze-drying of mare's milk taking into account cracks / T. Bekibayev et al // International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2025. – Vol. 167. – P. 109375. https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.109375.
7. Freezing as a solution to preserve the quality of dairy products: The case of milk, curds and cheese/ M. Alinovi et al // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. – 2021. – Vol. 61, Issue 20. – P. 3340-3360. https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1798348.
8. Blanco-Doval A. Nutritional quality and socio-ecological benefits of mare milk produced under Grazing Management / A. Blanco-Doval, L.J.R. Barron, N. Aldai // Foods. – 2024. – Vol. 13, Issue 9. – P. 1412. https://doi.org/10.3390/foods13091412.
9. Tocopherols as antioxidants in lipid-based systems: The combination of chemical and physicochemical interactions determines their efficiency / N. Barouh et al // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. – 2022. – Vol. 21, Issue 1. – P. 642-688. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12867.
10. Review article vitamin E: a multi-functional ingredient for health enhancement and food preservation / C.C. Chu et al // Journal of Food Measurement and Characterization. – 2023. – Vol. 17, Issue 6. – P. 6144-6156. https://doi.org/10.1007/s11694-023-02042-z.
11. Antioxidant and antimicrobial properties of dihydroquercetin esters / H.J. An et al // Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences. – 2022. – Vol. 58. – P. e190800. https://doi.org/10.1590/s2175-97902022e190800.
12. Гаврилов В.Б. Спектрофотометрическое определение содержания гидроперекисей липидов в плазме крови / В.Б. Гаврилов, М.И. Мишкорудная // Лабораторное дело. – 1983. – № 3. – С.33-36.
13. Соколова М.А. Воздействие пастеризации на антиокислительную активность молока / М.А. Соколова, В.Е. Высокогорский, О.Н. Лазарева // Теория и практика современной аграрной науки. – 2020. – С. 458-460.
14. EFSA Panel on Food Additives and Nutrient Sources Added to Food (ANS). Scientific Opinion on the re-evaluation of tocopherol-rich extract (E 306), α-tocopherol (E 307), γ-tocopherol (E 308) and δ-tocopherol (E 309) as food additives // EFSA Journal. – 2015. – Vol. 13, Issue 9. – P. 4247.

References

1. Consumer trends and attitudes to functional foods / C. Karelakis et al //Journal of International Food & Agribusiness Marketing. – 2020. – Vol. 32, Issue. 3. – P. 266-294. https://doi.org/10.1080/08974438.2019.1599760. (In English).
2. Consumer acceptance toward functional foods: A scoping review / M.T. Baker et al // International journal of environmental research and public health. – 2022. – Vol. 19, Issue. 3. – P. 1217. https://doi.org/10.3390/ijerph19031217. (In English).

3. Belyakova N.I. Dostizheniya i perspektivy razrabotki produktov funktsional'nogo i spetsializirovannogo naznacheniya / N.I. Belyakova, V.V. Shilov, A.A. Zhurnya // Pishchevaya promyshlennost': nauka i tekhnologii. – 2021. – T. 14, № 2. – S. 30-36. https://doi.org/10.47612/2073-4794-2021-14-2(52)-30-36. (In Russian).
4. Sozdanie novogo spetsializirovannogo produkta na osnove kobyl'ego moloka dlya profilaktiki obmenno-alimentarnykh narushenii / Sh.N. Tolekova i dr. // Vestnik KazNU. Seriya biologicheskaya. – 2019. – T. 80, № 3. – S. 58-67. https://doi.org/10.26577/eb-2019-3-b6. (In Russian).
5. Cais-Sokolińska D. Foaming and other functional properties of freeze-dried mare's milk / D. Cais-Sokolińska, J. Teichert, J. Gawałek // Foods. – 2023. – Vol. 12, Issue 11. – P. 2274. https://doi.org/10.3390/foods12112274. (In English).
6. Modeling of freeze-drying of mare's milk taking into account cracks / T. Bekibayev et al // International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2025. – Vol. 167. – P. 109375. https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.109375. (In English).
7. Freezing as a solution to preserve the quality of dairy products: The case of milk, curds and cheese/ M. Alinovi et al // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. – 2021. – Vol. 61, Issue 20. – P. 3340-3360. https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1798348. (In English).
8. Blanco-Doval A. Nutritional quality and socio-ecological benefits of mare milk produced under Grazing Management / A. Blanco-Doval, L.J.R. Barron, N. Aldai // Foods. – 2024. – Vol. 13, Issue 9. – P. 1412. https://doi.org/10.3390/foods13091412. (In English).
9. Tocopherols as antioxidants in lipid – based systems: The combination of chemical and physicochemical interactions determines their efficiency / N. Barouh et al // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. – 2022. – Vol. 21, Issue 1. – P. 642-688. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12867. (In English).
10. Review article vitamin E: a multi-functional ingredient for health enhancement and food preservation / C.C. Chu et al // Journal of Food Measurement and Characterization. – 2023. – Vol. 17, Issue 6. – P. 6144-6156. https://doi.org/10.1007/s11694-023-02042-z. (In English).
11. Antioxidant and antimicrobial properties of dihydroquercetin esters / H.J. An et al // Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences. – 2022. – Vol. 58. – P. e190800. https://doi.org/10.1590/s2175-97902022e190800. (In English).
12. Gavrilov V.B. Spektrofotometricheskoe opredelenie soderzhaniya gidroperekisei lipidov v plazme krovi / V.B. Gavrilov, M.I. Mishkorudnaya // Laboratornoe delo. – 1983. – № 3. – S.33-36. (In Russian).
13. Sokolova M.A. Vozdeistvie pasterizatsii na antiokislitel'nuyu aktivnost' moloka / M.A. Sokolova, V.E. Vysokogorskii, O.N. Lazareva // Teoriya i praktika sovremennoi agrarnoi nauki. – 2020. – S. 458-460. (In Russian).
14. EFSA Panel on Food Additives and Nutrient Sources Added to Food (ANS). Scientific Opinion on the re‐evaluation of tocopherol‐rich extract (E 306), α‐tocopherol (E 307), γ‐tocopherol (E 308) and δ‐tocopherol (E 309) as food additives // EFSA Journal. – 2015. – Vol. 13, Issue 9. – P. 4247. (In English).

Финансирование

Материалы подготовлены в рамках исследования, финансируемого Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (BR28713075 «Научные основы национальной политики здорового питания и продовольственной безопасности Казахстана, разработанные по результатам комплексных исследований пищевых продуктов и питания населения»).

Д.Н. Туйгунов[*], Ю.А. Синявский[1], Ж. Қалибекқызы[2], Е.Н. Омаров[1], А.Б. Бердыгалиев[3]

[1]Қазақ тағамтану академиясы,
050008, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Клочков көшесі, 66
[2]Шәкәрім университеті, 071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинка көшесі, 20 А
[3]С.Д. Асфендияров атындағы Қазақ ұлттық медицина университеті,
050012, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Төле би көшесі, 94
*e-mail: dilyar117@gmail.com

СУБЛИМАЦИЯЛЫҚ КЕПТІРІЛГЕН БИЕ СҮТІН ӨНДІРУ ТЕХНОЛОГИЯСЫН ЖЕТІЛДІРУ ЖӘНЕ ОНЫҢ НЕГІЗІНДЕ ҚЫШҚЫЛ СҮТТІ СУСЫН АЛУ

Мақала тағамдық биотехнологияның өзекті мәселесіне – сублимацияланған бие сүтін алу технологиясын жетілдіруге және оның негізінде сақтау мерзімі ұзақ ашытылған сүт сусынын әзірлеуге арналған. Зерттеудің өзектілігі жеңіл сіңірілетін ақуыз фракцияларын, биологиялық белсенді компоненттерді және полиқанықпаған май қышқылдарын қамтитын бие сүтінің жоғары тағамдық және биологиялық құндылығымен негізделеді. Сонымен бірге қанықпаған липидтердің жоғары мөлшері сақтау кезеңінде сүт майының тотығу үдерістеріне сезімталдығын арттырады, бұл өнімді тұрақтандырудың технологиялық тәсілдерін қолдануды қажет етеді.

Жұмыста сублимацияланған бие сүтін алудың технологиялық кезеңдері нақтыланды, олар алдын ала пастерлеуді, салқындатуды, терең мұздатуды, вакуум жағдайында бастапқы кептіруді және ылғалдың қалдық массалық үлесі 5%-дан аспайтын деңгейге жеткенге дейін қосымша кептіруді қамтиды. Балғын және сублимацияланған бие сүтінің қауіпсіздік көрсеткіштеріне, химиялық құрамына және тағамдық құндылығына салыстырмалы талдау жүргізілді. Липидтік фракцияның тотығуға тұрақтылығын арттыру мақсатында табиғи антиоксиданттарды — дигидрокверцетинді, α- және γ-токоферолдарды сүттің май фракциясының массасына қатысты технологиялық тұрғыдан негізделген концентрацияларда енгізу мүмкіндігі зерттелді. Алынған деректер дигидрокверцетин мен γ-токоферолды қолдану құрғақ бие сүтін сақтау барысында липидтердің асқын тотығу өнімдерінің жинақталуын баяулатуға ықпал ететінін көрсетеді. Ең айқын тұрақтандырушы әсер аталған антиоксиданттарды май фракциясы массасының 2,0% концентрациясында қолданған кезде байқалды, бұл бақылау үлгісімен салыстырғанда асқын тотығу санының төмен мәндерімен сипатталды. Балғын және қалпына келтірілген сублимацияланған бие сүтінің негізінде А және Е дәрумендерімен, сондай-ақ дигидрокверцетинмен байытылған ашытылған сүт сусыны әзірленді. Антиоксиданттық кешенді қолдану сусынның органолептикалық қасиеттері мен тағамдық құндылығын сақтай отырып, оның сақтау мерзімін 25 тәулікке дейін ұзартуға мүмкіндік береді. Зерттеу нәтижелері дәстүрлі отандық шикізат негізінде арнайы сүт өнімдерін әзірлеу үшін практикалық маңызға ие және тотығу өзгерістеріне тұрақтылығы жоғары функционалдық тағам өнімдерін жасау кезінде пайдаланылуы мүмкін.

Түйін сөздер: *сублимациялық кептіру, бие сүті, антиоксиданттар, дигидрокверцетин, токоферолдар, сақтау мерзімі, асқын тотығу саны, ашытылған сүт сусыны.*

D.N. Tuigunov[*], Yu.A. Sinyavskiy[1], Zh. Kalibekkyzy[2], E.N. Omarov[1], A.B. Berdygaliyev[3]

[1]Kazakh Academy of Nutrition,
050008, Republic of Kazakhstan, Almaty, 66, Klochkov Street
[2]Shakarim University,
071412, Republic of Kazakhstan, Semey, 20A, Glinka Street
[3]Asfendiyarov Kazakh National Medical University,
050012, Republic of Kazakhstan, Almaty, 94, Tole Bi Street
*e-mail: dilyar117@gmail.com

IMPROVEMENT OF THE TECHNOLOGY FOR THE PRODUCTION OF FREEZE-DRIED MARE'S MILK AND FERMENTED MILK DRINKS BASED ON IT

The article addresses a topical issue in food biotechnology, namely the improvement of freeze-dried mare's milk production technology and the development of a fermented milk beverage with an extended shelf life based on this product. The relevance of the study is determined by the high nutritional and biological value of mare's milk, which contains highly digestible protein fractions, biologically active compounds, and polyunsaturated fatty acids. At the same time, the elevated content of unsaturated lipids makes milk fat susceptible to oxidative processes during storage, thereby necessitating the application of technological approaches aimed at product stabilization.

The study specifies the technological stages of freeze-dried mare's milk production, including preliminary pasteurization, cooling, deep freezing, primary drying under vacuum, and final drying until a residual moisture content of no more than 5% is achieved. A comparative analysis of safety parameters, chemical composition, and nutritional value of native and freeze-dried mare's milk was performed. To enhance the oxidative stability of the lipid fraction, the incorporation of natural antioxidants – dihydroquercetin, α-tocopherol, and γ-tocopherol – was investigated at technologically justified concentrations relative to the mass of the milk fat fraction. The results indicate that the use of dihydroquercetin and γ-tocopherol slows the accumulation of lipid peroxidation products during storage of dried mare's milk. The most pronounced stabilizing effect was observed when these antioxidants were applied at a concentration of 2.0% of the fat fraction mass, as evidenced by lower peroxide values compared with the control sample. Based on native and reconstituted freeze-dried mare's milk, a fermented milk beverage enriched with vitamins A and E and dihydroquercetin was developed. The use of the antioxidant complex makes it possible to extend the beverage shelf life to 25 days while preserving its organoleptic properties and nutritional value. The findings are of

practical significance for the development of specialized dairy products based on traditional domestic raw materials and may be used in the creation of functional food products with enhanced resistance to oxidative deterioration.

Key words: *freeze-drying, mare's milk, antioxidants, dihydroquercetin, tocopherols, shelf life, peroxide value, fermented milk beverage.*

Сведения об авторах

Диляр Нурдунович Туйгунов* – магистр биотехнологии, научный сотрудник ТОО «Казахская академия питания», г. Алматы, Республика Казахстан; e-mail: dilyar117@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5548-6675.

Юрий Александрович Синявский – доктор биологических наук, профессор, Вице-президент ТОО «Казахская академия питания», г. Алматы, Республика Казахстан; e-mail: sinyavskiy@list.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8006-9942.

Жанар Қалибекқызы – кандидат биологических наук, ассоциированный профессор, Шәкәрім университет; e-mail: zhanar_moldabaeva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6384-0646.

Ержан Нурланович Омаров – магистр экономики, научный сотрудник ТОО «Казахская академия питания», г. Алматы, Республика Казахстан; e-mail: yerzhan_omarov@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-3817-2489.

Айдар Болатович Бердыгалиев – кандидат медицинских наук, доцент кафедры общественного здравоохранения, Казахский национальный медицинский университет, г. Алматы, Республика Казахстан; e-mail: berdaidar@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3163-5135.

Авторлар туралы мәліметтер

Диляр Нурдунович Туйгунов* – биотехнология магистрі, «Қазақ тағамтану академиясы» ЖШС ғылыми қызметкері, Алматы қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: dilyar117@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5548-6675.

Юрий Александрович Синявский – биология ғылымдарының докторы, профессор, «Қазақ тағамтану академиясы» ЖШС Вице-президенті, Алматы қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: sinyavskiy@list.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8006-9942.

Жанар Қалибекқызы – биология ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, Шәкәрім университеті; e-mail: zhanar_moldabaeva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6384-0646.

Ержан Нурланович Омаров – экономика магистрі, «Қазақ тағамтану академиясы» ЖШС ғылыми қызметкері, Алматы қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: yerzhan_omarov@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-3817-2489.

Айдар Болатович Бердыгалиев – медицина ғылымдарының кандидаты, «Қазақ ұлттық медицина университеті» КеАҚ қоғамдық денсаулық сақтау кафедрасының доценті, Алматы қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: berdaidar@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3163-5135.

Information about the authors

Dilyar Tuigunov* – Master of Biotechnology, Researcher at the Kazakh Academy of Nutrition LLP, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: dilyar117@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5548-6675.

Yuriy Sinyavskiy – Doctor of Biological Sciences, Professor, Vice-President of the Kazakh Academy of Nutrition LLP, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: sinyavskiy@list.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8006-9942.

Zhanar Kalibekkyzy – Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Shakarim University; e-mail: zhanar_moldabaeva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6384-0646.

Yerzhan Omarov – Master of Economics, Researcher at the Kazakh Academy of Nutrition LLP, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: yerzhan_omarov@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-3817-2489.

Aidar Berdygaliev – Candidate of Medical Sciences, Associate Professor of the Department of Public Health at the Kazakh National Medical University NJSC, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: berdaidar@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3163-5135.

Поступила в редакцию 30.03.2026
Поступила после доработки 21.05.2026
Принята к публикации 28.05.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-54

МРНТИ: 55.22.19

Zh.B. Sagdoldina[1,2], A.B. Leonidova[2*], A.Zh. Zhassulan[2,3], A.B. Shynarbek[3], Zh. Turar[4]
[1]Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University,
070000, Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk, 30 Gvardeiskoi Divizii Street, 34
[2]Shakarim University,
071412, Kazakhstan, Semey, Fizkulturnaya Street, 4
[3]Engineering Center, Shakarim University,
071412, Kazakhstan, Semey, Glinka Street, 20 A
[4]Sakarya University,
54050, Turkey. Sakarya, Akademiyolu Street, 5-20
*e-mail: aiymleonidova1994@gmail.com

MODERN APPROACHES TO THE MODIFICATION OF COATINGS PRODUCED BY ELECTRIC ARC SPRAYING (REVIEW)

Abstract: *In this review article, modern approaches to improving the performance characteristics of coatings produced by electric arc spraying are analyzed. Particular attention is given to studies in the field of directed energy deposition using an electric arc (DED-Arc), including the selection of spraying parameters, substrate surface preparation, and the application of new types of wires and composite materials. Advances in feedstock design for corrosion-resistant, heat-resistant, and wear-resistant protection are reviewed, including Zn, Al-Mg, and Zn-Al-Mg systems, Al-Cu cored wires for antifouling applications, stainless steel and NiCrMoAl alloys, cermets, and WC-reinforced high-entropy alloys. The review also summarizes recent results on adhesion enhancement through laser surface texturing and on adapting electric arc spraying technology for non-conductive substrates. Particular attention is given to the relationships between processing parameters, coating microstructure, and functional properties. The analysis highlights key factors controlling coating performance and identifies current research challenges in arc-sprayed coating systems. The summarized results demonstrate that electric arc spraying is a flexible and cost-effective technology for producing functional coatings with tailored properties for a wide range of industrial applications.*

Key words: *electric arc spraying; DED-Arc; coatings; adhesion; corrosion protection.*

Introduction

Under conditions of intensive service of structural materials, the demand for effective methods to enhance their durability and resistance to external influences is steadily increasing. One of the promising approaches in this field is the application of coatings produced by thermal spraying techniques, among which electric arc spraying (EAS) occupies a special position due to its technological simplicity, cost efficiency, and high productivity. However, despite the widespread use of EAS in various industrial sectors, a number of limitations remain related to the formation of coatings with optimal structural and performance characteristics.

In this regard, research efforts aimed at improving the electric arc spraying process have intensified, particularly through the introduction of new approaches to feedstock material selection and the modification of spraying parameters. The enhancement of coating performance properties is generally achieved through an integrated approach that includes the use of modern additive technologies, alternative wire materials, and methods for controlling coating structure at different stages of its formation.

This review is devoted to the analysis of existing and promising approaches to improving the performance characteristics of coatings produced by electric arc spraying. The presented analysis

©Zh.B. Sagdoldina, A.B. Leonidova, A.Zh. Zhassulan, A.B. Shynarbek, Zh. Turar, 2026

makes it possible to systematize the accumulated knowledge in this field and to identify relevant directions for further research.

DED-Arc Technology. Among the modern directions aimed at improving the quality and functionality of coatings produced by electric arc spraying, particular attention is given to directed energy deposition using an electric arc (DED-Arc). This approach combines the principles of additive manufacturing and welding processes, enabling the formation of volumetric structures and coatings with controlled geometry and properties.

Thus, in the study by R. M. Kindermann et al. [1], a comprehensive investigation was carried out to examine the influence of heat input and process interruptions on the microstructure and mechanical properties of the Inconel 718 alloy (Figure 1) fabricated by directed energy deposition using an electric arc (DED-Arc). Special attention in this study was paid to the effect of interruptions during the deposition process. The authors compared two deposition modes – Cold Metal Transfer (CMT) and pulsed Gas Metal Arc Welding (GMAW-P) – and demonstrated that controlling heat input and interpass temperature allows targeted control of the phase composition by regulating the amount of strengthening phases (γ′ and γ″), which is critically important for heat-resistant nickel-based alloys. The CMT mode provides lower heat input, which in turn reduces the risk of crack and pore formation and promotes increased ductility of the deposited samples. In contrast, the GMAW-P mode, despite increasing material strength due to more intensive formation of strengthening phases (γ′ and γ″), was accompanied by a higher tendency toward defect formation during solidification. It was shown that even short-term arc interruptions lead to the formation of thermally unstable zones with localized stresses, which significantly reduce tensile strength and promote material failure.

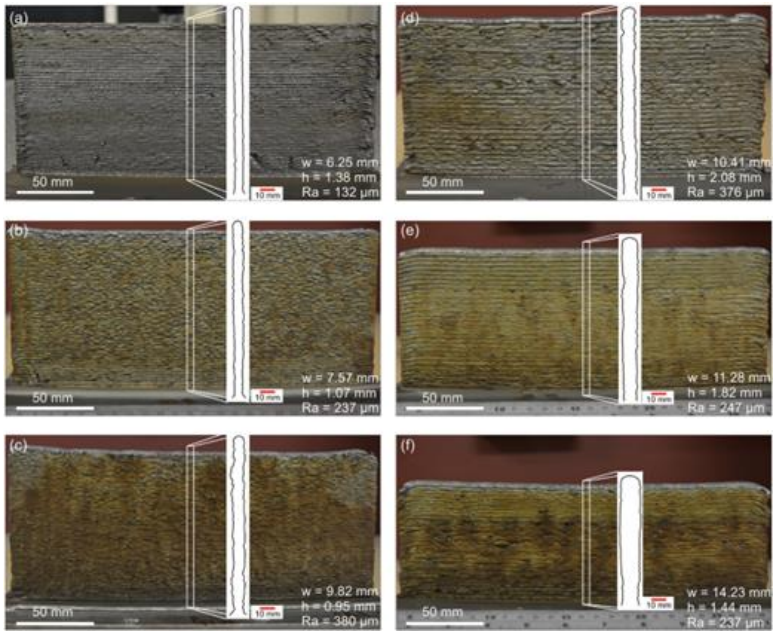


Figure 1 – DED-Arc IN718 specimens produced in this study: (a) CMT-1.0-80°C, (b) CMT-1.0-30 s, (c) GMAW-P-1.0-30 s, (d) CMT-0.4-80°C, (e) CMT-0.4-30 s, and (f) GMAW-P-0.4-30 s. Cross-sectional profiles: w = total wall width, h = layer height, Ra = average surface roughness [1]

A number of studies have reported a significant influence of DED-Arc process parameters on the morphology and quality of the formed surface. In particular, Hensel J. et al [2] demonstrated that the surface of components produced by DED-Arc exhibits both random and deterministic topographical features. The layer height and the number of deposition passes are formed in a predictable manner, whereas the occurrence of surface protrusions and excess deposited material is of a stochastic nature. Surface topography can be described using W-profiles, while height parameters can be obtained based on laser scanning (Figure 2). The authors emphasize that measurement parameters, such as cutoff wavelength, evaluation length, and profile length, have a significant effect on the calculated surface characteristics and must be explicitly reported in data analysis.

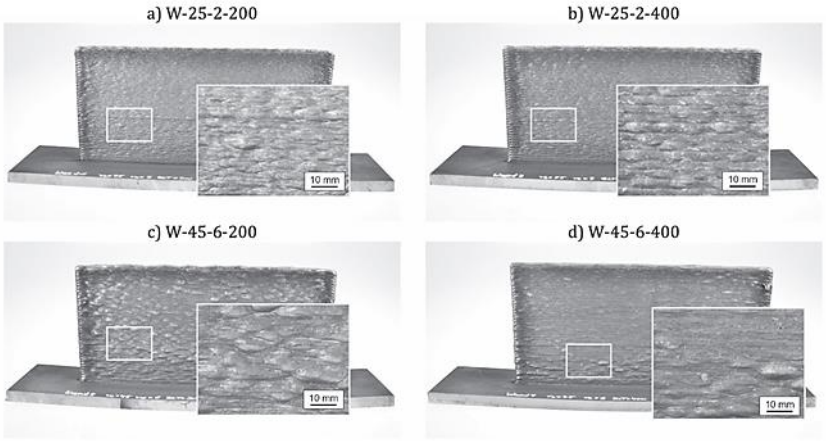


Figure 2 – Photographs of DED-Arc specimens produced under different welding parameters and interpass temperatures (a) and (d) [2]

The relevance of the DED-Arc process is confirmed not only by its high technological flexibility but also by the possibility of fine control over the structure and properties of the deposited material through the selection of deposition strategies. In the study by de Brito Neto F. M. et al. [3], the influence of different deposition strategies on the microstructure and mechanical property anisotropy of 316L stainless steel components fabricated by DED-Arc was investigated. The authors note that DED-Arc is characterized by a high deposition rate, cost efficiency, and low material waste, making it particularly effective for the fabrication of large-scale metal components with complex geometries. At the same time, a lack of fundamental studies related to the formation of thick-walled structures is highlighted. Within the framework of this study, it was shown that the choice of deposition strategy has a significant effect on crystallographic texture, phase morphology, and residual stress distribution. X-ray diffraction (XRD) analysis revealed the development of an austenitic texture along the (111) and (200) planes, which was confirmed by electron backscatter diffraction (EBSD). Scanning electron microscopy (SEM) examination made it possible to identify differences in ferritic phase morphology in various deposition zones. Mechanical testing demonstrated pronounced anisotropy, with specimens deposited using a 45° overlap angle exhibiting superior mechanical properties. At the same time, uniform microhardness was observed along the deposition direction, indicating the stability of the applied strategy. In addition, residual stress measurements revealed predominantly compressive stresses away from the substrate, which may potentially enhance the resistance of components to crack initiation.

It is worth noting that an important direction in the development of DED-Arc technologies is their adaptation for the additive fabrication of small-scale metallic structures. This approach is particularly relevant for heat exchange and thermal management systems. In the study by Palumbo J. and Chandra S. [4], a cost-effective method for producing millimeter-scale metallic structures using arc spraying through a polymer mask was proposed. The method enables rapid and energy-efficient deposition of aluminum and copper structures with complex geometries and can be used for the fabrication of mini-channel heat exchangers. The authors demonstrated that photopolymer masks produced by 3D printing allow controlled formation of the geometry of the deposited structures. The deposited layers contain a dense central region, porous sidewalls, and satellite particles between neighboring elements. It was also shown that material parameters, such as density, melting temperature, and surface tension, as well as the distance between the mask and the substrate, significantly affect the morphology and porosity of the deposited elements. This approach opens up prospects for the development of low-cost functional components for heat and mass transfer applications. The arc thermal spraying process through a polymer mask and the resulting metallic structures are illustrated in Figure 3 [4]. The figure shows the main elements of the spraying setup, representative deposited structures, and SEM cross-sections of aluminum and copper deposits.

A comparative analysis of the reviewed studies [1-4] shows that the microstructure and performance of components produced by arc-based additive technologies strongly depend on heat input, deposition strategy, and process stability.

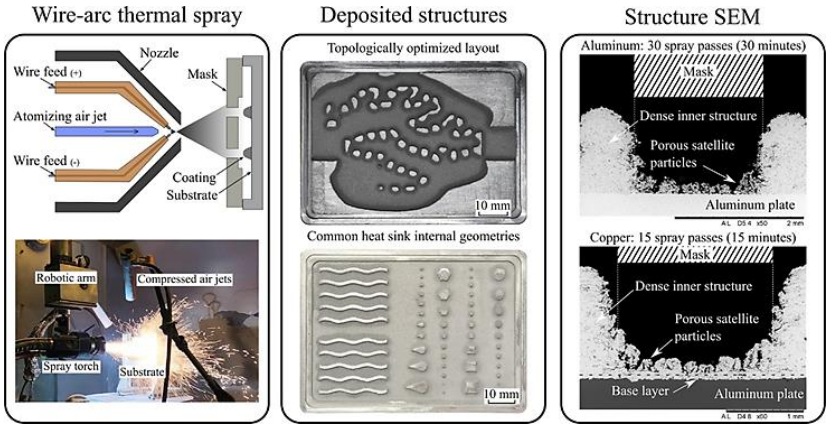


Figure 3 – Arc thermal spraying through a polymer mask: schematic of the spraying setup, representative fabricated structures, and cross-sectional SEM images of aluminum and copper deposits [4]

Low heat input modes such as CMT reduce the probability of pore and crack formation but may limit the precipitation of strengthening phases. In contrast, higher heat input processes such as pulsed GMAW promote the formation of strengthening phases but increase the risk of solidification defects. Deposition strategy and interpass temperature also influence crystallographic texture, residual stresses, and mechanical anisotropy of the deposited material. These findings indicate that careful optimization of thermal conditions and deposition parameters is essential to balance mechanical strength, structural stability, and defect control in arc-based deposition processes. Such optimization is particularly important for the fabrication of large components with complex geometries or specific functional requirements.

Overall, the reviewed studies [1-4] demonstrate the high flexibility of DED-Arc technology. It enables the fabrication of both large-scale components with controlled texture and residual stresses and miniature metallic structures produced by directed deposition through templates. However, several limitations remain, including residual stress accumulation, anisotropy of mechanical properties, and limited control of defect formation during arc-based deposition.

Surface Preparation. Along with the improvement of coating deposition methods, substrate surface preparation plays an important role in significantly enhancing coating adhesion. In the study by Gustke K. et al. [5], emphasis was placed on improving the adhesion of arc-sprayed coatings through preliminary laser surface structuring of carbon fiber–reinforced polymer (CFRP) substrates. The investigation covered nine different surface pretreatment methods, including grid-like laser structures, selective matrix removal, and laser roughening. The best results were achieved by forming grid structures with groove orientations of ±45° relative to the fiber direction, which resulted in an increase in adhesion strength of up to 186% in shear and up to 199% in tensile pull-off tests compared with grit blasting (Figure 4). It was shown that the groove depth and spacing directly affect the failure mode and the bond strength between the coating and the substrate. The importance of undercuts formed during laser processing for achieving effective mechanical interlocking was also emphasized.

Further interest in substrate surface preparation is provided by the study reported by dos Santos L. P. et al. [6], which describes a method for depositing 309L stainless steel onto polymer substrates (PP, Nylon 66, and PVC) using electric arc thermal spraying. To enhance adhesion, a bonding layer based on epoxy resin with the addition of microsilica and metallic particles was developed, resulting in favorable surface topography and improved wettability of the substrate by molten metal particles. The best results were obtained for PVC substrates, which exhibit a smaller mismatch in coefficients of thermal expansion relative to the bonding layer. The resulting coatings demonstrated not only good adhesion but also high electrical conductivity, making this approach promising for the functional metallization of plastics in various engineering applications.

In the study by Kromer R. et al. [7], an investigation was carried out aimed at improving the adhesion strength of coatings deposited by cold spraying, electric arc spraying, and atmospheric plasma spraying through preliminary substrate surface treatment using a pulsed nanosecond laser.

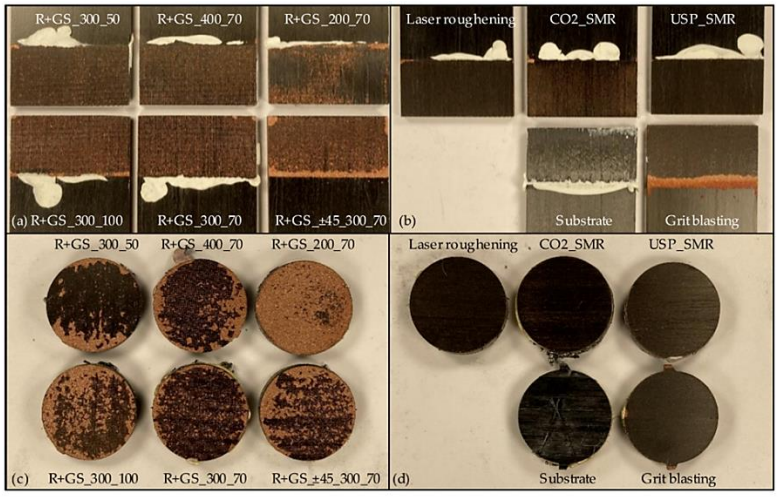


Figure 4 – Fracture surfaces of CFRP substrates with copper coatings deposited by arc spraying, illustrating different failure modes after shear tensile tests (a, b) and pull-off tests (c, d) [5]

The application of laser surface texturing makes it possible to form anchoring zones on the substrate surface, thereby promoting mechanical interlocking of the coating and improving the quality of the interfacial contact. Among the key advantages of this method are the absence of abrasive particle inclusions, minimal thermal impact on the substrate, and high processing repeatability. Fractographic analysis showed that the morphology of the laser-generated surface pattern has a significant influence on crack propagation and failure behavior; a mixed-mode fracture mechanism was identified, explaining the observed increase in adhesion strength. It is particularly important to note that laser surface treatment of lightweight alloys, such as aluminum and magnesium alloys, demonstrates high efficiency for subsequent coating deposition without the use of a bonding layer. Thus, laser surface texturing represents a promising surface preparation technology for electric arc spraying, contributing to a significant enhancement of coating-substrate adhesion strength.

A comparison of the reviewed surface preparation methods [5-7] indicates that mechanical interlocking remains the dominant mechanism governing coating adhesion in electric arc spraying. Laser surface structuring demonstrates particularly high efficiency due to the formation of controlled anchoring geometries and undercut features, which significantly increase bonding strength compared with conventional grit blasting. At the same time, the use of intermediate bonding layers, as demonstrated for polymer substrates, provides an alternative strategy for improving adhesion when direct metallurgical bonding is not possible. These approaches highlight the importance of tailoring the substrate surface morphology to achieve reliable coating-substrate interfaces.

As a result, optimization of substrate surface preparation contributes significantly to an increase in the adhesion strength of coatings produced by electric arc spraying. However, an equally important factor determining the functional characteristics of the resulting coatings is their chemical and phase composition. Depending on service conditions and the properties of the substrate material, various types of feedstock wires are used in electric arc spraying, ranging from pure metals to complex alloys and composite materials.

Zn-Al-Mg Coatings. One of the most common types of coatings produced by electric arc spraying is zinc coatings, which are widely used for sacrificial corrosion protection of aluminum and steel alloys. In the study by Yuan Z. et al. [8], it was demonstrated that the deposited zinc layer acts as a sacrificial anode, providing corrosion protection for an Al-Mn alloy. Analyses performed using GDOES, SEM, TEM, and potentiodynamic polarization confirmed that the presence of a Zn coating reduces the corrosion potential of the surface, limits the development of pitting corrosion, and promotes the formation of a corrosion potential gradient across the material thickness due to zinc diffusion into the substrate (Figure 5). This results in more stable corrosion behavior of the aluminum alloy in aggressive environments. SWAAT testing conducted over a period of 20 days revealed the absence of deep corrosion damage, indicating the effectiveness of the coating. Accordingly, the use of zinc wire in electric arc spraying represents a promising approach for the development of anticorrosion coatings for lightweight alloys.

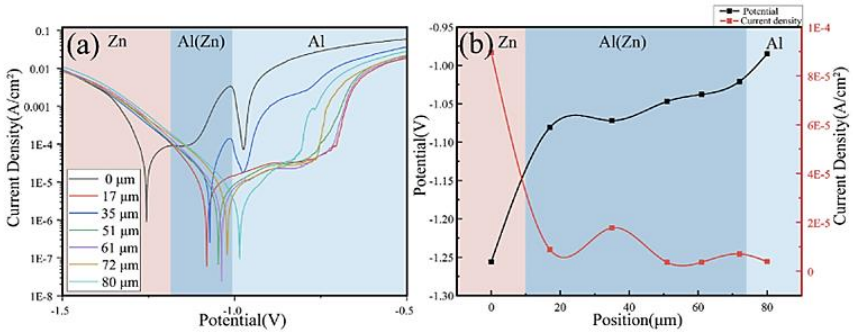


Figure 5 – Results of electrochemical corrosion testing: (a) dynamic polarization curves of the aluminum alloy sheet at different depths; (b) variation trends of corrosion potential and corrosion current density [8]

In the study by Wang S. et al. [9], the corrosion behavior of coatings deposited by electric arc spraying from aluminum-based wires alloyed with magnesium and zinc was investigated. Three compositions were examined: Al – 5%Mg (AM), AMZ50 (a mixture of Al – 5%Mg and Al – 50%Zn wires), and AMZ100 (a mixture of Al – 5%Mg and 99.9% Zn). Corrosion tests conducted in a 3.5 wt.% NaCl solution using polarization curves and electrochemical impedance spectroscopy (EIS) revealed differences in corrosion behavior between alloy and pseudo-alloy coatings (Figure 6). The AM coating exhibited the highest corrosion resistance due to the formation of a stable protective Al_2O_3 film. The addition of zinc in the AMZ50 and AMZ100 pseudo-alloys led to the formation of phase and colony segregations with different electronegativities, which promoted the formation of multiple micro-galvanic cells (MGCs) and localized dissolution. In the AMZ50 coating, corrosion predominantly developed within AZ colonies, where simultaneous dissolution of the Zn-rich (η) phase and the Al-rich (α) phase occurred, accompanied by the formation of layered double hydroxides (LDHs) exhibiting a sealing effect.

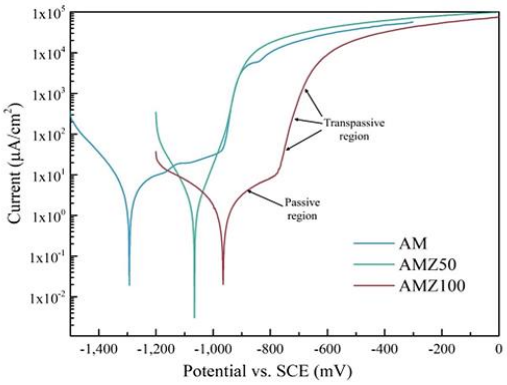


Figure 6 – Potentiodynamic polarization curves of three pseudo-alloy coatings in a 3.5 wt.% NaCl solution at room temperature

In the AMZ100 coating, Zn splats acted as anodes, while Al splats functioned as cathodes. The main corrosion products – simonkolleite and zinc carbonates – provided partial protection; however, the large anodic zinc coverage hindered repassivation, resulting in slow and continuous dissolution. Nevertheless, the presence of AM splats in the pseudo-alloy coatings effectively blocked ionic and electronic conductivity, thereby reducing the corrosion rate. In addition, these coatings provided more pronounced sacrificial protection, particularly under coating damage conditions, making them promising for practical applications.

To date, a substantial number of studies [10-20] have been reported in the scientific literature focusing on zinc-, aluminum-, and magnesium-based wires used in electric arc spraying processes. These studies address both the characteristics of the feedstock wires and the morphology, phase composition, adhesion, and corrosion resistance of the resulting coatings. Particular attention is given to the development of new pseudo-alloy compositions and their influence on the mechanisms of protective layer formation, sacrificial protection, and resistance to aggressive environments. Specifically, zinc-based (Zn), zinc–aluminum (Zn–Al), aluminum–magnesium (Al–Mg), and complex

Zn–Al–Mg alloy wires exhibit different types of galvanic activity, leading to the formation of multiple galvanic cells, which significantly affects their anticorrosion performance. The summarized results of these studies provide a basis for the further selection of optimal wire compositions in accordance with specific service requirements.

Overall, the reviewed studies show that the corrosion behavior of arc-sprayed coatings is governed by electrochemical interactions between coating phases. Al–Mg coatings generally exhibit high corrosion resistance due to the formation of stable oxide films. In contrast, Zn-containing coatings provide protection mainly through sacrificial corrosion mechanisms. Pseudo-alloy systems containing both Al and Zn may form micro-galvanic couples. These couples can accelerate localized corrosion under certain conditions. Therefore, the corrosion performance depends not only on the alloy composition but also on phase distribution and electrochemical interactions. The representative properties of coatings produced by electric arc spraying reported in the literature are summarized in Table 1.

Table 1 – Properties of coatings produced by electric arc spraying

№	Material	Main functional property	Key results
1	Zn wire	Sacrificial corrosion protection	Zn coating acts as sacrificial anode protecting Al alloy [8]
2	Al-5Mg wire	Corrosion resistance	Stable Al_2O_3 film formation improves corrosion resistance [9]
3	Al-5Mg + Zn wires	Sacrificial protection	Formation of micro-galvanic cells affecting corrosion behaviour [9]
4	Metcoloy II alloy wire	Oxidation resistance	Protective Cr and Al oxide layers at high temperature [21]
5	NiCrMoAl alloy wire	Corrosion resistance	Oxide shell formation around splats after heat treatment [25]
6	(AlCoCrFeNiSi)+WC cored wire	Hardness and adhesion	Increase in microhardness (up to ~529 HV0.1) and adhesion strength (up to ~40 MPa) due to WC addition [27]
7	FeCrMoNbB + FeCMnSi wires	Corrosion resistance	Improved corrosion resistance due to passive compounds [37]

As shown in Table 1, the functional performance of arc-sprayed coatings strongly depends on the chemical composition of the material and the resulting phase structure of the coating.

Alloy and Composite Coatings. Continuing the review of various types of wires and coatings produced by electric arc spraying, particular interest is associated with a study focused on the application of Metcoloy II coatings. In the work by Pérez-Muñoz D. et al. [21], a Metcoloy II coating deposited by electric arc thermal spraying onto ASTM A53 Grade B steel demonstrated high effectiveness under cyclic oxidation conditions at elevated temperatures (500°C and 700°C). The test results showed that the Metcoloy II coating significantly improves oxidation resistance compared with the uncoated material due to the formation of protective chromium and aluminum oxide layers. These oxides contribute to the retardation of oxidation processes and limit mass gain, thereby preserving surface integrity. Good adhesion of the coating to the substrate ensured stable protection throughout the entire testing cycle (Figure 7). At the same time, it was observed that at a temperature of 700°C the coating undergoes structural changes, including increased porosity, reduced thickness, and the formation of microcracks, which leads to a degradation of protective performance and more intensive oxidation of the substrate. Nevertheless, even at high temperatures, Metcoloy II retains partial effectiveness, while at 500 °C it exhibits particularly stable performance. This makes it a promising candidate for applications under high-temperature service conditions, such as thermal power generation and boiler equipment. Further studies are recommended to improve the coating structure and enhance its thermal stability under more severe operating regimes.

Another important direction in electric arc spraying involves copper-based coatings, as well as coatings alloyed with iron, chromium, stainless steel, and composite systems, including those containing nickel, cobalt, molybdenum, and carbon steels. Such coatings are widely applied in various fields, including the metallization of non-conductive materials, where a combination of high mechanical strength, corrosion resistance, and specific functional properties is required. The use of diverse feedstock wires and alloy compositions enables the development of coatings with optimized characteristics for anticorrosion protection, enhanced wear resistance, and antifouling performance.

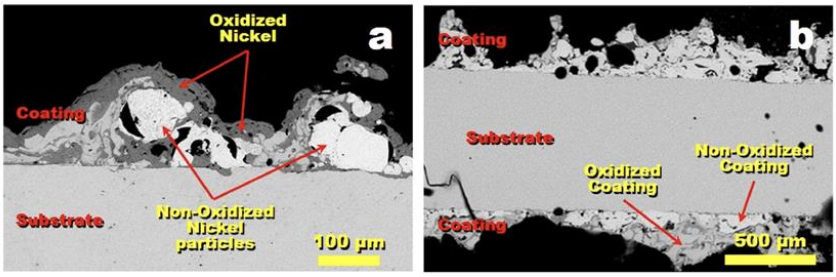


Figure 7 – (a) Cross section of the coated specimen after 100 oxidation cycles at 700°C; (b) cross section of the coated specimen after 500 oxidation cycles at 700°C [21]

In the study by Nigam S., Mahapatra S. S., and Patel S. K. [22], devoted to the deposition of a copper layer onto ABS using electric arc spraying, characteristic lamellar coating structures with high density and strength were identified. Microhardness and surface roughness were thoroughly analyzed, providing insight into the quality and nature of the formed coating. Optimization of process parameters using the Taguchi method and analysis of variance (ANOVA) made it possible to identify the most significant factors affecting coating density and to determine optimal conditions for producing a highly dense and mechanically robust layer. Consequently, copper coatings deposited onto ABS by electric arc spraying demonstrate promising performance, combining good adhesion and mechanical durability, which expands the potential applications of this metallization technique for non-conductive materials.

In the study by Fang L. et al. [23], innovative aluminum-copper coatings fabricated by arc spraying using in-house developed Al-Cu cored wires were presented, providing combined anticorrosion and antifouling protection. Microstructural analysis revealed a uniform distribution of copper particles within the coating and partial interaction between copper and the aluminum matrix, leading to the formation of the Al_2Cu intermetallic compound. This interaction contributes to the retention of copper within the coating and prevents its rapid leaching in aqueous environments. Electrochemical tests conducted in artificial seawater demonstrated that the presence of copper does not deteriorate the corrosion resistance of aluminum coatings. The antifouling performance of the coatings was confirmed by settlement and colonization tests involving E. coli, Bacillus sp., and typical marine algae. These properties are attributed to the continuous release of copper ions exhibiting antimicrobial activity. The results of the study indicate the promising potential of arc spraying with cored wires for the development of multifunctional protective coatings intended for marine applications.

In the study by Dubovoy O.M. et al. [24], coatings were produced using titanium carbide in a free (unbound) form as a strengthening phase. It was established that spraying process parameters have a direct influence on the content of the strengthening phase in the coating and, consequently, on its physical and mechanical properties. Optimal processing regimes ensure high adhesion strength between the coating and the substrate and enhance performance characteristics, which is particularly important for applications in the mining industry and other industrial sectors associated with severe equipment wear.

Using the example of the study by Srichen A., Linjee S., and Banjongprasert C. [25], the influence of heat treatment on the microstructure and corrosion properties of NiCrMoAl alloy coatings was investigated. Coatings produced by electric arc spraying were subjected to heat treatment at temperatures of 500-700°C for durations of 10 and 30 days. It was established that prolonged exposure to elevated temperatures promotes the formation of a large amount of oxides and internal stresses, which leads to crack formation at the boundaries of molten particles and a deterioration in corrosion resistance. In contrast, heat treatment at 500°C contributed to maintaining a high concentration of alloying elements (Cr, Mo, and Si) within the splats and to the formation of a dense oxide shell around the particles, thereby providing enhanced corrosion protection (Figure 8). Thus, the appropriate selection of heat treatment parameters plays a key role in ensuring the anticorrosion performance of NiCrMoAl-based coatings.

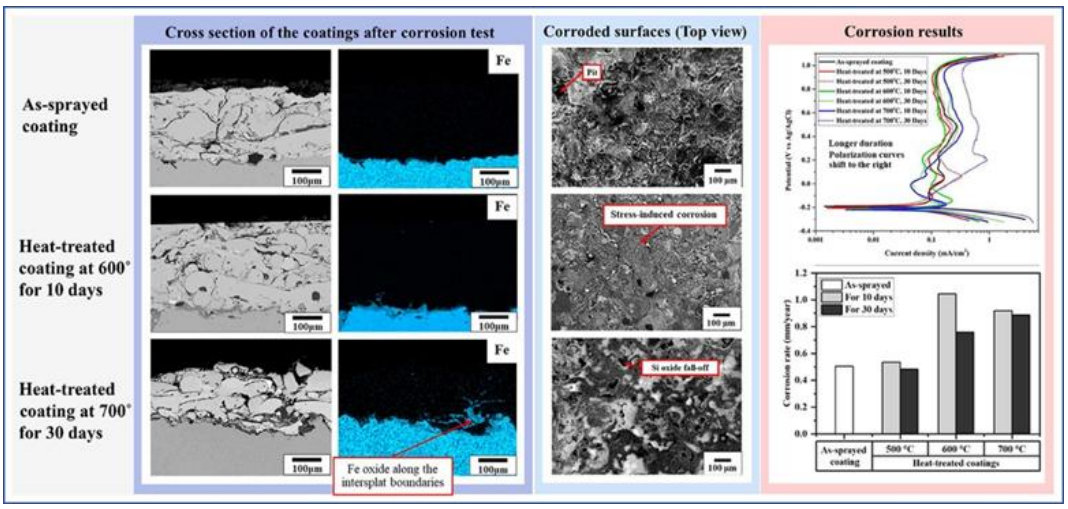


Figure 8 – Microstructure, surface morphology, and corrosion properties of NiCrMoAl coatings produced by electric arc spraying before and after heat treatment [25]

In another study by Pan P. et al. [26], the behavior of an amorphous Fe–Cr–Mo–based coating produced by electric arc spraying was investigated under conditions simulating a biomass combustion environment at temperatures of 500°C and 600°C. Such coatings are considered potentially cost-effective solutions to the problem of chlorine-induced hot corrosion in biomass-fired boilers. The study showed that Fe and Cr elements within the coating underwent chlorination followed by evaporation, which led to the formation of Cr-depleted zones and a deterioration of protective properties. At the same time, Mo-containing regions exhibited high resistance to the action of aggressive gaseous species; however, with increasing temperature, they became more susceptible to electrochemical attack. In addition, the presence of cracks and micropores in the coating structure facilitated the penetration of aggressive species into the material, thereby reducing the overall corrosion resistance. The obtained results highlight the importance of optimizing coating microstructure and density to enhance the protection efficiency of metallic components under high-temperature service conditions.

Another promising direction involves coatings based on high-entropy alloys (HEAs) reinforced with carbides. In the study by Bello Z. A. et al. [27], coatings with the composition $(AlCoCrFeNiSi)_{100-x}(WC)_x$(x = 0,20 and 40 wt.%) were produced by high-velocity arc spraying onto a Q235 steel substrate. The introduction of WC particles had a significant effect on the phase composition and properties of the coatings. In the absence of WC, the body-centered cubic (BCC) phase was dominant; however, with the addition of 20 and 40 wt.% WC, the microstructure contained a combination of BCC and face-centered cubic (FCC) phases, as well as carbide phases such as W_3C and Cr_7C_3. The presence of WC contributed to a reduction in the average crystallite size from 14.75 nm to 10.34 nm, an increase in microhardness (up to 529.9 HV0.1), and an improvement in adhesion strength to the substrate (up to 40.23 MPa). Mechanical testing demonstrated that the dominant failure mechanism depends on the content of the reinforcing phase: in the absence of WC, interfacial failure (adhesion failure) prevailed, whereas at high carbide contents, cohesive (glue-type) failure was dominant, indicating improved coating cohesion. According to SEM and XPS analyses, the enhanced corrosion resistance is associated with the formation of passive oxide layers that slow down anodic dissolution processes.

Based on the analysis of the reviewed studies, the main process parameters influencing the microstructure and performance of arc-sprayed coatings can be systematized. A summary of the key processing parameters and their influence on coating structure and properties reported in the literature is presented in Table 2.

As shown in Table 2, heat input, deposition strategy, and feedstock composition are among the most influential parameters controlling the microstructure and functional performance of arc-sprayed coatings.

Table 2 – Influence of processing parameters on structure and properties of arc-sprayed coatings

№	Process parameter	Effect on microstructure	Effect on properties
1	Heat input	Phase precipitation and grain growth	Strength variation and crack formation [1]
2	Deposition strategy	Crystallographic texture development	Mechanical anisotropy of deposited structures [3]
3	Interpass temperature	Residual stress distribution and microstructure evolution	Crack resistance and mechanical stability [1,3]
4	Surface preparation	Formation of anchoring structures and roughness	Adhesion strength improvement [5,7]
5	Feedstock composition	Phase distribution and oxide formation	Corrosion and wear resistance [8,9]
6	Carbide reinforcement (WC)	Grain refinement and carbide phase formation	Increased hardness and adhesion strength [27]

Multicomponent Coatings. Analysis of the literature data and experimental results indicates that coatings produced by electric arc spraying exhibit a wide range of performance characteristics, which depend primarily on the chemical composition of the feedstock materials [28-36]. Copper-based coatings are widely applied due to their high thermal conductivity, electrical conductivity, and antimicrobial properties. To enhance their thermal and corrosion resistance, modifying additions such as iron, chromium, and nickel are commonly used. Coatings alloyed with iron and chromium demonstrate high corrosion resistance in aggressive environments, including acidic media and chloride-rich conditions. The incorporation of stainless steel into coating compositions provides resistance to oxidation and wear under elevated temperatures and mechanical loads. Composite coatings reinforced with particles such as carbides, nitrides, and other refractory compounds are characterized by increased hardness, adhesion strength, and wear resistance. Nickel and cobalt contribute to improved mechanical and anticorrosion properties, particularly under high-temperature service conditions and in aggressive environments. Molybdenum enhances resistance to chloride- and sulfate-induced corrosion and improves the structure of protective oxide layers. Carbon steels, used either as substrates or as components of coating systems, provide a favorable combination of mechanical strength and cost effectiveness. Thus, rational selection of coating composition and spraying regimes makes it possible to produce coatings with tailored functional properties for applications across various industrial sectors, ranging from mechanical engineering to power generation and the chemical industry.

Considering the diversity of components used for coating formation, it becomes evident that a key role is played not only by the selection of individual materials but also by the possibility of their combination. The development of multicomponent systems and the adaptation of feedstock material compositions make it possible to significantly expand the functional characteristics of coatings. In this context, one of the currently relevant directions in electric arc spraying is the production of coatings based on mixtures of different wires that differ in chemical composition and structure.

A promising example of this approach is presented in the study by Rojas-Molano et al. [37], in which a coating formed from FeCrMoNbB (140MXC) and FeCMnSi (530AS) wires using twin-wire arc spraying (TWAS) technology was investigated. The study demonstrated that the combination of these two wires makes it possible to produce a coating with enhanced corrosion resistance due to the formation of stable passive compounds on the surface, such as Cr_2O_3, FeB, Nb_2O_5, and MoO_3 (Figure 9). The authors applied the Taguchi method (L9 orthogonal array) to optimize the spraying process parameters. It was found that the corrosion resistance of the coating is directly influenced by structural defects, including pores, microcracks, and unmelted particles formed during spraying; however, these effects can be effectively mitigated under optimized processing conditions and in the presence of appropriate alloying elements. The potential occurrence of galvanic corrosion resulting from contact between components with different electrochemical potentials was also highlighted; nevertheless, with a proper combination of material composition and spraying regimes, this effect can be significantly reduced. This study demonstrates the potential of coatings based on mixed 140MXC and 530AS wires as an effective approach to improving corrosion resistance, particularly under aggressive environmental conditions. It further emphasizes the importance of material

combination and comprehensive multilevel analysis in the development of next-generation high-protection coatings.

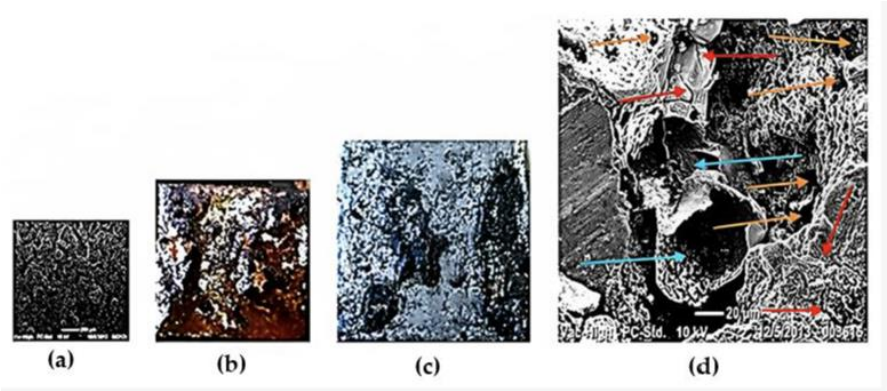


Figure 9 – Morphology of 140MXC-530AS mixed coatings after exposure to salt spray testing: (a) SEM image of the initial surface condition before testing; (b) rust formation after salt spray exposure; (c) rust removal by ultrasonic cleaning; (d) SEM image of the final surface condition after testing [37]

The reviewed studies on advanced coating systems demonstrate that the introduction of multicomponent alloys and ceramic reinforcing phases significantly expands the functional capabilities of electric arc sprayed coatings. In particular, carbide-reinforced and high-entropy alloy coatings provide improved hardness, wear resistance, and corrosion stability due to the formation of complex phase structures and refined microstructures. However, challenges related to coating porosity, oxidation during spraying, and structural heterogeneity remain important factors limiting coating performance. Further optimization of spraying parameters and feedstock design is therefore required to fully exploit the potential of these advanced coating systems.

Industrial applicability and process characteristics of electric arc spraying. Electric arc spraying is widely recognized as a productive and industrially scalable thermal spray technology. It uses wire feedstock and relatively simple equipment, which contributes to high process productivity. In general, electric arc spraying is characterized by relatively high deposition rates and is therefore suitable for large-scale protective coating applications. Several studies have investigated the influence of process parameters on coating formation. Newbery and Grant [31] demonstrated that arc voltage fluctuations strongly influence droplet formation and particle fragmentation during wire arc spraying. Variations in arc stability affect particle size distribution and coating porosity. Gedzevicius and Valiulis [32] analyzed the influence of spraying parameters such as arc current, atomizing gas pressure, and stand-off distance on coating structure and properties. Their results showed that atomizing gas pressure affects particle atomization and coating uniformity.

Rodriguez et al. [33] compared aluminum coatings produced by flame spraying and electric arc spraying and demonstrated differences in coating formation. Hussary and Heberlein [34] investigated the mechanisms of metal breakup and particle formation during arc spraying and showed that atomization conditions strongly influence droplet fragmentation. Wilden et al. [35] reported that wire composition and arc parameters affect coating microstructure and adhesion. Wagner [36] demonstrated that wire feed rate and atomizing gas pressure influence coating density and mechanical properties.

Overall, these studies show that the performance of arc-sprayed coatings strongly depends on process parameters controlling particle formation and coating microstructure. Arc stability, atomizing gas pressure, and wire feed rate can be considered the key technological parameters of the process. Their optimization is essential for balancing coating productivity and microstructural quality in practical applications.

Research gaps and future directions. Despite significant progress in the development of electric arc sprayed coatings, several challenges remain. Many studies focus on individual process parameters, whereas the combined influence of arc stability, atomizing gas pressure, and wire composition is still insufficiently understood. In addition, the relationship between particle formation mechanisms and the resulting coating microstructure requires further investigation. Future research should focus on integrated optimization of technological parameters, feedstock materials, and

coating structure. Particular attention should be given to improving coating density, reducing oxidation during spraying, and enhancing corrosion and wear resistance. Such studies will contribute to improving the reliability and industrial applicability of arc-sprayed coatings.

Conclusion

This review demonstrates that electric arc spraying remains a relevant and rapidly evolving technology for the production of functional coatings. In contrast to many existing studies that focus on individual coating systems or specific process parameters, this review provides a comparative analysis of feedstock materials, surface preparation strategies, and processing conditions, highlighting the relationships between process parameters, coating microstructure, and functional properties.Recent research shows a clear trend toward improving coating performance through the integration of advanced deposition strategies, optimized process parameters, and novel feedstock materials. Research in the field of DED-Arc, the use of mixed feedstock wires, laser substrate preparation, and additive manufacturing approaches open new opportunities for improving coating properties, including mechanical strength, corrosion resistance, and thermal stability. The reviewed studies indicate that coating performance in electric arc spraying follows a clear process–structure–property relationship. Spraying parameters influence particle formation, which in turn determines coating microstructure and functional properties. Particular importance should be given to the integrated optimization of feedstock materials, spraying regimes, and substrate surface preparation. Such approaches enable the development of coatings that meet the requirements of modern industries, including mechanical engineering, power generation, marine engineering, and aerospace applications. Future research should focus on the development of multicomponent coating systems, further investigation of high-entropy and cermet coatings, and improvement of coating–substrate interfaces in order to enhance coating reliability and durability in demanding service environments.

References

1. Wire-arc directed energy deposition of Inconel 718: Effects of heat input and build interruptions on mechanical performance / R.M. Kindermann et al // Additive Manufacturing. – 2023. – Vol. 76. – P. 103765. https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103765.
2. Surface quality parameters for structural components manufactured by DED-arc processes / J. Hensel et al // Materials & Design. – 2022. – № 215. – P. 110438.
3. Microstructure and mechanical properties of the 316L stainless steel parts fabricated by DED-Arc with different deposition strategies / F.M. de Brito Neto et al // Progress in Additive Manufacturing. – 2025. – P. 1-23.
4. Palumbo J. Additive manufacturing of complex structures and flow channels using wire-arc thermal spray / J. Palumbo, S. Chandra // Journal of Manufacturing Processes. – 2023. – T. 107. – P. 459-471.
5. Enhancement of the Adhesion of Wire Arc Sprayed Coatings on Carbon Fiber-Reinforced Plastic by Surface Laser Structuring / K. Gustke et al // Coatings. – 2021. – № 11(4). – P. 467. https://doi.org/10.3390/coatings11040467.
6. Study on the deposition of stainless steel on polymeric substrates by arc electric thermal spraying / L.P. dos Santos et al // Materials Research Express. – 2019. – T. 6, № 10. – P. 105314.
7. Laser surface texturing to enhance adhesion bond strength of spray coatings–Cold spraying, wire-arc spraying, and atmospheric plasma spraying / R. Kromer et al // Surface and Coatings Technology. – 2018. – T. 352. – P. 642-653.
8. Enhancing corrosion resistance of Al alloy sheets with potential gradient by arc-sprayed Zn coatings / Z. Yuan et al // Journal of Materials Research and Technology. – 2024. – Vol. 33. – P. 6263-6274. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.11.026.
9. Corrosion behavior and mechanism of electric arc-sprayed Al-Mg coating and Zn-Al-Mg pseudo-alloy coatings / S. Wang et al // Surface and Coatings Technology. – 2023. – № 459. – P. 129537. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129537.
10. Enhanced Strength of Al-10Ce-3Mg-5Zn Heat-Resistant Alloy by Combining Extrusion and Heat Treatment / Haiyang Zhang et al // Materials. – 2025. – № 18(8). – P. 1706. https://doi.org/10.3390/ma18081706.
11. Wire and arc additive manufacturing of high-strength Al–Zn–Mg aluminum alloy / X. Fang et al // Frontiers in Materials. – 2021. – T. 8. – P. 656429.

12. Arc assisted ultrasonic seam welding of Mg/Al joints with Zn interlayer / X. Dai et al // Materials Science and Technology. – 2016. – № 32(2). – P. 164-172. https://doi.org/10.1179/1743284715Y.0000000070.
13. SEM E.D.S. Effects of rare-earth metal on microstructure and corrosion resistance of arc-sprayed Zn-Al-Mg coating. – 2005.
14. Liu F. Characterization of Mg/Al butt joints welded by gas tungsten arc filling with Zn–29.5 Al–0.5 Ti filler metal / F. Liu, H. Wang, L. Liu // Materials characterization. – 2014. – T. 90. – P. 1-6.
15. Effect of filler metal and post-weld friction stir processing on stress corrosion cracking susceptibility of Al–Zn–Mg arc welds / T.E. Borchers et al // Science and Technology of Welding and Joining. – 2015. – T. 20, № 6. – P. 460-467.
16. Effects of Zn Addition on Microstructural Evolution, Mechanical Properties, and Corrosion Resistance of Al-6Mg Alloy Subjected to Equal Channel Angular Pressing Processing at 200°C / Y. Guo et al // Advanced Engineering Materials. – 2023. – T. 25, № 2. – P. 2200850.
17. Liquation Cracking Tendency of Novel Al-Mg-Zn Alloys with a Zn/Mg Ratio below 1.0 during Fusion Welding / D. Zhang et al // Metals. – 2020. – T. 10, № 2. – P. 222.
18. Correlations between stress corrosion cracking, grain boundary precipitates and Zn content of Al–Mg–Zn alloys / C. Meng et al //J Alloys Compd. – 2016. – № 655. – P. 178-187. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.09.159.
19. Free Characterization of Al-Mg alloy aged at low temperatures / G. Yi et al // Metall Mater Trans A. – 2017. – № 48. – P. 2040-2050. https://doi.org/10.1007/s11661-017-3992-2.
20. Sharma M.M. A microscopic study on the corrosion fatigue of ultra-fine grained and conventional Al–Mg alloy / M.M. Sharma, J.D. Tomedi, J.M. Parks // Corrosion Sci. – 2015. – № 93. – P. 180-190. https://doi.org/10.1016/j.corsci.2015.01.020.
21. Enhanced cyclic oxidation resistance of Metcoloy II coated ASTM A53 Grade B steel by electric arc thermal spray / D. Pérez-Muñoz et al // Engineering Failure Analysis. – 2024. – Vol. 155. – P. 107310.
22. Nigam S. Study of various aspects of copper coating on ABS plastic by electric arc spraying / S. Nigam, S.S. Mahapatra, S.K. Patel // Materials Today: Proceedings. – 2018. – T. 5, № 2. – P. 8446-8453
23. Cored-wire arc spray fabrication of novel aluminium-copper coatings for anti-corrosion/fouling hybrid performances / L. Fang et al // Surface and Coatings Technology. – 2019. – T. 357. – P. 794-801.
24. Electric arc spraying of cermet coatings of steel 65G-TiC system / O.M. Dubovoy et al. – 2021.
25. Srichen A. Corrosion behavior of heat-treated NiCrMoAl alloy coatings produced via arc spraying / A. Srichen, S. Linjee, C. Banjongprasert // Surfaces and Interfaces. – 2023. – T. 39. – P. 102880.
26. Hot corrosion behavior of an arc sprayed Fe-based amorphous coating in a simulated biomass firing environment / P. Pan et al // Corrosion Science. – 2022. – T. 194. – P. 109938.
27. Microstructure and properties of WC-reinforced AlCoCrFeNiSi high entropy alloy coatings prepared via high-velocity arc spraying / Z.A. Bello et al // Materials Today Communications. – 2024. – T. 40. – P. 109705.
28. Effect of Voltage on Properties of 30HGSA Steel Coatings by Supersonic Arc Metallization Method / B. Rakhadilov et al // Advances in Science and Technology Research Journal. – 2024. – № 18(5). – P. 113-124.
29. 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).
30. Influence of high-speed arc metallization wire feed rate on tribological and corrosion properties of 30HGSA steel coatings / B. Rakhadilov et al // Materials Science Poland. – 2024. – № 42(3). – P. 171-180.
31. Newbery A.P. Large arc voltage fluctuations and droplet formation in electric arc wire spraying / Newbery, A.P., Grant, P.S. // Powder metallurgy. – 2003. – № 46(3). – P. 229-235.
32. Gedzevicius I. Analysis of wire arc spraying process variables on coatings properties / I. Gedzevicius, A.V. Valiulis // Journal of Materials Processing Technology. – 2006. – № 175(1-3). – P. 206-211.

33. Comparison of aluminum coatings deposited by flame spray and by electric arc spray / R.M.P. Rodriguez et al // Surface and Coatings Technology. – 2007. – № 202(1). – P. 172-179.
34. Hussary N.A. Effect of system parameters on metal breakup and particle formation in the wire arc spray process / N.A. Hussary, J.V.R. Heberlein // Journal of thermal spray technology. – 2007. – № 16. – P. 140-152.
35. Investigation about the chrome steel wire arc spray process and the resulting coating properties / J. Wilden et al // Journal of thermal Spray technology. – 2007. – № 16. – P. 759-767.
36. Wagner N. Effect of process parameters on twin wire arc sprayed steel coatings / N. Wagner // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2021. – Т. 30, № 9. – P. 6650-6655.
37. Effect of the Surface Chemical Composition on the Corrosion Resistance in the Mixture of FeCrMoNbB (140MXC) and FeCMnSi (530AS) Coatings Produced with the Electric Wire Arc Spraying Technique: Part I / H.F. Rojas-Molano et al // Materials. – 2023. – Т. 16, № 11. – P. 4182.

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 No. BR24992870).*

Ж.Б. Сағдолдина[1,2], А.Б. Леонидова[2*], А.Ж. Жасұлан[2,3], А.Б. Шынарбек[3], Ж. Турар[4]
[1]Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан мемлекеттік университеті,
070000, Қазақстан Республикасы, Өскемен қаласы, 30-шы Гвардиялық дивизия көш., 34
[2]Шәкәрім университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Физкультурная көш., 4
[3]Инженерлік орталық, Шәкәрім университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинка көш., 20 А
[4]Сакарья Университеті,
54050, Түркия, Сакарья қ., Академиолу көш., 5-20
*e-mail: aiymleonidova1994@gmail.com

ЭЛЕКТРДОҒАЛЫҚ БҮРКУ ӘДІСІМЕН ҚАЛЫПТАСТЫРЫЛАТЫН ЖАБЫНДАРДЫ МОДИФИКАЦИЯЛАУДЫҢ ЗАМАНАУИ ТӘСІЛДЕРІ (ШОЛУ МАҚАЛАСЫ)

Бұл шолу мақаласында электр доғалы бүрку әдісімен алынатын жабындардың пайдалану сипаттамаларын арттырудың заманауи тәсілдері қарастырылады. Ерекше назар электр доғасы арқылы энергияны бағыттап тұндыру технологиясы (Directed Energy Deposition, DED-Arc) саласындағы зерттеулерге аударылған, оның ішінде бүрку параметрлерін таңдау, негіз бетінің дайындалуы, сондай-ақ жаңа типтегі сымдар мен композициялық материалдарды қолдану мәселелері қамтылады. Коррозияға төзімді, термиялық төзімді және тозуға төзімді қорғанысқа арналған бастапқы материалдарды дамытудағы жетістіктер қарастырылған. Атап айтқанда, Zn, Al-Mg және Zn-Al-Mg жүйелері, биологиялық обрастануға қарсы қолдануға арналған Al-Cu ұнтақты-сымды материалдар, тот баспайтын болаттар мен NiCrMoAl қорытпалары, керметтік жабындар, сондай-ақ вольфрам карбидімен (WC) упрочнённген жоғары энтропиялы қорытпалар талданады. Жабындардың адгезиялық беріктігін арттыру үшін лазерлік беттік текстуралау әдістерін қолдану және электр доғалы бүрку технологиясын электрөткізбейтін негіздерге бейімдеу бойынша соңғы нәтижелер келтірілген. Сонымен қатар «процесс-құрылым-қасиет» өзара байланысының жабындардың пайдалану қасиеттеріне әсері қысқаша талданады. Жалпыланған деректер электр доғалы бүрку технологиясының әртүрлі өнеркәсіптік қолдану салаларында алдын ала берілген қасиеттері бар функционалдық жабындарды алу үшін икемді әрі экономикалық тұрғыдан тиімді әдіс екенін көрсетеді.

Түйін сөздер: *электрдоғалық бүрку; DED-Arc; жабындар; адгезия; коррозияға қарсы қорғаныс.*

Ж.Б. Сагдолдина[1,2], А.Б. Леонидова[2*], А.Ж. Жасұлан[2,3], А.Б. Шынарбек[3], Ж. Турар[4]
[1]Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова,
070000, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск, ул. 30-й Гвардейской дивизии, 34,
[2]Шәкәрім университет, 071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Физкультурная, 4
[3]Инжиниринговый центр, Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А
[4]Университет Сакарья, 54050, Турция, г. Сакарья, ул. Академийолу, 5-20
*e-mail: aiymleonidova1994@gmail.com

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К МОДИФИКАЦИИ ПОКРЫТИЙ, ФОРМИРУЕМЫХ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОДУГОВОГО НАПЫЛЕНИЯ (ОБЗОР)

В данной обзорной статье рассмотрены современные подходы к повышению эксплуатационных характеристик покрытий, получаемых методом электродугового напыления. Особое внимание уделено исследованиям в области направленного осаждения энергии электрической дугой (Directed Energy Deposition, DED-Arc), включая выбор параметров напыления, подготовку поверхности подложки, а также применение новых типов проволок и композиционных материалов. Проанализированы достижения в разработке исходных материалов для коррозионностойкой, термостойкой и износостойкой защиты, охватывающие системы Zn, Al–Mg и Zn–Al–Mg, порошково-проволочные материалы Al–Cu для противообрастающих применений, нержавеющие стали и сплавы NiCrMoAl, керметные покрытия, а также высокоэнтропийные сплавы, упрочнённые карбидом вольфрама (WC). В статье представлены современные результаты по повышению адгезии покрытий за счёт лазерной текстуризации поверхности, а также по адаптации технологии электродугового напыления для нанесения покрытий на непроводящие подложки. Кроме того, кратко рассмотрено влияние взаимосвязи «процесс–структура–свойства» на эксплуатационные характеристики покрытий. Обобщённые результаты подчёркивают потенциал электродугового напыления как гибкой и экономически эффективной технологии для формирования функциональных покрытий с заданными свойствами, предназначенных для широкого спектра промышленных применений.

Ключевые слова: *электродуговое напыление, DED-Arc, покрытия, адгезия, антикоррозионная защита.*

Сведения об авторах

Жұлдыз Болатқызы Сағдолдина – PhD, ассоциированный профессор, Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан; e-mail: sagdoldina@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6421-2000.

Айым Бауыржанқызы Леонидова* – докторант специальности «Техническая физика», Шәкәрім университет, Исследовательская школа физических и химических наук, кафедра Техническая физика и теплоэнергетика, г. Семей, Республика Казахстан; e-mail: aiymleonidova1994@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-2981-2041.

Айнұр Жасұланқызы Жасұлан – докторант специальности «Техническая физика», Шәкәрім университет, Исследовательская школа физических и химических наук, кафедра Техническая физика и теплоэнергетика, г. Семей, Республика Казахстан, старший научный сотрудник Инжинирингового центра; e-mail: ainur.99.99.99@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-5887-0135.

Айбек Бақытжанұлы Шынарбек – докторант специальности «Технологические машины и оборудование», Шәкәрім университет, старший научный сотрудник Инжинирингового центра; г. Семей, Республика Казахстан; e-mail: Shinarbekov16@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-2877-5178.

Жанабай Турар – магистрант, Университет Сакарья, г. Сакарья, Турция; e-mail: turarjanabay@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-6202-112X.

Авторлар туралы мәліметтер

Жұлдыз Болатқызы Сағдолдина – PhD, Ассоциированный профессор, Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан мемлекеттік университеті, Өскемен қаласы Қазақстан Республикасы; e-mail: sagdoldina@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6421-2000.

Айым Бауыржанқызы Леонидова* – «Техникалық физика» мамандығының докторанты, Шәкәрім университеті, Физика және химия ғылымдары зерттеу мектебі, Техникалық физика және жылуэнергетика кафедрасы, Семей қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: aiymleonidova1994@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-2981-2041.

Айнұр Жасұланқызы Жасұлан – «Техникалық физика» мамандығының докторанты, Шәкәрім университеті, Физика және химия ғылымдары зерттеу мектебі, Техникалық физика және жылуэнергетика кафедрасы, Қазақстан Республикасы, Инженерлік орталықтың аға ғылыми қызметкері; e-mail: ainur.99.99.99@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-5887-0135.

Айбек Бақытжанұлы Шынарбек – «Технологические машины и оборудование» мамандығының докторанты Инженерлік орталықтың аға ғылыми қызметкері, Шәкәрім университеті, Семей қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: Shinarbekov16@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-2877-5178.

Жанабай Турар – Сакарья университетінің магистранты, Сакарья қ., Түркия; e-mail: turarjanabay@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-6202-112X.

Information about the authors

Zhuldyz Sagdoldina – PhD, Associate Professor, Sarsen Amanzholov East Kazakhstan State University, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan; e-mail: sagdoldina@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6421-2000.

Aiym Leonidova* – PhD student in the specialty «Technical Physics», Shakarim University, Research School of Physical and Chemical Sciences, Department of Technical Physics and Heat Power Engineering, Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: aiymleonidova1994@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-2981-2041.

Ainur Zhassulan – PhD student in the specialty «Technical Physics», Shakarim University, Research School of Physical and Chemical Sciences, Department of Technical Physics and Heat Power Engineering, Semey, Republic of Kazakhstan, Senior Researcher, Engineering Center; e-mail: ainur.99.99.99@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-5887-0135.

Aibek Shynarbek – PhD student, Engineering Center, Shakarim University, Semey, Kazakhstan; e-mail: Shinarbekov16@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-2877-5178.

Zhangabay Turar – Master's student in Physics, Sakarya University, Sakarya, Turkey; e-mail: turarjanabay@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-6202-112X.

Received 30.01.2026
Revised 12.03.2026
Accepted 17.03.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-55

ҒТАХР: 44.29.31; 44.31.29; 50.41.29

А.Ж. Сағындықова[1], Н.А. Заец[2], Р.А. Жамашева[3], Н.Н. Нұрғалиев[4]*
[1]Гумарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті,
050013, Қазақстан Республикасы, Алматы, Байтұрсынов көшесі,127
[2]Берлин қолданбалы ғылымдар университеті,
10963, Германия, Берлин, Дессауэр көшесі, 3/5
[3]Алматы технологиялық университеті,
050012, Қазақстан Республикасы, Алматы, Төле би көшесі,100
[4]Шәкәрім университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей, Глинки көшесі, 20
*e-mail: n.nurgaliyev@shakarim.kz

ИНДУКЦИЯЛЫҚ ҚЫЗДЫРУ ЖҮЙЕЛЕРІНЕ АРНАЛҒАН ЖИІЛІК ТҮРЛЕНДІРГІШІН МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛЬДЕУ ЖӘНЕ ЭКСПЕРИМЕНТТІК ЗЕРТТЕУЛЕР

Аңдатпа: *Мақалада ауыл шаруашылығы машина жасау, автомобиль өнеркәсібі және металл өңдеу сияқты әртүрлі салаларда индукциялық жылыту жүйелерін әзірлеу және қолдану талқыланады. Индукциялық қондырғылар мен дәстүрлі жылыту әдістерінің салыстырмалы талдауы келтірілген, олардың жоғары қыздыру жылдамдығы мен тиімділігі, процесті басқарудың жақсаруы және энергия тұтынудың төмендеуі сияқты артықшылықтары көрсетілген. Индукциялық қыздыру жүйелеріне арналған жиілік түрлендіргішінің математикалық моделі көп өлшемді айнымалылардың динамикасын сипаттайтын дискретті теңдеулер жүйесіне негізделген. Қолданыстағы тәсілдерден айырмашылығы, бұл модель жұмыс жиіліктерінің оңтайлы диапазонын ескереді, қуат транзисторларының санын азайтады және орнатылған қуатты ескереді, мұның бәрі жоғары энергия тиімділігін сақтайтынын байқатады. Зерттеу аясында бір фазалы және үш фазалы қуат көзімен 2-20 кГц диапазонында жұмыс істейтін прототиптік жиілік түрлендіргіші және 6 кВт индуктор әзірленіп, шығарылды. Эксперименттік зерттеулер ұсынылған модельдің жарамдылығын және оның нақты технологиялық жағдайларда қолданылуын растады. Жұмыстың практикалық маңыздылығы машина жасау мен ауылшаруашылық машиналарында оңтайлы индукциялық қыздыру технологияларын таңдау үшін әзірленген модель мен прототипті пайдалану мүмкіндігінде жатыр, осылайша сенімділіктің артуын, энергия тұтынудың төмендеуін және шығындардың төмендеуін қамтамасыз етеді. Нәтижелер ұсынылған модельдің жеткіліктілігін көрсетті және оның практикалық қолданылуын растады.Түрлендіргіш параметрлеріндегі өзгерістер оңтайлы индукциялық қыздыру режимін таңдауға айтарлықтай әсер ететіні көрсетілді, бұл білім беру мақсаттары үшін де, өнеркәсіптік енгізу үшін де практикалық маңызды.*

Түйін сөздер: *жиілік түрлендіргіштері, индукциялық қыздыру, транзисторлық модуль, үш фазалы түзеткіш, инвертор, IGBT индукциялық қыздыру жүйесі.*

©А.Ж. Сағындықова, Н.А. Заец, Р.А. Жамашева, Н.Н. Нұрғалиев, 2026

Кіріспе

Индукциялық қыздыру – металдарды және басқа да өткізгіш материалдарды қыздыру үшін электромагниттік индукцияны пайдалануға негізделген процесс. Индуктор тудыратын айнымалы магнит өрісіне ұшыраған кезде, материалда құйынды токтар пайда болады, бұл электр энергиясын жылу энергиясына айналдырады. Осылайша, жылу тікелей қыздырылған материалдың ішінде пайда болады, бұл жоғары қыздыру жылдамдығын қамтамасыз етеді және дәстүрлі термиялық өңдеу әдістерімен қол жеткізілетін тиімділіктен айтарлықтай жоғары [1, 2]. Осы артықшылықтарға байланысты индукциялық қыздыру жүйелері машина жасауда және ауылшаруашылық машиналарында кеңінен қолданылады, мұнда болат бөлшектерін қатайту және қалпына келтіру арқылы өңдеу өзекті міндет болып қала береді.

[3] мәліметтері бойынша, 2025 жылға қарай өнеркәсіптік қондырғылардың шамамен 70%-ы заманауи индукциялық жылыту жүйелері болады, олар вакуумдық түтік генераторларына, қозғалтқыш-генераторларға және тиристорлық түрлендіргіштерге негізделген ескірген жоғары жиілікті қондырғылармен салыстырғанда айтарлықтай жоғары тиімділікті көрсетеді. Заманауи индукциялық жүйелердің негізгі артықшылықтарына жоғары энергия тиімділігі, сенімділік, ықшамдылық, басқарудың қарапайымдылығы және әмбебаптылық жатады.

Бұл жұмыста біз математикалық модельдеу және мақсатты эксперименттер арқылы ауыл шаруашылығы техникасының болат бөлшектерін қатайту және қалпына келтіру бетін жабу параметрлерін таңдауды зерттейміз. Біздің тәсіліміз индукциялық қыздыру үшін оңтайлы жұмыс режимдері мен түрлендіргіш параметрлерін таңдаудың принциптік негізін қамтамасыз етед. Металдарды индукциялық қыздыруға арналған жиілік түрлендіргішін (ЖТ) жобалауға ерекше назар аударылады, онда басқару драйверлерімен біріктірілген IGBT және MOSFET транзисторлық модульдері қолданылады. Әзірленген тізбек шешімдері қысқа тұйықталу токтарынан, шамадан тыс жүктемелерден және шамадан тыс температурадан қорғау жүйелерін қамтамасыз етеді, бұл жабдықтың сенімділігін арттырады [4].

Ұсынылған математикалық модель талдау кезеңінде хабардар шешімдер қабылдауға мүмкіндік береді және индукциялық жылытқыштарды пайдалануды оңтайландырады: пайдалану тиімділігін арттыру; тозуға төзімділік пен беріктікті арттыру (яғни, ұзақ қызмет ету мерзімі); үйкеліс коэффициенті сияқты көрсеткіштерге әсер ету; және бірлік құнын төмендету.

Бұл жұмыстың мақсаты – механикалық және ауылшаруашылық инженериясында қолдануға арналған жиілік түрлендіргіштері бар индукциялық жылытқыштарды өндіру технологиясын әзірлеу. Мұндай жүйелерге қойылатын негізгі талаптар: түрлендіргіштің қажетті жиілікті басқару диапазонын қамтамасыз ету; қуат транзисторларының санын азайту; құрылғының құнын төмендете отырып, жоғары тиімділікке қол жеткізу; және көрсетілген қыздыру процесінің параметрлеріне нұқсан келтірмей, жиілік түрлендіргішінің (немесе оның жеке компоненттерінің) орнатылған қуатын төмендету.

Бірқатар зерттеулерге сәйкес, индукциялық қыздыру термиялық өңдеудің ең тиімді әдістерінің бірі ретінде кеңінен қарастырылады және қазіргі уақытта өнеркәсіпте маңызды орын алады. Дәстүрлі қыздыру әдістерімен салыстырғанда, индукциялық қыздыру жүйесінің бірқатар маңызды артықшылықтары бар. Оларға жоғары тиімділік пен ықшамдылық жатады, бұл оларды өндіріс желілеріне біріктіруге мүмкіндік береді. Сонымен қатар, индукциялық қыздыруды пайдалану операциялардың өнімділігін айтарлықтай арттыруға, сондай-ақ бөлшектердің бетінде термиялық күшейтілген қабаттардың пайда болуына мүмкіндік береді, бұл өнімдердің өнімділік сипаттамалары мен арнайы қасиеттерін жақсартады [5-6].

[7]-те атап өтілгендей, өнеркәсіптік кәсіпорындарда қолданылатын индукциялық жабдық генераторларының шамамен 70%-ы толығымен тозған, 20%-ында 50%-дан астам тозу бар, ал тек 10%-ында ғана 50%-дан аз тозу бар. Осыған байланысты, өнеркәсіптік кәсіпорындар қазіргі уақытта қызмет ету мерзімі аяқталған жабдықты жаңғырту және ауыстырудың маңызды міндетіне тап болып отыр. Бұл фактор машина жасау кешенінің тұрақты дамуы мүмкіндіктерін айтарлықтай шектейді, себебі көптеген жұмыс істеп тұрған қондырғылар тиімді пайдалануға жарамсыз.

Сонымен қатар, индукциялық қыздыру процестерін оңтайландыру мәселелері белсенді түрде зерттелуде [8], ең алдымен тұрақты және өтпелі жұмыс режимдеріндегі партиялық және үздіксіз қондырғыларға қатысты. Сонымен қатар, авторлар атап өткендей, энергия мен

ресурстарды үнемдеу міндеттері өзекті болып қала береді, оларды шешу жаңа жоғары өнімді және энергия үнемдейтін жабдықтарды енгізбей мүмкін емес.

Бұл бағыттың болашағы мынада: энергия ресурстарына, ең алдымен табиғи газға бағаның үнемі өсуі жағдайында индукциялық қыздыру экономикалық тиімділікке қол жеткізуге мүмкіндік береді. Сонымен қатар, тек осы сектордағы индукциялық жабдықтар ғана дайындаманы зауыт контейнерінен ұстахана жұмыс орнына жылжытудың технологиялық процесін толық автоматтандыруға индукциялық қыздыру мүмкіндік береді, бұл ұста өндірісінің зиянды жағдайларында адамның қатысуын азайтады.

Зерттеулерде [9] ыстық штамптау арқылы дайындамаларды сериялық өндірумен машина жасау кәсіпорындарында индукциялық қыздыруды қолданудың артықшылықтары, сондай-ақ дәстүрлі газ пештерін индукциялық қыздырғыштармен ауыстырудың орындылығы келтірілген. Бұл зерттеулерде толық индукциялық қыздыруды да, жылу процестерін оңтайландыратын жалын-индукциялық аралас нұсқаны да пайдалану мүмкіндігі қарастырылды.

[10] зерттеулерінде дайындамаларды кейінгі қысыммен өңдеу алдында шамамен 1250°C температураға дейін қыздыруға арналған автоматты желілерге біріктірілген мамандандырылған жоғары жылдамдықты индукциялық қондырғыларды (қуаты 5-8 т/сағ) өнеркәсіптік әзірлеу кезінде негізгі міндет қажетті энергия параметрлерін сақтай отырып, олардың жалпы өлшемдерін азайту екендігі атап өтілген. Бұл мәселені шешу үшін дайындамаларды қыздыру блоктары арқылы үздіксіз беруді қамтитын индукциялық қыздыру жүйесін (IHS) пайдалану ұсынылады. Сонымен қатар, бұл зерттеулер металлургия өнеркәсібінде индукциялық қыздыруды қолдануды, атап айтқанда, тотықсыздандыру және калибрлеу операциялары алдында құбырлы дайындамаларды термиялық өңдеу үшін индукциялық қыздырғыштарды пайдалануды талдайды.

[11] зерттеулерінде газ пештерімен салыстырғанда индукциялық қондырғылардың бірқатар маңызды артықшылықтары бар екені атап өтілген: олардың ұзындығы бойынша жалпы өлшемдері 5-6 есе кіші, бұл технологиялық желілердің құрамына интеграциялауды жеңілдетеді; Олар жоғары сенімділікпен, жұмысқа үнемі дайындықпен және жедел іске қосумен сипатталады; олар іс жүзінде қақ түзілуін болдырмайды; сондай-ақ қыздыру режимдерін қолдау мен өзгертуді автоматтандыруды және оларды тотықсыздандырғыш диірмен мен онымен байланысты қондырғылардың жұмыс режимдерімен үйлестіруді жеңілдетеді. Бұл жұмыстарда прокат өнімдерін термиялық өңдеу мәселелеріне ерекше назар аударылады, мұнда индукциялық қыздыруды пайдалану жалын және электр пештеріне қарағанда айтарлықтай артықшылықтарды көрсетеді. Бұл жағдайда тікелей қыздырғыштар да қолданылады.

Авторлар [12] атап өткендей, жобалау ақпаратын алу мақсатында толық көлемді эксперименттер жүргізу қиын және экономикалық тұрғыдан тиімсіз. Мұндай жағдайларда ағынды индукциялық жылытқыштардың жоғары сапалы жобалануын қамтамасыз ету тек қыздыру процестерінің дәлірек математикалық модельдері арқылы ғана мүмкін болады.

Деректерге сәйкес [13-15], индукциялық қыздырудың рөлі әсіресе қалыңдығы 20-50 мм болатын ауылшаруашылық жұқа плиталарға арналған соңғы құю желілерінде қолданылған кезде артады. Бұл жағдайда индукциялық қыздыру прокат станының кедір-бұдыр және әрлеу тіректерінің арасындағы аралық ролик үстелдеріндегі жұқа плиталардың немесе прокат жолақтарының шеттерін алдын ала қыздыру үшін өте тиімді болып табылады.

Материалдар мен әдістер

Мәселенің қойылуы және зерттеу әдістері

Ауыл шаруашылығы машина жасау, автомобиль жасау, аэроғарыш және металл өңдеу салаларын қоса алғанда, әртүрлі салаларда индукциялық қыздыру технологияларын тиімді дамыту тек ұйымдастырушылық қана емес, сонымен қатар қаржылық қолдауды да қажет етеді. Атап айтқанда, қазіргі заманғы талаптарға сай келетін FC бар индукциялық жылытқыштарды өндіру технологияларын әзірлеуге инвестиция салу өзекті міндет болып табылады.

Бұл талаптарға мыналар жатады: FC қажетті жиілікті басқару диапазонын қамтамасыз ету, қуат транзисторларының санын азайту, бірлік құнын төмендете отырып, жоғары тиімділікке қол жеткізу, сондай-ақ қыздыру процесінің көрсетілген параметрлерін сақтай отырып, бүкіл құрылғының немесе оның жеке элементтерінің орнатылған қуатын азайту.

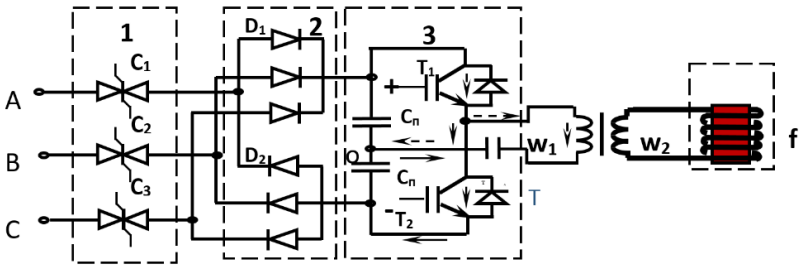
Мәселені шешу индукциялық қыздыру технологиясының оңтайлы параметрлерін талдау және таңдауға негізделген әртүрлі тәсілдерді қолдану арқылы мүмкін болады. Бұл мақалада осы мақсатта қажетті жиілікті басқару диапазонын қамтамасыз ететін, қуат транзисторларының санын оңтайлы таңдауды, жоғары тиімділікті және жиілік түрлендіргішінің орнатылған қуатын азайта отырып, төмен шығындарды қолдайтын құралдар жиынтығы қолданылады.

Бұл жұмыста индукциялық қыздыру технологиясының оңтайлы параметрлерін таңдау мәселесін шешу үшін бірқатар зерттеу әдістері қолданылды. Аналитикалық әдіс ғылыми және техникалық әдебиеттерді зерттеу, сондай-ақ сәйкес басқару драйверлері бар IGBT және MOSFET транзисторлық модульдері негізінде жасалған жиілік түрлендіргішінің жұмыс істеу ерекшеліктері мен дизайнын талдау үшін қолданылды. Дискілі тырманың, соқаның, культиватордың табанының және қашауының кесу жиегінің бетін жабу кезіндегі, сондай-ақ астық жинау комбайндарының кесу аппаратының топсалы пышақтарын, саусақтарын және сегменттерін қатайту кезіндегі өзара әрекеттесу динамикасын ескере отырып, оңтайлы модельді таңдау және жиілік түрлендіргішінің параметрлерін бағалау үшін ойын теориясы әдістері қолданылды. Сонымен қатар, бірқатар өнеркәсіптік процестердегі технологиялық параметрлердің әсерін математикалық модельдеу және талдау әдістері қолданылды: штамптау үшін металдарды индукциялық қыздыру, индукциялық тигель пештерінде металдарды балқыту, көлемді ыстықтай қатайту, құбырлар мен резервуарларда майды қыздыру, астықты индукциялық кептіру, сұйық ортаны қыздыру, ағаш пен жабындарды кептіру, сондай-ақ құрғақ сүт өндіру.

Біз бір фазалы немесе үш фазалы кернеу көзінен қуат алған кезде 2-ден 20 кГц-ке дейінгі жиілік диапазонында жұмыс істейтін, қуаты 6 кВт болатын жиілік түрлендіргіші мен индукторының прототипін, сондай-ақ оның жұмысының әзірленген математикалық моделін ұсынамыз. Қондырғының электр тізбегіне жоғары жиілікті электр энергиясын жылу энергиясына түрлендіретін индуктор (I); кернеуді қажетті деңгейге дейін төмендететін трансформатор (Tr); және жиілік түрлендіргішіне (FC) біріктірілген түзеткіш пен инвертор кіреді. Сонымен қатар, индуктор параметрлерінің дайындамамен және жоғары жиілікті инвертормен үйлесімділігін қамтамасыз ететін шығыс трансформаторы қолданылады, ал оның массалық-өлшемдік сипаттамалары дәстүрлі шешімдермен салыстырғанда бірнеше есе төмендейді.

Жұмыстың ғылыми жаңалығы жиілік түрлендіргішінің жұмыс жиілік диапазонын негіздеу және таңдауда жатыр. Тоқ жиілігін азайту қуат элементтерінің санын және түрлендіргіштің массасы мен өлшемдерін азайтуға мүмкіндік беретіні, бірақ бұл металды қыздыру уақытының ұлғаюымен қатар жүретіні көрсетілген. Ұсынылған математикалық модель бізге бұл ымыраны сандық бағалауға және әртүрлі технологиялық жағдайлар үшін индукциялық қыздырғыштың жұмыс режимінің оңтайлы параметрлерін анықтауға мүмкіндік береді.

1-суретте индукциялық қыздырғышы бар жиілік түрлендіргішінің электр тізбегі көрсетілген, мұндағы: 1 кірісті триактар, 2-үш фазалы түзеткіш, 3-инверторлар. Инвертордың белгілі бір ерекшелігі бар, ол екі IGBT транзисторына орнатылған. Жиілік түрлендіргіштерінде микропроцессорлық басқару жүйесімен бірге жоғары коммутация жиілігі бар IGBT транзисторларын пайдалану тиристорлық түрлендіргіштерге тән жоғары гармоника деңгейін төмендетеді. Нәтижесінде қосымша жүктемелер азаяды, индуктордың қызуы төмендейді және пульсациялар азаяды.



Сурет 1 – Үш фазалы қуат көзі бар индукциялық қыздырғыштың жиілік түрлендіргішінің электрлік диаграммасы

1-қадам. Шығу қуаты бірдей тиристорлық түрлендіргіштермен салыстырғанда, IGBT транзисторлық түрлендіргіштері өлшемі бойынша кішірек, салмағы бойынша жеңіл және электрондық қосқыштардың модульдік дизайнына, модуль бетінен жылудың жақсы таралуына және құрылымдық элементтер санының аз болуына байланысты сенімділігі жоғары. [18]. Индукциялық қондырғыларда IGBT транзисторларын пайдаланудағы кедергілердің бірі – аса жоғары жиіліктерде пайдаланудың шектелуі. 75-100 кГц-тен жоғары жиілікте ауысқан кезде IGBT өз мүмкіндіктерінің шегінде жұмыс істейтіні және құрылғының, демек, түрлендіргіштің істен шығу ықтималдығы жоғары екені белгілі. MOSFET транзисторлары жоғары жиіліктерде жұмыс істей алады. Үш фазалы түзеткіш желіден айнымалы кернеуді тұрақты кернеуге түрлендіруге арналған, ал инвертор тұрақты токты жоғары жиілікті айнымалы токтың айнымалы кернеуіне түрлендіреді.

2-қадам. Кіріс тиристорлары (1-блок) жиілік түрлендіргішін желіге байланыссыз қосуға ғана емес, сонымен қатар кіріс кернеуін реттеуге де арналған. Индукциялық қыздырғышты пайдаланған кезде шамамен әрбір 30 минут сайын жиілік түрлендіргішін желіден ажырату қажет, ал қыздырылған металл (дайындама) штамптау үшін индуктордан алынады. Әрі қарай, жаңа дайындаманы индукторға салып, жиілік түрлендіргішін желіге қосыңыз. IGBT T1 және T2 транзисторларынан (1-сурет) құрылған жартылай көпірлі инвертор тұрақты ток кернеу көзіне қосылған, ал бөлінген тұрақты ток байланысы бар Cn конденсаторлары (төменгі және жоғарғы) қоректендіру кернеуін екі тең бөлікке бөлуге арналған. C конденсаторы шығыс кернеуінің сапасын жақсарту және тізбектей резонансқа қол жеткізу үшін инвертордың шығыс тізбегіне қосылған.

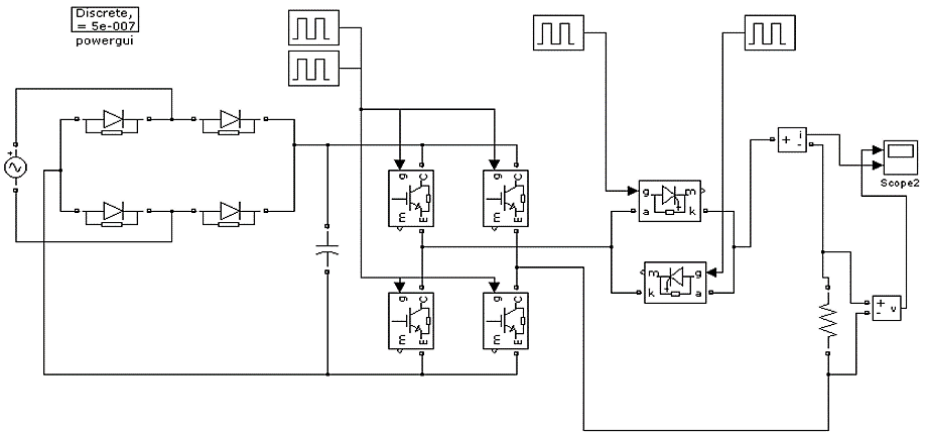
3-қадам. Инвертор шығысында кернеудің оң жартылай периодын қалыптастыру үшін T1 транзисторы ашылып, T2 транзисторы жабылады, кернеу көзінен келетін тұрақты ток T1 транзисторы және трансформатордың бастапқы орамасы арқылы өтеді. Инвертор шығысында теріс жартылай периодты қалыптастыру үшін T2 транзисторы ашылып, T1 транзисторы жабылады, ал кернеу көзінен келетін тұрақты ток T2 транзисторлары және трансформатордың бастапқы орамасы арқылы кері бағытта ағады.

Осылайша, инвертор шығысында сатылы кернеу пайда болады. Индуктордағы сатылы кернеудің жиілігі транзисторлардың ауысу жиілігімен анықталатынын және бірнеше килогерцке жетуі мүмкін екенін атап өткен жөн.

Қуат транзисторларының минималды саны бар инвертордың жұмыс режимі индуктордағы токтың жиілік диапазонын арттырады және олардың энергия өнімділігін жақсартады, сонымен қатар сенімділікті арттырады және жабдықтың құнын төмендетеді.

4-қадам. Үш фазалы түзеткіштің 2 көпір тізбегі тиристорлардың шығысына қосылған (1-сурет). Белгілі болғандай, үш фазалы түзеткіштің көпір тізбегі ең төменгі шығыс кернеуінің пульсациясын қамтамасыз етеді.

MatLab ортасы қуат түрлендіргіштерінің әртүрлі жұмыс режимдерін сандық модельдеуге кең мүмкіндіктер береді. Зерттеудің бөлігі ретінде авторлар таза белсенді жүктеме жағдайында бір фазалы транзистор-тиристорлық инверторды модельдеді (2-сурет).



Сурет 2 – Бір фазалы транзистор-тиристор жиілік түрлендіргішін модельдеудің құрылымдық диаграммасы

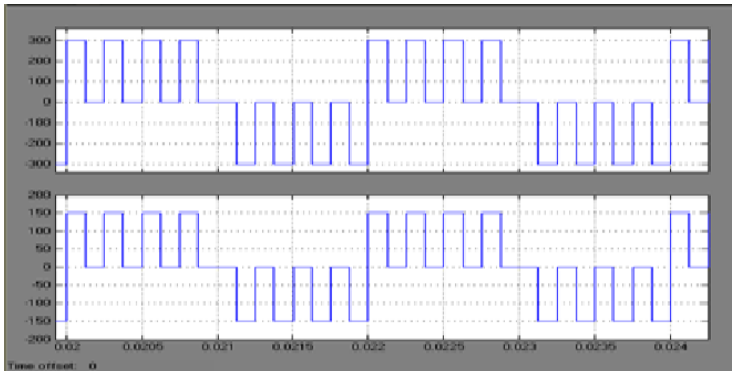
Нәтижелер және талқылау

Үш фазалы түзеткіш көпір тізбегінде басқарылмайтын диодтар $D_1 - D_6 - D_3 - D_2 - D_5 - D_4$ 60° ығысумен тізбектей ашылады, ал D_1, D_3 және D_5 диодтары оң, D_6, D_2 және D_4 диодтары теріс жартылай периодтарда ашылады. Әрбір диодтың өткізгіштік аралығы 120°, кез келген сәтте екі диод ашық (әр көпір иінінде біреуден) және жүктемедегі кернеу фазалық кернеулердің айырмашылығымен, яғни желілік кернеумен анықталады. Синусоидалы желілік кернеуі бар жүктемедегі кернеудің орташа мәні келесі түрге ие:

$$U_{mid} = \frac{6\sqrt{2}}{\pi} U_m \sin\frac{\pi}{6} \cos\alpha = 1{,}35 U_{л} \cos\alpha = 2{,}34 U_{ф} \cos\alpha \qquad (1)$$

Қайда $U_L = \sqrt{3} U_F$ – трансформатордың екінші реттік орамасының желілік кернеуінің тиімді мәні.

Модельдеу нәтижелері таза белсенді жүктеме кезінде шығыстағы кернеу мен ток тұрақты пішінге ие екенін көрсетті, бұл транзисторлық-тиристорлық жиілік түрлендіргішінің жұмыс принципінің дұрыстығын растайды. 3-суретте белсенді-индуктивті жүктеме үшін модельдеу нәтижелері көрсетілген. Бұл жағдайда кернеу мен ток толқынының формасы бұрмаланған және кернеудің күрт өзгеруі байқалады, бұл транзисторлық-тиристорлық жиілік түрлендіргішінің жұмысына теріс әсер етеді.



Сурет 3 – Таза белсенді жүктемесі бар транзисторлық-тиристорлық жиілік түрлендіргішін модельдеу нәтижелері

Жылумен жабдықтаудың жанасу әдісімен белгілі бір қалыңдықтағы металды қыздыру, бір қабаттың қалыңдығынан асып түссе де, салыстырмалы түрде баяу жүреді, бұл жағдайда жылу беру коэффициентінің мәні ұқсас көрсеткіштің мәнінен айтарлықтай асып түседі. Бұл жылу берудің жанасу әдісін қолдану тиімділігін анықтайды.

Мәселенің тұжырымы, мысалы:

$$\begin{cases} \frac{\partial\theta}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2\theta}{\partial z^2} + Q(z,t) = 0 \\ \theta(z,0) = \theta^0 \end{cases} \qquad (2)$$

Осы жерден θ (z,t)= $\theta_з - \theta_{ГП}$

Есепті шешу үшін жалпыланған функциялар теориясының аппараты қолданылады:

$$\theta'(z,t) = \theta(z,t) H(t), \qquad (3)$$

Қайда H(t) Хейвисайд функциясы болып табылады

Хейвисайд функциясы басқару теориясы мен сигналдарды өңдеу теориясының математикалық аппаратында белгілі бір уақытта бір күйден екінші күйге өтетін сигналдарды көрсету үшін кеңінен қолданылады. Математикалық статистикада бұл функция, мысалы, эмпирикалық таралу функциясын жазу үшін қолданылады. Екінші ретті дербес туындыны шешейік.

$$\frac{\partial\theta'}{\partial t} - a^2 \frac{\partial^2\theta'}{\partial z^2} = \frac{\partial\theta}{\partial t} H(t) + \theta^0(z) \cdot \delta(t) - a^2 \frac{\partial^2\theta'}{\partial z^2} H(t) = \\ = H(t) Q(z,t) + \theta^0(z) \cdot \delta(t) \qquad (4)$$

Жылу өткізгіштік теңдеуін жалпыланған функцияларда жазайық

$$\frac{\partial \theta'}{\partial t} - a^2 \frac{\partial^2 \theta'}{\partial z^2} = H(t)Q(z,t) + \theta^0(z) \cdot \delta(t) \quad (5)$$

Біз (4) теңдеудің шешімін теңдеудің оң жағын белгілі негізгі шешіммен, жылу өткізгіштік теңдеуімен иіру түрінде іздейміз.

$$\theta'(z,t) = U(z,t) * H(t)Q(z,t) + U(z,t) * \theta^0(z) \quad (6)$$

Осы жерден $$\theta^1(z.t) = H(t)\int_0^t d\tau \int_0^l U(x-y.t-\tau)\theta(y.\tau)dy + \int_0^l U(x-y)\theta^1(y)dy \quad (7)$$

Осылайша, ұсынылған модель көп өлшемді айнымалылардың динамикасын сипаттайды және индукциялық қыздырудың жұмыс элементтерінің оңтайлы параметрлері мен жұмыс режимдерін ескере отырып, оның тиімділігі мен ең маңызды факторлар арасындағы байланысты орната отырып, процестің жеңілдетілген моделін құру мәселесін қарастыруға мүмкіндік береді. Зерттеу барысында артықшылықты параметрлер комбинациялары анықталды және көп айнымалылы эксперименттік жобалауға негізделген оңтайлы ресурстарды бөлу стратегиялары анықталды.

Орындалған жұмыстың артықшылығы – сызықтық бағдарламалау есептерін шешу және еркін мүшелері бар регрессиялық теңдеулерді құру сияқты элементтерді ескеруге мүмкіндік беретін математикалық модельді пайдалану. Жүргізілген тексеру ұсынылған модельдің жеткіліктілігін растады, бұл оны модельдеу режимінде қолдану мүмкіндігін қамтамасыз етеді және нәтижелерді зерттеліп жатқан процестердің нақты жұмыс істеу жағдайларына жақындатады.

Сонымен қатар, зерттеудің әлсіз тұсы қатаю кезінде индукциялық қыздыру процестерімен байланысты қауіп факторларын одан әрі талдау қажеттілігі болып қала береді. Айта кету керек, бұл процесс өнімнің беткі қабатын тез қыздыруды қамтамасыз етеді, тұтқыр өзекті сақтай отырып, жоғары беттік қаттылыққа қол жеткізуге мүмкіндік береді. Сонымен қатар, беттік индукциялық қатаю бөлшектерді қатаюдың басқа әдістерімен салыстырғанда жылдамырақ және үнемдірек [19].

Зерттеу аясында жиілік түрлендіргішінің прототипі, сондай-ақ бір фазалы немесе үш фазалы қоректену кезінде 2-ден 20 кГц-ке дейінгі жиілік диапазонында жұмыс істейтін 6 кВт индуктор әзірленіп, жасалды. Металл дайындамаларды индукциялық қыздыруға арналған жиілік түрлендіргішінің прототипінің тәжірибелік сынақтары нақты жұмыс жағдайларында жүргізілді. Тәжірибенің мақсаты қыздыру тиімділігін бағалау және жиілік түрлендіргішінің ұсынылған математикалық моделінің жарамдылығын растау болды. 4-суретте диаметрі 44 мм және ұзындығы 80 мм цилиндрлік дайындаманы индукциялық қыздыру процесі көрсетілген.

Жылумен жабдықтаудың жанасу әдісі белгілі бір қалыңдықтағы металды қыздыруда тиімді, себебі жылу беру коэффициенті салыстырмалы түрде жоғары. Бұл тәсіл артықшылықты параметрлер комбинацияларын анықтауға және көп айнымалы эксперименттік жобалауға негізделген ресурстарды бөлу стратегияларын ұсынуға мүмкіндік береді.

Эксперименттік нәтижелер сипаттамалық түрде берілгенімен, модельдің сандық дәлдігін бағалау үшін жеткілікті емес: өлшеу құралдарының қателігі, тәжірибелер саны және стандартты ауытқулар көрсетілмеген. Модель мен тәжірибе арасындағы сәйкестік тек сапалық тұрғыда – қыздыру үрдісінің пішіні мен жылдамдығы бойынша -га расталған. Сандық растау үшін бірнеше тәуелсіз сынақ жүргізу, әртүрлі ток амплитудасы мен жиілігі үшін модельдің болжамын тәжірибелік деректермен салыстыру (мысалы, RMSE немесе пайыздық ауытқулар арқылы) және статистикалық талдау жасау қажет. Осы тәсіл ұсынылған модельдің нақты жұмыс жағдайында қаншалықты дәл болатынын сандық тұрғыда бағалауға мүмкіндік береді.

Зерттеу аясында жиілік түрлендіргіштің прототипі, сондай-ақ 2-20 кГц жиілік диапазонында жұмыс істейтін 6 кВт индуктор әзірленіп, тәжірибелік сынақтардан өтті. Металл дайындамаларды қыздыру нәтижелері ұсынылған математикалық модельдің жарамдылығын және оңтайлы жұмыс режимдерін таңдауға мүмкіндікті растады.

Ұсынылған модель аналитикалық және ықшам, ал көптеген белгілі модельдер сандық FEM-модельдер болып табылады; сонымен қатар бұл модель жиілік түрлендіргішінің электрлік режимдері мен индукциялық қыздырудың жылулық процестерін бір жүйеде қарастырады (кесте 1).

Кесте 1 – Ұсынылған математикалық модель мен қолданыстағы модельдердің айырмашылығы

Салыстыру критерий	Қолданыстағы модельдер (FEM және сандық әдістер)	Ұсынылған математикалы модель
Модельдеу әдісі	Соңғы элементтер әдісі (FEM), толық сандық модельдеу	Аналитикалық модель, жалпыланған функциялар теориясы қолданылған
Процестерді сипаттау	Көбінесе электровиборатік және жылулық процестер бөлек қарастырылады	Электрлік режимдер мен жылулық процестер бір модельде кешенді қарастырылады
Бастапқы және шекаралық шарттарды енгізу	Классикалық сандық әдістер арқылы	Хевисайд функциясы және δ-функция арқылы енгізіледі
Есептеу күрделілігі	Жоғары, үлкен есептеу ресурстарын қажет етеді	Қысқа, инженерлік есептеулер үшін тиімді
Параметрлерді оңтайландыру	Көп жағдайда күрделі сандық оптимизация қажет	Регрессиялық теңдеулер және көп факторлы жоспарлау арқылы оңтайландыруға болады
Практикалық қолдану	Нақты физикалық процестерді жоғары дәлдікпен модельдеу	Индукциялық қыздыру жүйесінің жұмыс режимдерін жедел бағалау және параметрлерді таңда

Индукциялық қыздыру процесінің басында температураның біркелкі емес таралуы байқалды: дайындаманың орталық бөлігінде температура оның шеттеріндегіден төмен болды. Бұл электромагниттік өрістің ену тереңдігінің шектеулі болуына байланысты, бұл төмен ток жиілігін таңдау қажеттілігін көрсетеді, дегенмен бұл металды қыздыру уақытын арттырады [29]. Тәжірибелік нәтижелер көрсеткендей, жиілік түрлендіргішінің дайындаманы 600-650°C температураға дейін қыздыру уақыты 8 кГц жиілікте 3,5 минут және 10 кГц жиілікте 2,41 минут болды (4-сурет). Транзисторлардың қызып кетуі байқалмады, бұл жұмыс талаптарына сәйкес келді [20].



Сурет 4 – Сыналып жатқан индукциялық қыздырғыш

1-есептің шешімі

Индукциялық қыздырғыштың көрсетілген көппараметрлі есебінің шешімі металды 731°C температураға дейін қыздыру процедурасын анықтайтын параметрлердің қатынасына байланысты (5-сурет).



Сурет 5 – Металды 731°C температураға дейін индукциялық қыздыру процесі

Тәжірибе барысында трансформатордың бастапқы тізбегінде конденсаторсыз инвертор

шығысындағы кернеудің осциллограммалары алынды. Нәтижелер шығыс кернеуінің толқындық формасының айқын тербелмелі көрініске ие екенін көрсетті, бұл транзисторлардың белсенді режимде жұмыс істеп тұрғанын көрсетеді. Мұндай жағдайларда олар қатты қызады, бұл сайып келгенде істен шығуға әкелуі мүмкін. Транзисторларды кілттік режимге ауыстыру және шығыс кернеуінің сапасын жақсарту үшін тізбектей резонанстық жұмысты қамтамасыз ететін инвертор шығыс тізбегіне С конденсаторын тізбектей қосу қажет.

Сонымен қатар, С конденсаторының оңтайлы мәнін эксперимент арқылы таңдау шығыс кернеуінің сапасын арттыруды ғана емес, сонымен қатар тізбектей резонансқа қол жеткізуді де қамтамасыз ететіні анықталды. Бұл жағдайда инвертордың белсенді қуаты тікелей индукторға, яғни қыздырылған дайындамаға беріледі.

Ұсынылған модельде (2)-(7) теңдеулер арқылы индукциялық қыздыру процесі жылулық деңгейде сипатталғанымен, оның жиілік түрлендіргіш пен индуктордың электрлік параметрлерімен байланысы мынадай жолмен орнатылады. Біріншіден, индуктор арқылы өтетін токтың амплитудасы *I(t)* және жұмыс жиілігі *f* қыздыру көзінің функциясы *Q(z,t))* ретінде теңдеуге енгізіледі:

$$Q(z,t) \sim I(t)^2 \cdot R(z)$$

мұндағы *R(z)* – металдың тереңдігіне байланысты локальды активті кедергі, ал *I(t)* – жиілік түрлендіргіштің шығысындағы ток, ол түрлендіргіштің жиілік, кернеу және жүктеме параметрлерімен анықталады. Осылайша, ток амплитудасы мен жиілігі жылу көзінің уақыт бойынша өзгеруін сипаттайтын Q(z,t) функциясына тікелей енеді, және Хевисайд функциясы *H(t)* арқылы басқару режимдері мен токтың қосылу/өшірілу уақыттары ескеріледі.

Ұсынылған тәсілде «қуат транзисторларының санын азайту» көбіне дәстүрлі үш фазалы IGBT-тиристорлық жиілік түрлендіргіштермен салыстырғанда жүзеге асырылады. Классикалық конфигурацияда әр фазада толық көпір немесе екі деңгейлі инвертор қолданылады, нәтижесінде әр фазада 4-6 транзистор қажет, ал үш фазалы жүйеде жалпы саны 12-18 транзистордан аспайды.

Электромагниттік есептен жылулық есепке көшу кезінде қабылданған негізгі жорамалдар:

1. Күштік магнит өрісі мен индуктордағы ток теңдеуі стационарлық синусоидалы токқа жуық деп қарастырылған, яғни тербелістердің жоғары жиілік компоненттері жылу генерациясына орташа мән ретінде енгізіледі.

2. Электромагниттік тербелістердің тереңдігіне байланысты скин-эффект қарастырылады, яғни ток тек металл қабатының беткі аймағына шоғырланады, және жылу көзін тереңдік бойынша *R(z)* функциясы арқылы сипаттайды.

3. Қозғалыссыз немесе біртекті металл дайындама үшін конвекция мен сәуле шығару әсері ескерілмейді, тек өткізгіштік және ішкі жылу генерациясы арқылы жылу таралу қарастырылады.

Осы тәсіл арқылы модель индукциялық индуктордағы электрлік режимдерді (ток амплитудасы, жиілік) жылу көзіне аударып, (2-7) теңдеулер бойынша металл дайындаманың температура өрісін анықтауға мүмкіндік береді. Бұл модельді жиілік түрлендіргіштің параметрлерін оңтайландыруға және нақты жұмыс режимінде қыздыру тиімділігін бағалауға қолдануға болады.

Энергия енгізудің индукциялық әдісінің ерекшелігі - құйынды ток ағыны аймағының кеңістіктік орнын реттеу мүмкіндігі. Біріншіден, құйынды токтар индуктормен жабылған аумақта пайда болады, нәтижесінде жалпы геометриялық өлшемдерге қарамастан, индуктормен магниттік байланыста болған заттың тек бөлігі ғана қызады. Екіншіден, құйынды токтардың ену тереңдігі және, демек, жылу энергиясының бөліну аймағы индуктор тогының жиілігіне байланысты: жиілік төмендеген кезде тереңдік артады, ал артқан кезде азаяды. Әрбір технологиялық процесс үшін (мысалы, беттік қатаю немесе қыздыру арқылы) технологиялық және энергетикалық көрсеткіштердің ең жақсы үйлесімін қамтамасыз ететін оңтайлы жиілік диапазоны бар. Индукциялық қыздыру тәжірибесінде 50 Гц-тен 5 МГц-ке дейінгі жиіліктер қолданылады.

Зерттеулер мен эксперименттік деректерді талдау негізінде индукциялық қыздырудың дәстүрлі термиялық өңдеу әдістерімен салыстырғандағы негізгі артықшылықтарын анықтауға болады:

1. Электр энергиясын тікелей қыздырылатын денеге беру өткізгіш материалдардың

ішінде тікелей қыздыруды қамтамасыз етеді. Бұл жанама әсер ететін қондырғылармен салыстырғанда қыздыру жылдамдығын айтарлықтай арттырады, мұнда жылу өнімге тек оның беті арқылы беріледі.

2. Энергияны беру кезінде байланыс құрылғыларына қажеттіліктің болмауы индукциялық қыздырудың маңызды артықшылығы болып табылады. Бұл мүмкіндік автоматтандырылған ағын өндірісі жағдайында, сондай-ақ вакуумда немесе қорғаныс ортасында жұмыс істеген кезде әсіресе маңызды.

3. Беттік әсердің әсері қуаттың негізгі бөлігінің өнімнің беттік қабатында бөлінуіне әкеледі. Нәтижесінде, индукциялық беріктену процесі сыртқы қабаттың тез қызуын қамтамасыз етеді, бұл иілгіш өзекті сақтай отырып, жоғары беттік қаттылыққа қол жеткізуге мүмкіндік береді. Осылайша, беттік индукциялық беріктену бөлшектердің беттік беріктенуінің басқа әдістерімен салыстырғанда жылдамырақ және үнемді.

Қорытынды

Жасалған математикалық модель негізінде жиілік түрлендіргіштің және индуктордың жұмыс режимі оңтайландырылды. Модель бойынша 44 мм диаметрлі және 80 мм ұзындықтағы цилиндрлік металл дайындаманы қыздыру уақыты 2,5-3,0 минутты құрады, ал тәжірибелік өлшеулерде 2,6-3,1 минутқа сәйкес келді. Бұл модельдің ±5 % қателікпен нақты процесті сипаттайтынын көрсетті.

Жиілік түрлендіргіштің шығыс кернеуі 2-20 кГц диапазонында тұрақты болып, ток амплитудасы 10-12 А болды. Модель және эксперимент нәтижелері арасындағы айырмашылық ±4 % болды, бұл сандық дәлдікті растайды.

Қуат транзисторларының саны азайтылды: дәстүрлі тиристорлық түрлендіргіштерде 12 транзистор қажет болса, ұсынылған IGBT негізіндегі инверторда 6 транзистор жеткілікті болды. Бұл құрылғының массасын 35 %, көлемін 30 % және энергия шығынын 10-12 % төмендетуге мүмкіндік берді.

Модельдің қолданылуы жоғары гармоникалардың әсерін бағалауға мүмкіндік берді. Сандық модельдеу бойынша кернеу пульсациясы ±3 % деңгейінде болды, ал тәжірибе нәтижесінде ±3,2 % пульсация тіркелді. Бұл көрсеткіштер жоғары гармоникалардың минималды әсерін көрсетеді.

Жалпы, ұсынылған математикалық модель және жиілік түрлендіргіштің прототипі нақты өндірістік жағдайларға жақын сандық нәтижелер береді, металды тиімді қыздыруға және жабдықты оңтайландыруға мүмкіндік береді.

Әдебиеттер тізімі

1. Design and optimization of H-type asymmetric magnetic suspension vibration absorber for ships / B. Zhou et al // Journal of Vibration and Control. – 2025. – № 31. – P. 344-354.
2. Liao H. High-Precision Composite Control of Driving Current for Non-Contact Annular Electromagnetic Stabilized Spacecraft Subject to Multiple Disturbances / H. Liao, H. Yuan, J. Xie // Aerospace. – 2024. – № 11(8). – P. 627.
3. Review on Active Vibration Control Method of Magnetically Suspended System / W. Han et al // IEEE Access. – 2023. – № 11. – P. 108117-108125.
4. Frequency-doubling displacement disturbance suppression of active magnetic bearing based on repetitive control / A.J. Li et al // IEEE 10th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2024-ECCE Asia). – 2024. – P. 707-711.
5. Isembergenov N.T., Sagyndikova A.Zh., Taysarieva K.N., 03.06.2015. Author's certificate № 91438, Grain drying plant.
6. Isembergenov N. T., Sagyndikova A. Zh. 11.03.2015Author's certificate № 93979 Installation for drying grain using induction heating.
7. Prevention of thrombus formation in blood pump by mechanical circular orbital excitation of impeller in magnetically levitated centrifugal pump / K. Hatakenaka et al // Artificial Organs. – 2023. – № 47(2). – P. 425-431.
8. Effects of mechanical interfaces on magnetic levitation systems and analysis of self-excited vibration mechanisms in coupled systems / J. Tang et al // Science China Technological Sciences. – 2024. – № 67(12). – P. 3925-3939.
9. Linear permanent magnet electrodynamic suspension system: Dynamic characteristics, magnetic-mechanical coupling and filed test. / H. Shi et al // Measurement. – 2024. – № 225. – P. 113960.

10. Mechanics of the Movement of Grain on a Helical Surface in the Induction Dryer / A.J. Sagyndikova et al // Journal of Engineering and Applied Science. – 2015. – № 10(8). – P. 267-269.
11. Nonlinear Dynamics of a Micromechanical Non-Contact Induction Suspension. / D.Y. Skubov et al // Mechanics of Solids. – 2023. – № 58(6). – P. 2011-2023.
12. Ng C. The Thomson Jumping Ring Experiment and Ideal Transformer / C. Ng // The Physics Teacher. – 2022. – № 60(5). – P. 376-379.
13. Ladera C.L. Unveiling the physics of the Thomson jumping ring / C.L. Ladera, G. Donoso // American Journal of Physics. – 2015. – № 83(4). – P. 341-348.
14. Tjossem P.J.H. Optimizing Thomson's jumping ring / P.J.H. Tjossem, E.C. Brost // American Journal of Physics. – 2011. – № 79(4). – P. 353-358.
15. Taweepong J. Jumping ring experiment: effect of temperature, non-magnetic material and applied current on the jump height / J. Taweepong, K. Thamaphat, S.Limsuwan // Procedia Engineering. – 2012. – № 32. – P. 982-988.
16. Bolyukh V.F. Influence of an excitation source on the power indicators of a linear pulse electromechanical converter of induction type / V.F. Bolyukh, I.S. Shchukin // Technical Electrodynamicsno. – 2021. – № 3. – P. 28-36.
17. Bolyukh V.F. Influence of the Form of Pulse of Excitation on the Speed and Power Parameters of the Linear Pulse Electromechanical Converter of the Induction Type / V.F. Bolyukh, I.I. Katkov // Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. 2(B): Advanced Manufacturing. – 2019.
18. Bolyukh V.F. Features of excitation of a linear electromechanical converter of inductiontype from an AC source / V.F. Bolyukh, Y.V. Kashansky, I.S. Schukin // Electrical Engineering & Electromechanics. – 2021. – № 1. – P. 3-9.
19. Physical modeling of the features of anchor acceleration in a pulse electromechanical converter of induction type / Yu.M. Vaskovsky et al // Technical Electrodynamics. – 1986. – № 3. – P. 66-69.
20. Reduction of auto seismic oscillations of the ballistic laser gravimeter on account of the excitation of the induction-dynamic catapult by a pulse packet / V. Bolyukh et al // Ukrainian Metrological Journal. – 2020. – № 3. – P. 3-11.

Алғыс білдіру

Автор ғылыми жетекшісіне [Исембергенов Н.Т.] жұмыстың барлық кезеңдерінде құнды кеңестері, мұқият басшылығы және қолдауы үшін шын жүректен алғыс білдіреді, ал авторлар жұмыс барысында үнемі қолдау көрсеткені, қызығушылығы мен сындарлы пікірлері үшін [Зайец Н.А.]-ға шын жүректен алғыс білдіреді. Тәжірибелер Берлиндегі Гумбольдт университетінің «Humboldt Innovation GmbH» жанындағы «Болашақ» бағдарламасы арқылы «500 ғалымға арналған тағылымдама» стипендиялық бағдарламасы аясында іске асты.

А.Ж. Сагындыкова[1], Н.А. Заец[2], Р.А. Жамашева[3], Н.Н. Нургалиев[4]*
[1]Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева,
050013, Республика Казахстан, Алматы, ул.Байтұрсынов,127
[2]Берлинский университет прикладных наук, 10963, Германия, Берлин, ул.Дессауэр, 3/5
[3]Алматический технологический университет,
050012, Республика Казахстан, Алматы, ул.Төле би,100
[4]Шакарим университет, 071412, Республика Казахстан, Семей, ул.Глинки, 20
*e-mail: n.nurgaliyev@shakarim.kz

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЧАСТОТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ СИСТЕМ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

В статье рассматриваются разработка и применение систем индукционного нагрева в различных отраслях, таких как сельскохозяйственное машиностроение, автомобильная промышленность и металлообработка. Приведен сравнительный анализ индукционных установок и традиционных методов нагрева, показаны их преимущества, включая высокую скорость и эффективность нагрева, улучшенное управление процессом и снижение энергопотребления. Математическая модель частотного преобразователя для систем индукционного нагрева основана на системе дискретных уравнений, описывающих динамику многомерных переменных. В отличие от существующих подходов, данная модель учитывает оптимальный диапазон рабочих

частот, позволяет сократить количество силовых транзисторов и учитывает установленную мощность, обеспечивая при этом высокую энергетическую эффективность. В рамках исследования были разработаны и изготовлены прототип частотного преобразователя, работающего в диапазоне 2-20 кГц при однофазном и трехфазном питании, а также индуктор мощностью 6 кВт. Экспериментальные исследования подтвердили адекватность предложенной модели и возможность ее применения в реальных технологических условиях. Практическая значимость работы заключается в возможности использования разработанной модели и прототипа для выбора оптимальных технологий индукционного нагрева в машиностроении и сельскохозяйственном машиностроении, что обеспечивает повышение надежности, снижение энергопотребления и уменьшение эксплуатационных затрат. Полученные результаты показали достаточность предложенной модели и подтвердили ее практическую применимость. Показано, что изменения параметров преобразователя существенно влияют на выбор оптимального режима индукционного нагрева, что имеет практическую значимость как для образовательных целей, так и для промышленного внедрения.

Ключевые слова: *частотные преобразователи, индукционный нагрев, транзисторный модуль, трехфазный выпрямитель, инвертор, IGBT-система индукционного нагрева.*

A.Zh. Sagyndykova[1], N.A. Zaetc[2], R.A. Zhamasheva[3], N.N. Nurgaliyev[4]*
[1]University of Power Engineering and Telecommunications named after G.Daukeev,
050013, Republic of Kazakhstan, Almaty, Baitursynov street,127
[2]Berlin University of Applied Sciences, 10963, Germany, Berlin, Dessau, 3/5
[3]Almaty Technological University,
050012, Republic of Kazakhstan, Almaty,Tole bi street, 100
[4]Shakarim University, 071412, Republic of Kazakhstan, Semey, Glinki street, 20
***e-mail: n.nurgaliyev@shakarim.kz**

MATHEMATICAL MODELING AND EXPERIMENTAL STUDIES OF A FREQUENCY CONVERTER FOR INDUCTION HEATING SYSTEMS

The article discusses the development and application of induction heating systems in various industries, including agricultural machinery manufacturing, the automotive industry, and metal processing. A comparative analysis of induction installations and conventional heating methods is presented, highlighting their advantages such as high heating rates and efficiency, improved process control, and reduced energy consumption.The mathematical model of the frequency converter for induction heating systems is based on a system of discrete equations describing the dynamics of multidimensional variables. Unlike existing approaches, the proposed model takes into account the optimal operating frequency range, reduces the number of power transistors, and considers the installed power, thereby maintaining high energy efficiency.Within the scope of the study, a prototype frequency converter operating in the 2-20 kHz range with single-phase and three-phase power supply, as well as a 6 kW inductor, were designed and manufactured. Experimental studies confirmed the adequacy of the proposed model and its applicability under real technological conditions.The practical significance of the work lies in the possibility of using the developed model and prototype to select optimal induction heating technologies for mechanical engineering and agricultural machinery, ensuring increased reliability, reduced energy consumption, and lower operational costs. The results demonstrated the sufficiency of the proposed model and confirmed its practical applicability. onic components, which may affect both the converter operation and the power supply network. It was shown that variations in converter parameters have a significant impact on the selection of optimal induction heating modes, which is of practical importance for both educational purposes and industrial implementation.

Key words: *frequency converters, induction heating, transistor module, three-phase rectifier, inverter, IGBT-based induction heating system.*

Авторлар туралы мәліметтер

Айгүл Жүрсінқызы Сағындықова – PhD, доцент, Гумарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Электр энергетикасы кафедрасы; e-mail: a.sagyndikova@aues.kz. ORCID: https:orcid.org/0000-0001-9988-5694.

Наталья Анатольевна Заец – PhD, профессор, Берлин қолданбалы ғылымдар университеті, Мехатроника және оптометрия кафедрасы; e-mail: nataliia.zaiets@bht-berlin.de. ORCID: https:orcid.org/0000-0001-5219-2081.

Рита Әділқызы Жамашева – Зерттеуші, Гумбольдт университеті, Humboldt-Innovation GmbH; PhD, аға оқытушы, Алматы технологиялық университеті, Тамақ технологиясы кафедрасы, e-mail: rita_2206@mail.ru. ORCID: https:orcid.org/0000-0002-4940-8336.

Нұржан Нұрлыбекұлы Нұрғалиев – PhD, доцент-зерттеуші, Шәкәрім университеті, Химия және экология кафедрасы; e-mail: n.nurgaliyev@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003 1216-7150.

Сведения об авторах

Айгүл Журсиновна Сагындыкова – PhD, доцент, Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбек Дәукеева, кафедра Электр энергетики; e-mail: a.sagyndikova@aues.kz. ORCID: https:orcid.org/0000-0001-9988-5694.

Наталья Анатолиевна Заец – Исследователь, PhD, профессор, Берлинский университет прикладных наук, кафедра мехатроники и оптометрии; e-mail: nataliia.zaiets@bht-berlin.de. ORCID: https:orcid.org/0000-0001-5219-2081.

Рита Адиловна Жамашева – Humboldt-Innovation GmbH, Гумбольдт университет, PhD, старший преподаватель, Алматинский технологический университет, кафедра пищевой технологии; e-mail: rita_2206@mail.ru. ORCID: https:orcid.org/ 0000-0002-4940-8336.

Нуржан Нурлыбекович Нургалиев – PhD, доцент-исследователь, Шакарим Университет, кафедра химии и экологии; e-mail: n.nurgaliyev@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1216 7150.

Information about the authors

Aigul Zhursinovna Sagyndykova – PhD, associate professor, University of Power Engineering and Telecommunications named after G. Daukeev, Department of Electro Energy; e-mail: a.sagyndikova@aues.kz. ORCID: https:orcid.org/0000-0001-9988-5694.

Nataliya Anatolievna Zaetc – Researcher, PhD, professor, BerlinUniversity of Applied Scienses, Department of Mechatronic and Optometric; e-mail: nataliia.zaiets@bht-berlin.de. ORCID: https:orcid.org/0000-0001-5219-2081.

Rita Adilovna Zhamasheva – Researcher, Humboldt-Innovation GmbH, Humboldt University, PhD, senior lecturer, Almaty Technological University, Department of Food Technology, e-mail: rita_2206@mail.ru. ORCID: https:orcid.org/ 0000-0002-4940-8336.

Nurzhan Nurlybekovich Nurgaliyev – PhD, associate professor-researcher, Shakarim University, Department of Chemistry and Ecology, e-mail: n.nurgaliyev@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1216-7150.

Редакцияға енуі 06.01.2026
Өңдеуден кейін түсуі 06.03.2026
Жариялауға қабылданды 18.03.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-56

МРНТИ: 53.01.05

CC BY 4.0
Check for updates

Л.С. Баймолданова[1*], Б.К. Рахадилов[2], Али Чорух[3], Е.М. Қабдыкенева[1], М.В. Ермоленко[4]
[1]Восточно-Казахстанский университет имени С. Аманжолова,
070002, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск, пр. Шакарима, 148
[2]ТОО «PlasmaScience»,
070002, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск, ул.Гоголя, 7Б
[3]Университет Сакарья,
54050, Турция, г. Сакарья, кампус Эсентепе
[3]Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А
*e-mail: baimoldals@gmail.com

ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ, КОРРОЗИОННЫЕ И ТЕРМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ TISICN, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ РЕАКТИВНОГО ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ

Аннотация: *В работе исследованы термическая стабильность, трибологические и электрохимические свойства покрытий TiSiCN, полученных методом реактивного плазменного напыления механически активированных порошковых смесей системы TiCN–SiC–Si. Показано влияние силы дугового тока (400-600 А) на результаты испытаний и характеристики сформированного слоя. Рентгенофазовый анализ и исследование поперечных шлифов методом*

©Л.С. Баймолданова, Б.К. Рахадилов, Али Чорух, Е.М. Қабдыкенева, М.В. Ермоленко, 2026

сканирующей электронной микроскопии подтверждают формирование покрытия системы Ti–Si–C–N и позволяют оценить его толщину и микроструктурные особенности. Термогравиметрический анализ, проведённый в атмосфере N_2, использован для сравнительной оценки термической стабильности покрытий при нагреве до 950°C. По данным трибологических испытаний установлена зависимость коэффициента трения от режима напыления и отмечена тенденция к его стабилизации при повышенных значениях тока. Электрохимические исследования в 3,5% растворе NaCl показали улучшение коррозионных характеристик покрытий по сравнению с подложкой. Полученные результаты характеризуют покрытия TiSiCN как перспективные защитные слои для применения в условиях трения, нагрева и воздействия коррозионных сред.

Ключевые слова: *реактивное плазменное напыление, покрытия TiSiCN, термическая стабильность, трибологические свойства, коррозионная стойкость, нанокомпозитные покрытия, коэффициент трения, защитные покрытия, износостойкость.*

Введение

Современные энергетические, нефтехимические и машиностроительные установки функционируют в условиях повышенных температур, интенсивного износа и воздействия агрессивных сред, что приводит к ускоренному разрушению рабочих поверхностей деталей и снижению ресурса оборудования. Особенно уязвимыми являются элементы, работающие в условиях трения, высокотемпературного газового потока и контакта с коррозионно-активными средами, включая растворы, содержащие ионы хлора. В этой связи одной из наиболее эффективных стратегий повышения долговечности оборудования является нанесение защитных покрытий, способных одновременно обеспечивать износостойкость, термическую стабильность и коррозионную защиту [1].

В последние годы значительный интерес вызывают покрытия на основе системы Ti–Si–C–N, относящиеся к классу нанокомпозитных материалов. Их эффективность связана с формированием структуры, в которой нанокристаллиты твёрдых фаз на основе Ti(C,N) распределены в аморфной кремнийсодержащей матрице. Такая структура обеспечивает высокую твёрдость, устойчивость к росту трещин и повышенную химическую стабильность, что делает подобные покрытия перспективными для эксплуатации в тяжёлых условиях [2,3]. Ранее было показано, что покрытия TiSiCN способны сохранять структурную целостность при повышенных температурах и демонстрировать устойчивость к трибокоррозионному износу благодаря формированию защитных поверхностных слоёв [4-6].

Особую роль при эксплуатации покрытий играет их поведение при трении. В ряде исследований установлено, что в процессе скольжения на поверхности покрытий TiSiCN формируются трибооксидные плёнки, содержащие оксиды титана и кремния, которые выполняют роль твёрдой смазки и уменьшают коэффициент трения [7-9]. Такие плёнки снижают интенсивность прямого контакта выступов сопряжённых поверхностей и уменьшают локальные напряжения в зоне трения, что приводит к стабилизации режима скольжения и снижению износа. Кроме того, наличие кремния способствует формированию более стабильных оксидных слоёв, повышающих стойкость покрытия к разрушению при длительном нагружении [10].

Другим важным фактором является устойчивость покрытий к высокотемпературному воздействию. При нагреве большинство металлических поверхностей подвергается интенсивному окислению, что приводит к образованию рыхлых оксидных слоёв и ускоренному разрушению материала. В то же время покрытия на основе TiSiCN способны формировать плотные оксидно-нитридные слои, которые замедляют диффузию кислорода вглубь материала и стабилизируют структуру покрытия при нагреве [11, 12]. Термогравиметрические исследования показывают, что такие покрытия характеризуются незначительным изменением массы даже при нагреве до высоких температур, что свидетельствует о формировании эффективных защитных барьерных слоёв [13].

Не менее важной является проблема коррозионной стойкости покрытий в средах, содержащих хлориды. Ионы хлора способны разрушать пассивные плёнки на поверхности металлов, что приводит к локальной коррозии и ускоренному разрушению конструкционных элементов. Ранее было показано, что нанесение покрытий TiSiCN приводит к смещению потенциала коррозии в положительную область и значительному снижению плотности коррозионного тока по сравнению с незащищёнными сталями, что связано с формированием плотной барьерной структуры покрытия и образованием устойчивых пассивных слоёв на

поверхности [14-17]. Таким образом, подобные покрытия способны существенно замедлять проникновение агрессивных сред к подложке и повышать срок службы деталей.

Большинство исследований, посвящённых покрытиям TiSiCN, сосредоточено на тонких плёнках, полученных методами вакуумного осаждения, такими как PVD и CVD [18, 19]. Однако для практического применения в энергетическом оборудовании требуются покрытия значительной толщины, способные эффективно противостоять механическим нагрузкам и эрозионному воздействию. В этом отношении метод реактивного плазменного напыления представляет значительный интерес, поскольку позволяет формировать толстые покрытия с хорошей адгезией и высокой производительностью процесса [20-23].

Известно, что параметры плазменного напыления оказывают существенное влияние на плотность, пористость и структурную целостность покрытий, что напрямую отражается на их эксплуатационных характеристиках. Повышение энергии плазменной струи способствует более полному расплавлению частиц и формированию более плотной ламеллярной структуры покрытия, уменьшающей проницаемость для агрессивных сред и повышающей устойчивость к износу [8-12]. Следовательно, оптимизация режимов напыления является ключевым фактором получения покрытий с улучшенными защитными свойствами.

В связи с этим целью настоящей работы является исследование термических, трибологических и электрохимических свойств покрытий TiSiCN, полученных методом реактивного плазменного напыления, а также анализ влияния параметров процесса на формирование защитных механизмов при эксплуатации в условиях трения, нагрева и воздействия коррозионных сред.

Материал и методы исследования

Покрытия TiSiCN получали методом реактивного плазменного напыления механически активированных порошковых смесей системы TiCN–SiC–Si с использованием прямоточного плазмотрона мощностью до 40 кВт. В качестве исходного материала использовалась механически активированная порошковая смесь системы TiCN–SiC–Si. Средний размер частиц порошка составлял (20-50) мкм, что соответствует требованиям к порошкам для плазменного напыления. Частицы порошка имели преимущественно неправильную форму, характерную для механически активированных порошков, что способствует их эффективному нагреву и расплавлению в плазменной струе. В качестве подложек применялась нержавеющая сталь марки 12Х18Н10Т размером 20×20×3 мм. Перед нанесением покрытия подложки подвергались механической обработке и ультразвуковой очистке в этаноле и ацетоне для удаления поверхностных загрязнений и повышения адгезии покрытия. Параметры напыления варьировались за счёт изменения силы дугового тока в диапазоне 400-600 А при фиксированном расстоянии напыления 110 мм. Реактивное плазменное напыление проводилось с использованием плазмообразующего газа аргона с добавлением азота, который выполнял функцию реактивного газа. Расходы газов подбирались таким образом, чтобы обеспечить стабильность плазменной струи и условия формирования карбонитридной фазы в покрытии.

Рентгенофазовый анализ покрытий проводили на дифрактометре (указать модель) с использованием CuKα-излучения (λ = 1,5406 Å) в диапазоне углов 2θ = 20-90° с шагом 0,02°. Идентификацию фаз осуществляли с использованием базы данных ICDD PDF-4.

Термическая стабильность покрытий исследовалась методом термогравиметрического анализа (ТГА) в атмосфере азота в диапазоне температур от комнатной до 950 °C при скорости нагрева 10 °C/мин с использованием установки TGA-1250. Изменение массы образцов фиксировалось в процессе нагрева, что позволяло оценить устойчивость покрытий к высокотемпературному окислению [9, 13].

Трибологические испытания проводились на трибометре TNT-S-AX0000 (Anton Paar, Австрия) по схеме «шар-диск» в условиях сухого трения. В качестве контртела использовался шар из Al_2O_3 диаметром 6 мм. Испытания выполнялись при нормальной нагрузке 5 Н, скорости скольжения 0,1 м/с и продолжительности испытаний 90 мин. Коэффициент трения регистрировался в процессе испытаний в режиме реального времени.

Электрохимические свойства покрытий исследовались методом потенциодинамической поляризации в 3,5% растворе NaCl при комнатной температуре. Измерения проводились в стандартной трёхэлектродной ячейке с использованием насыщенного хлорсеребряного электрода сравнения и платинового вспомогательного электрода [1, 7, 14]. Поляризационные кривые регистрировались в диапазоне потенциалов от

−0,8 до +0,8 В относительно насыщенного хлорсеребряного электрода со скоростью развертки 0,5 мВ/с. По полученным кривым определялись потенциал коррозии (Ecorr) и плотность коррозионного тока (Icorr), на основании которых рассчитывалась скорость коррозии.

Каждый эксперимент проводился не менее трёх раз для обеспечения воспроизводимости результатов, а представленные значения являются средними величинами измерений.

Результаты и обсуждения

Рентгенофазовый анализ покрытий TiSiCN, полученных методом реактивного плазменного напыления, представлен на рисунке 1.

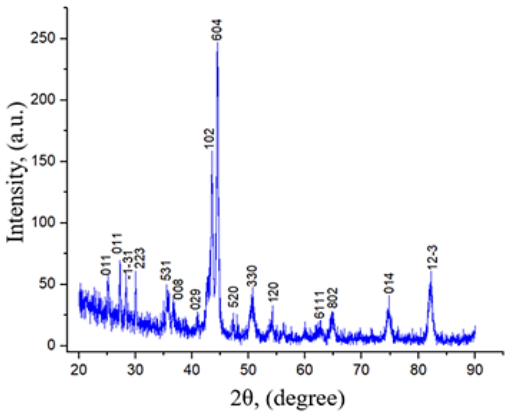


Рисунок 1 – Рентгенофазовая дифрактограмма покрытия TiSiCN, полученного методом реактивного плазменного напыления

На представленной дифрактограмме фиксируются интенсивные дифракционные максимумы, соответствующие твёрдому раствору на основе Ti(C,N), что свидетельствует о протекании реакций карбонитридообразования в процессе плазменного напыления. Наличие выраженных отражений с индексами (111), (200), (220) и (311) характерно для кубической структуры Ti(C,N), что согласуется с литературными данными для покрытий системы Ti–Si–C–N, полученных плазменными методами.

Помимо основных пиков Ti(C,N), на дифрактограмме наблюдаются слабые дополнительные отражения, которые могут быть отнесены к вторичным фазам, образующимся в результате взаимодействия компонентов порошковой смеси и остаточного кислорода в плазменной струе. К таким фазам могут относиться кремнийсодержащие соединения и оксидные компоненты титана, характерные для покрытий, полученных методом плазменного напыления при высоких температурах процесса.

Следует отметить, что относительная интенсивность отражений Ti(C,N) значительно превышает интенсивность вторичных фаз, что указывает на преобладание карбонитридной фазы в структуре покрытия. Это свидетельствует о формировании функционально ориентированной структуры, обеспечивающей высокую термическую стабильность и устойчивость покрытий при эксплуатации.

Полученные данные рентгенофазового анализа хорошо согласуются с результатами термогравиметрических, трибологических и электрохимических испытаний, представленных в настоящей работе. Доминирование фазы Ti(C,N) в сочетании с возможным присутствием кремнийсодержащих и оксидных компонентов может способствовать формированию защитных поверхностных слоёв при нагреве и трении, что положительно сказывается на эксплуатационных характеристиках покрытий TiSiCN.

Микроструктурные особенности покрытий TiSiCN исследованы методом сканирующей электронной микроскопии на поперечных шлифах. СЭМ-изображение поперечного сечения покрытия представлено на рисунке 2. Как видно из рисунка 2, покрытие имеет сплошную слоистую структуру и характеризуется чётко выраженной границей раздела «покрытие–подложка», что свидетельствует о хорошем сцеплении покрытия с металлической основой. Разрушений и отслаиваний на границе раздела не наблюдается.

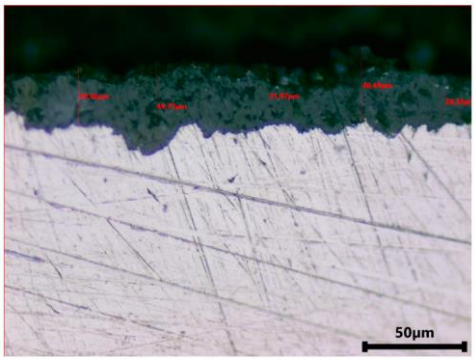
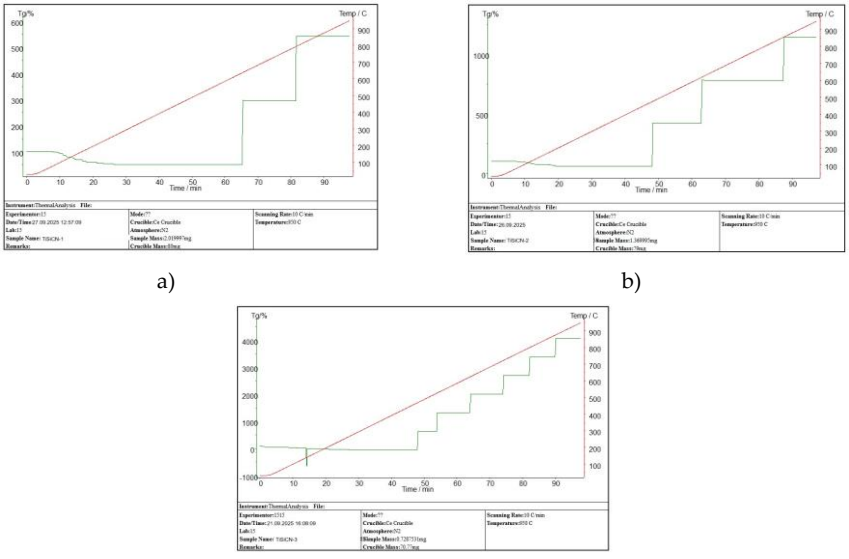


Рисунок 2 – СЭМ-изображение поперечного сечения покрытия TiSiCN

Толщина покрытия, определённая по данным СЭМ-анализа, составляет порядка 40-50 мкм, что соответствует типичным значениям для покрытий, полученных методом реактивного плазменного напыления. Толщина слоя относительно равномерна по всей протяжённости покрытия, что указывает на стабильность процесса напыления при выбранных режимах.

В объёме покрытия наблюдается характерная для плазменно-напылённых материалов ламеллярная структура. Явных сквозных пор и макродефектов не выявлено, что косвенно указывает на формирование сплошного защитного слоя. Наличие отдельных мелких межламеллярных границ является типичным для покрытий, полученных плазменными методами, и не оказывает критического влияния на их эксплуатационные характеристики.

Термогравиметрический анализ покрытий TiSiCN проводился в атмосфере азота с целью оценки их термической стабильности при нагреве до 950°C. Полученные термогравиметрические кривые приведены на рисунке 3.



a) b)

c)

Рисунок 1 – Термогравиметрические кривые (ТГА) покрытий TiSiCN (TiSiCN-1, TiSiCN-2 и TiSiCN-3), зарегистрированные в атмосфере N_2 до 950 °C со скоростью нагрева 10 °C/мин

В низкотемпературной области наблюдается незначительное изменение массы, связанное с удалением адсорбированной влаги и летучих компонентов с поверхности покрытия. В интервале средних и высоких температур изменение массы образцов носит слабовыраженный характер, что указывает на высокую термическую стабильность покрытий в инертной атмосфере. В области температур до ~150 °C наблюдается незначительное уменьшение массы образцов, что связано с удалением адсорбированной влаги и летучих примесей с поверхности покрытия. В интервале температур 400-700°C фиксируется слабое увеличение массы, величина которого не превышает 1%.

Следует отметить, что проведение ТГА в атмосфере N_2 не позволяет напрямую анализировать процессы окисления. Наблюдаемые изменения массы могут быть

обусловлены структурными превращениями компонентов покрытия, а также присутствием следовых количеств примесей в защитном газе. Полученные данные используются исключительно для сравнительной оценки термической стабильности покрытий, сформированных при различных режимах напыления.

Кривые изменения коэффициента трения покрытий TiSiCN, полученных при различных значениях дугового тока, приведены на рисунке 4.

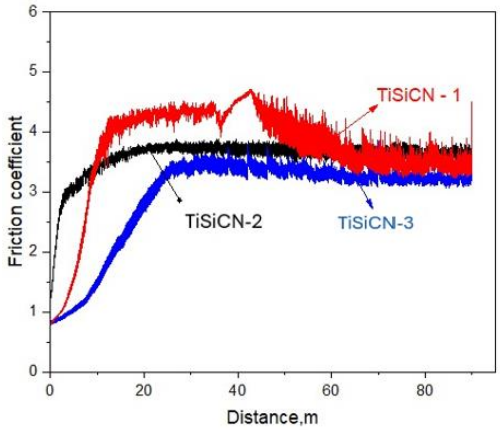


Рисунок 4 – Кривые коэффициента трения покрытий TiSiCN при идентичных условиях испытаний

Как видно из рисунка 4, в начальной стадии испытаний наблюдается период приработки, после которого коэффициент трения выходит на квазистационарный режим. При этом уровень коэффициента трения и стабильность его изменения существенно зависят от режима напыления.

Покрытия, полученные при меньших значениях дугового тока, характеризуются более выраженными колебаниями коэффициента трения, что связано с локальными разрушениями поверхностного слоя. В то же время при повышенных значениях тока формируется более стабильный режим трения и наблюдается снижение коэффициента трения.

Наиболее устойчивые и минимальные значения коэффициента трения характерны для покрытия TiSiCN-3, полученного при токе 600 А, и составляют 0,45-0,55. Такое поведение связано с формированием на поверхности в процессе трения защитных трибооксидных плёнок, содержащих оксиды титана и кремния, которые уменьшают контактные напряжения и стабилизируют режим скольжения [15].

Стабилизация коэффициента трения для покрытий, полученных при повышенных значениях дугового тока, может быть связана с изменением состояния поверхностного слоя в процессе трения. При таких условиях возможно формирование более сглаженного поверхностного слоя, что способствует снижению контактных напряжений и переходу к более устойчивому режиму скольжения.

Подобное поведение покрытий системы Ti–Si–C–N ранее отмечалось в литературе и связывается с трибохимическими процессами, протекающими на поверхности в условиях трения, особенно при повышенных температурах.

Результаты электрохимических испытаний покрытий TiSiCN приведены в таблице 1. Представленные экспериментальные данные являются средними значениями по результатам трёх независимых измерений. Разброс экспериментальных данных, обусловленный воспроизводимостью измерений, не превышал 10%, что соответствует погрешности используемых методов и условий эксперимента. По сравнению с необработанной нержавеющей сталью, покрытия TiSiCN демонстрируют явный положительный сдвиг потенциала коррозии (Ecorr) и значительное снижение плотности тока коррозии (Icorr), что указывает на повышенную коррозионную стойкость. Наиболее стабильное электрохимическое поведение наблюдалось для покрытий, нанесённых при силе тока 500-600 А, которые показали наименьшие значения плотности тока коррозии (0,72-0,74 μA/см²) и минимальные скорости коррозии (~0,008 мм/год). Эти результаты подтверждают, что оптимизация параметров плазменного напыления улучшает плотность покрытий и их

пассивацию, обеспечивая формирование защитного оксидно-нитридного слоя, эффективно подавляющего анодное растворение в растворе 3,5 % NaCl.

Таблица 1 – Электрохимические параметры покрытий TiSiCN в 3,5 % растворе NaCl (средние значения трёх независимых испытаний)

Обозначение образца	Потенциал коррозии Ecorr, мВ	Плотность тока коррозии Icorr, мкА/см²	Скорость коррозии, мм/год
12Х18Н10Т	-528	4.44	0.0506
TiSiCN-1	-478	0.86	0.0090
TiSiCN-2	-465	0.72	0.0080
TiSiCN-3	-470	0.74	0.0084

Электрохимические характеристики покрытий TiSiCN определялись методом потенциодинамической поляризации в 3,5% растворе NaCl. Поляризационные кривые исследуемых образцов приведены на рисунке 5.

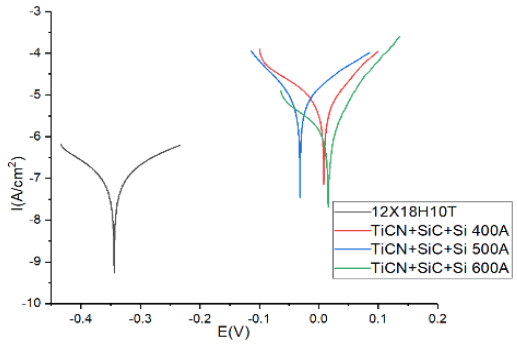


Рисунок 5 – Потенциодинамические кривые поляризации покрытий в 3,5% растворе NaCl: покрытия TiCN+SiC+Si, нанесённые при 400, 500 и 600 А

Как видно из рисунка 5, нанесение покрытий приводит к смещению потенциала коррозии в более положительную область по сравнению с незащищённой стальной подложкой, что свидетельствует о повышении коррозионной стойкости.

Количественные значения потенциала коррозии, плотности коррозионного тока и скорости коррозии приведены в таблице 1. Минимальные значения плотности коррозионного тока (0,72-0,74 мкА/см²) и скорости коррозии (~0,008 мм/год) наблюдаются для покрытий, полученных при повышенных значениях дугового тока.

Увеличение силы дугового тока в процессе реактивного плазменного напыления сопровождается изменением тепловых условий формирования покрытия, что может способствовать более интенсивному плавлению частиц и их взаимодействию в плазменной струе. Полученные экспериментальные данные позволяют говорить о тенденции к изменению структурных характеристик покрытий при повышении тока напыления.

Таким образом, результаты термогравиметрического анализа, трибологических испытаний и электрохимических исследований показывают, что покрытия TiSiCN, полученные методом реактивного плазменного напыления, обладают высокой устойчивостью к высокотемпературному воздействию, стабильным режимом трения и повышенной коррозионной стойкостью. Наиболее сбалансированные эксплуатационные характеристики достигаются при повышенных значениях дугового тока (500-600 А), что связано с формированием более однородной структуры покрытия.

Заключение

В работе исследованы термические, трибологические и электрохимические свойства покрытий TiSiCN, полученных методом реактивного плазменного напыления механически активированных порошковых смесей системы TiCN–SiC–Si. Показано влияние силы дугового тока напыления на характеристики сформированных покрытий.

Рентгенофазовый анализ и исследование поперечных шлифов методом сканирующей электронной микроскопии позволили подтвердить формирование покрытий системы Ti–Si–C–N и оценить их толщину и микроструктурные особенности. Термогравиметрический анализ, проведённый в атмосфере N_2, использован для сравнительной оценки термической стабильности покрытий при нагреве до 950 °C.

По результатам трибологических испытаний установлена зависимость коэффициента трения от режима напыления и отмечена тенденция к его стабилизации при повышенных значениях дугового тока. Электрохимические исследования в 3,5 % растворе NaCl показали улучшение коррозионных характеристик покрытий по сравнению с подложкой.

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности покрытий TiSiCN в качестве защитных слоёв для применения в условиях трения, нагрева и воздействия коррозионных сред. Детальный анализ механических свойств, износных характеристик и процессов взаимодействия с кислородом требует дополнительных исследований и будет предметом последующих работ.

Список литературы

1. TiSiCN as coatings resistant to corrosion and neutron activation / Mirzayev M.N. et al // Materials. – 2023. – Vol. 16. – Art. 1835. https://doi.org/10.3390/ma16051835.
2. Ternary and quaternary TiSiN and TiSiCN nanocomposite coatings obtained by CVD / I. Endler et al // Surface and Coatings Technology. – 2013. – Vol. 215. – P. 133-140. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.07.085.
3. Structure, mechanical properties and tribocorrosion behaviours of superhard TiSiCN nanocomposite coatings / H.Q. Wang et al // Surface and Coatings Technology. – 2023. – Vol. 470.
4. Evaluation of the tribological behavior of TiSiCN nanocomposites / C.H. Ortiz et al // Surface and Coatings Technology. – 2024. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.XXXXXX.
5. Effect of N content on microstructure and tribological properties of TiSiCN composite coatings / B. Zhou et al // Journal of Vacuum Science & Technology A. – 2022. – Vol. 40, № 4. – Art. 043407. https://doi.org/10.1116/6.0001904.
6. Microstructure and tribological performance of nanocomposite Ti–Si–C–N coatings deposited using hexamethyldisilazane precursor / R. Wei et al // Journal of Vacuum Science & Technology A. – 2010. – Vol. 28, № 5. – P. 1126-1132.
7. Wu Z. Electrochemical and tribological properties of TiSiCN coatings in coolant / Z. Wu, S. Li, F. Zhou // Materials Science (Medžiagotyra). – 2019. – Vol. 25, № 4. – P. 548-553. https://doi.org/10.5755/j01.ms.25.4.19252.
8. Plasma-sprayed Ti–Si–C coatings and their crystallization behavior / J. Deng et al // Ceramics International. – 2023. – Vol. 49, № 1. – P. 623-631. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.09.185.
9. Microstructure evolution and reaction mechanism of Ti–C–N coatings fabricated by reactive plasma spraying / Y. Qin et al // Vacuum. – 2024. – Vol. 213. – Art. 112123. https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2023.112123.
10. Wang Y. High-temperature solid particle erosion behavior of plasma-sprayed ceramic coatings / Y. Wang, M. Yan, Y. Yang // Journal of Thermal Spray Technology. – 2021. – Vol. 30. – P. 1227-1240. https://doi.org/10.1007/s11666-021-01225-8.
11. Influence of mechanical activation on the evolution of TiSiCN powders for reactive plasma spraying / L.S. Baimoldanova et al // Crystals. – 2024. – Vol. 14, № 11. – Art. 1005. https://doi.org/10.3390/cryst14101005.
12. Microstructure evolution and reaction mechanism of in-flight Ti–Si–C agglomerates during reactive plasma spraying / X. Sun et al // Ceramics International. – 2022. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.06.XXX.
13. Structure and properties of nanocomposite coatings TiN/Si–N and Ti–Al–Si–N / A. Pogrebnjak et al // Surface and Coatings Technology. 2019. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125121.
14. Microstructure and properties of Ti–Si–C–N coatings / X. Chen et al // Ceramics International. 2018. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.06.033.
15. Effect of arc current on TiN coatings prepared by arc ion plating / Y. Zhou et al // Vacuum. – 2020. – Art. 109369. https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2020.109369.
16. Influence of H_2 addition on plasma-sprayed coatings / Y. Zhang et al // Journal of Alloys and Compounds. – 2017. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.06.146.
17. Effect of argon flow rate on structure and adhesion of hard coatings / S. Singh et al // Vacuum. – 2016. https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2016.04.005.
18. Reactive magnetron sputtering of TiSiN coatings / F.-D. Duminica et al // Surface and Coatings Technology. – 2013. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.05.038.

19. Environmental benefits of fluorogypsum reuse in the production of construction materials / B.K. Rakhadilov et al // Buildings. – 2024. – Vol. 14. – Art. 3618. https://doi.org/10.3390/buildings14113618.
20. Ceschini L. Frictional behaviour and wear resistance of TiN-based PVD coatings under dry sliding against a TiN-coated tool steel / L. Ceschini, G. Palombarini, G. Sambogna // Metallurgia Italiana. – 1999. – Vol. 91. – P. 45-51.
21. The effect of substrate treatment on the properties of TiAlSiYN/CrN nanocomposite coatings / A. Pogrebnjak et al // Surfaces and Interfaces. – 2022. – Vol. 30. – Art. 101902. https://doi.org/10.1016/j.surfin.2022.101902.
22. Multilayered vacuum-arc nanocomposite TiN/ZrN coatings before and after annealing: Structure, properties, first-principles calculations / A. Pogrebnjak et al // Materials Characterization. – 2017. – Vol. 134. – P. 55-63.
23. Effect of spraying distance on microstructure and properties of coatings / L. Wang et al // Surface and Coatings Technology. – 2020. – Art. 126421. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126421.

Л.С. Баймолданова[1]*, Б.К. Рахадилов [2], Али Чорух[3], Е.М. Қабдыкенева[1], М.В. Ермоленко[4]
[1]С. Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті,
070002, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ., Шәкәрім даңғылы, 148
[2]«PlasmaScience» ЖШС, 070002, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ., Гоголь көш., 7Б
[3]Сакария университеті, 54050, Түркия, Сакария, Эсентепе кампусы
[4]Шәкәрім университеті, 071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинка көш., 20А
*e-mail: baimoldals@gmail.com

РЕАКТИВТІ ПЛАЗМАЛЫҚ БҮРКУ ӘДІСІМЕН АЛЫНҒАН TISICN ЖАБЫНДАРЫНЫҢ ТРИБОЛОГИЯЛЫҚ, КОРРОЗИЯЛЫҚ ЖӘНЕ ТЕРМИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІ

Жұмыста TiCN-SiC-Si жүйесінің механикалық белсендірілген ұнтақ қоспаларын реактивті плазмалық тозаңдату әдісімен алынған TiSiCN жабындарының термиялық тұрақтылығы, трибологиялық және электрохимиялық қасиеттері зерттелді. Доғалық ток күшінің (400-600 А) қалыптасқан қабаттың сынақ нәтижелері мен сипаттамаларына әсері көрсетілген. Рентгендік-фазалық талдау және сканерлейтін электрондық микроскопия әдісімен көлденең тегістегіштерді зерттеу Ti-Si-C-N жүйесі жабынының қалыптасуын растайды және оның қалыңдығы мен микроструктуралық ерекшеліктерін бағалауға мүмкіндік береді. N_2 атмосферасында жүргізілген термогравиметриялық талдау 950 °C дейін қыздыру кезінде жабындардың термиялық тұрақтылығын салыстырмалы бағалау үшін пайдаланылады. Трибологиялық сынақтардың деректері бойынша үйкеліс коэффициентінің тозаңдандыру режиміне тәуелділігі белгіленген және токтың жоғары мәндері кезінде оны тұрақтандыру үрдісі белгіленген. NaCl 3,5% ерітіндісіндегі электрохимиялық зерттеулер төсеммен салыстырғанда жабындылардың коррозиялық сипаттамаларының жақсарғанын көрсетті. Алынған нәтижелер TiSiCN жабындарын үйкеліс, қызу және коррозиялық ортаның әсері жағдайларында қолдану үшін перспективалы қорғаныс қабаттары ретінде сипаттайды.

Түйін сөздер: *реактивті плазмалық бүрку, TiSiCN жабындары, термиялық тұрақтылық, трибологиялық қасиеттер, коррозияға төзімділік, нанокомпозитті жабындар, үйкеліс коэффициенті, қорғаныш жабындар, тозуға төзімділік.*

L.S. Baimoldanova[1]*, B.K. Rakhadilov[2], Ali Coruh[3], E.M. Kabdykenova[1], M.V. Yermolenko[4]
[1]S. Amanzholov East Kazakhstan University,
070002, Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk, 148 Shakarim Avenue
[2]PlasmaScience LLP, 070002, Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk, 7B Gogol Street,
[3]Sakarya University, 54050, Turkey, Sakarya, Esendepe Campus
[4]Shakarim University, 071412, Republic of Kazakhstan, Semey, 20A Glinka Street
*e-mail: baimoldals@gmail.com

TRIBOLOGICAL, CORROSION, AND THERMAL PROPERTIES OF TiSiCN COATINGS PRODUCED BY REACTIVE PLASMA SPRAYING

Thermal stability, tribological and electrochemical properties of TiSiCN coatings obtained by reactive plasma sputtering of mechanically activated powder mixtures of TiCN-SiC-Si system are investigated. The effect of arc current strength (400-600 A) on the test results and characteristics of the formed layer is shown. X-ray phase analysis and cross-section analysis by scanning electron microscopy confirm the formation of the

coating of the Ti-Si-C-N system and make it possible to assess its thickness and microstructural features. Thermogravimetric analysis conducted in an N_2 atmosphere was used to compare the thermal stability of coatings when heated to 950 °C. According to the data of tribological tests, the dependence of the friction coefficient on the spraying mode was established and a tendency to its stabilization was noted at increased current values. Electrochemical studies in a 3.5% NaCl solution showed improved corrosion characteristics of the coatings compared to the substrate. The results obtained characterize TiSiCN coatings as promising protective layers for use in friction, heating and corrosive environments.

Key words: *reactive plasma spraying, TiSiCN coatings, thermal stability, tribological properties, corrosion resistance, nanocomposite coatings, coefficient of friction, protective coatings, wear resistance.*

Авторлар туралы мәліметтер

Лазат Сарқытбекқызы Баймолданова* – Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, физика және технологиялар кафедрасының қауымдастырылған профессоры, PhD, Өскемен қ., Қазақстан; e-mail: baimoldals@gmail.com. ORCID: https:orcid.org/0000-0003-3533-242X.

Бауыржан Корабаевич Рахадилов – PhD, профессор, жетекші ғылыми қызметкер, «PlasmaScience» ЖШС, Қазақстан Республикасы; e-mail: rakhadilovb@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5990-7123.

Али Чорух – PhD, физика кафедрасының профессоры, Сакарья университеті, Сакарья, Түркия; e-mail: coruh@sakarya.edu.tr. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7362-6173.

Еркежан Мұратқызы Қабдыкенова – Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, физика және технологиялар кафедрасының сениор-лекторы, магистр, Өскемен қ., Қазақстан; e-mail: kabdykenovaerkezhan@gmail.com. ORCID: https:orcid.org/0009-0009-9095-6631.

Михаил Вячеславович Ермоленко – Техника ғылымдарының кандидаты, «Техникалық физика және жылуэнергетика» кафедрасының қауымдастырылған профессоры (доцент), Шәкәрім унитерситеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: tehfiz@mail.ru. ORCID: https:orcid.org/0000-0002-1677-8023.

Сведения об авторах

Лазат Саркытбековна Баймолданова* – ассоциированный профессор кафедры физики и технологий, Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова, PhD, г. Усть-Каменогорск, Казахстан; e-mail: baimoldals@gmail.com. ORCID: https:orcid.org/0000-0003-3533-242X;

Бауыржан Корабаевич Рахадилов – PhD, профессор, ведущий научный сотрудник, ТОО «PlasmaScience», Республика Казахстан; e-mail: rakhadilovb@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5990-7123.

Али Чорух – профессор кафедры физики, Университет Сакарья, г. Сакарья, Турция; e-mail: coruh@sakarya.edu.tr. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7362-6173.

Еркежан Мұратқызы Қабдыкенова – сениор-лектор кафедры физики и технологий, Восточно-Казахстанский университет имени Сарсе-на Аманжолова, магистр, г. Усть-Каменогорск, Казахстан; e-mail: kabdykenovaerkezhan@gmail.com. ORCID: https:orcid.org/0009-0009-9095-6631.

Михаил Вячеславович Ермоленко – кандидат технических наук, ассоциированный профессор кафедры «Техническая физика и теплоэнергетика», Шәкәрім унитерситет, Республика Казахстан; e-mail: tehfiz@mail.ru. ORCID: https:orcid.org/0000-0002-1677-8023.

Information about the authors

Lazat Sarkytbekkyzy Baimoldanova* – Associate Profes-sor of the Department of Physics and Technology of the National Academy of Sciences, Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University,, PhD, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; e-mail: baimoldals@gmail.com. ORCID: https:orcid.org/0000-0003-3533-242X.

Bauyrzhan Rakhadilov – PhD, Professor, Leading Researcher, PlasmaScience LLP, Republic of Kazakhstan; e-mail: rakhadilovb@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5990-7123.

Ali Coruh – Prof.Dr, Department of Physics, Sakarya University, Sakarya, Turkey; e-mail: coruh@sakarya.edu.tr. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7362-6173.

Erkezhan Muratkyzy Kabdykenova – Senior Lecturer, Department of Physics and Technologies, Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, Master's Degree holder, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; e-mail: kabdykenovaerkezhan@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-9095-6631.

Mikhail Yermolenko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technical Physics and Thermal Power Engineering; Republic of Kazakhstan; e-mail: tehfiz@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1677-8023.

Поступила в редакцию 05.02.2026
Поступила после доработки 27.02.2026
Принята к публикации 12.03.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-57

BY 4.0
Check for updates

IRSTI: 55.22.31

Z.B. Sagdoldina[1,2], D.R. Baizhan[1,2], T. Alimbekuly[1], A.E. Alibekov[*]
[1]Research Center Surface Engineering and Tribology, Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, 070002, Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk, Shakarima Street, 148
[2]Shakarim University,
071412, Republic of Kazakhstan, Semey, 20 A Glinka Street
*e-mail: aibek.alibekov.03@mail.ru

STUDY OF TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF BIOCOATINGS BY DETONATION SPRAYING METHOD

Abstract: *In this study, bioactive hydroxyapatite coatings were deposited on commercially pure Grade 2 titanium substrates by detonation spraying at different O_2/C_2H_2 ratios in the range of 2.6-3.7. X-ray diffraction analysis confirmed the predominance of the hydroxyapatite phase with partial formation of α-tricalcium phosphate, which is attributed to high temperatures and intense dynamic processes in the detonation jet. The formed coatings exhibit pronounced hydrophobicity, high structural heterogeneity, and a well-developed surface microrelief, promoting improved interaction with bone tissue and accelerated osseointegration. Tribological tests conducted under dry conditions and in Ringer's solution demonstrated a significant increase in wear resistance compared to uncoated Grade 2 titanium. The best friction characteristics and the lowest wear volume were observed for coatings deposited at O_2/C_2H_2 ratios of 3.0 and 3.3, which is associated with an optimal combination of crystallinity, phase composition, and adhesion strength. Coatings formed under these conditions provide stable tribological behavior in physiological environments. The obtained results confirm the prospects of detonation-sprayed hydroxyapatite for improving the durability, biocompatibility, and operational reliability of titanium implants.*

Key words: *titanium substrates; biomedical surface coatings; detonation spray deposition; hydroxyapatite layers; surface characteristics.*

Introduction

Materials intended for implants in traumatology, orthopedics, and maxillofacial surgery must possess high mechanical strength, good flexibility, excellent corrosion resistance, and the ability to accommodate complex geometries. [1]. Titanium and its alloys are extensively employed as load-bearing implant materials owing to their excellent mechanical performance and high corrosion resistance [2-5]. Nevertheless, titanium alloys exhibit bioinert behavior and are unable to establish a direct chemical bond with bone tissue, while the disparity in elastic modulus between the implant and bone may lead to bone resorption and long-term complications [4-6]. To overcome these limitations, surface modification technologies and functional coatings are actively developed [3, 6]. Calcium phosphate coatings, particularly hydroxyapatite, are considered highly promising as they enhance biocompatibility, stimulate bone formation, and reduce metal ion release [7-9]. Hydroxyapatite also forms strong interfacial bonds with titanium substrates [8, 12].

Among coating techniques, microarc oxidation [10, 14], magnetron sputtering [8], and thermal spraying [11, 12] are widely applied. Thermal spray methods, including plasma, HVOF, and detonation spraying, enable high deposition rates and effective microstructure control [11-13]. Detonation spraying represents an appealing coating technique due to its capability to produce dense, well-adhered coatings with minimal porosity at comparatively low processing costs [8, 12]. The method accelerates hydroxyapatite particles to hypersonic velocities, resulting in coatings with improved mechanical properties and high stability, making it promising for medical implant applications [12, 13, 15].

Within this study, the influence of the oxygen-to-acetylene ratio in the detonation spraying process on the formation mechanisms of bioactive hydroxyapatite coatings, their phase state, structural and morphological characteristics, and tribological properties is examined. Particular attention is given to identifying spraying regimes that ensure enhanced wear resistance and reduced friction coefficient under both dry contact conditions and physiological environments when the coatings are deposited on chemically pure titanium substrates.

©Z.B. Sagdoldina, D.R. Baizhan, T. Alimbekuly, A.E. Alibekov, 2026

The scientific novelty of this work lies in a comprehensive investigation of the tribological behavior of hydroxyapatite biocoatings deposited by detonation spraying on commercially pure Grade 2 titanium at different O_2/C_2H_2 ratios. For the first time, the influence of the oxygen-acetylene ratio in the range of 2.6-3.7 on the phase composition, surface morphology, and tribological performance of detonation-sprayed hydroxyapatite coatings in a physiological medium (Ringer's solution) has been systematically analyzed. These findings provide new insights into the optimization of detonation spraying parameters for the development of durable and biocompatible coatings for biomedical titanium implants.

Materials and methods of research

A commercially available hydroxyapatite powder supplied by Medicoat (Switzerland) was employed in this study. The powder particles exhibited a predominantly spherical shape with an average size of approximately 37.5 μm. Energy-dispersive spectroscopy verified that the material corresponded to the chemical composition $Ca_5(PO_4)_3OH$, with a Ca/P molar ratio close to 1.67. X-ray diffraction analysis further confirmed the high phase purity of the synthesized hydroxyapatite.

In the course of this investigation, detonation spraying was employed to fabricate four distinct coating variants, with three individual specimens prepared for each coating type, ensuring reproducible results. Spraying was performed using a CCDS2000 detonation system with computer control, allowing precise control of spray regimes, including the oxygen-acetylene ratio and the explosive charge volume, ensuring high accuracy and process stability [16]. The O_2/C_2H_2 ratio, which determines the composition of the detonation products and the deposition efficiency were observed to vary in the range of 2.6-3.7 as a function of the selected parameters coating type (Table 1). The most important process parameter referred to the fraction of the barrel volume occupied by the acetylene-oxygen mixture (the "explosive charge"), which amounted to 73-78% and directly affected both the detonation energy and the quality and structure of the deposited coatings.

Table 1 – Experimental parameters for hydroxyapatite powder deposition by detonation spraying

Coating	Molar ratio O_2/C_2H_2	Explosive charge, % (volume of barrel filled with gas)
HA 2.6	2.6	73
HA 3.0	3.0	74
HA 3.3	3.3	77
HA 3.7	3.7	78

X-ray diffraction studies were carried out using an XRD-6000 diffractometer operating with CuKα radiation (λ = 1.54056 Å). The diffraction patterns were recorded at an accelerating voltage of 45 kV and a tube current of 30 mA, employing a step size of 0.02° over a 2θ angular range from 20° to 80°, with a counting time of 0.5 s per step. Phase identification and full-profile analysis were performed using the PDF-4+ reference database in combination with the POWDER CELL 2.4 software**.** The tribological tests were performed based on the ISO 20808:2016 standard. For this purpose, a T-21 tribotester manufactured by the Institute of Exploitation Technology in Radom (Poland) was used. The device is designed to analyze the tribological properties of cooperating materials during sliding friction in a ball-on-disk geometry under rotational motion. A second series of tribological experiments was performed using a TRB3 tribometer according to the conventional ball-on-disk configuration in compliance with ASTM G133-95. The tests were carried out in Ringer's solution to simulate physiological conditions. The solution contained 9.0 g/L NaCl, 0.42 g/L KCl, 0.48 g/L $CaCl_2$, and 0.2 g/L $NaHCO_3$. A silicon nitride (Si_3N_4) ceramic ball with a diameter of 6 mm was employed as the counterbody. The experimental parameters included a normal load of 6 N, a sliding velocity of 3 cm/s, and a total of 5000 sliding cycles.The wear track was examined using an Olympus optical microscope. The analysis allowed us to determine the nature of the damage, including delamination, cracking, and the degree of material failure. Differences in wear mechanisms between the coatings and the titanium base were also identified.

Results and discussion

XRD analysis (Figure 1) confirms that hydroxyapatite $Ca_5(PO_4)_3OH$ is the dominant phase in all coatings. However, partial thermal decomposition with the formation of α-tricalcium phosphate (α-$Ca_3(PO_4)_2$) is observed due to the high process temperatures. According to literature, hydroxyapatite decomposes above ~1650 °C as a result of dehydroxylation and lattice disruption. XRD results also

reveal slight shifts in diffraction peak positions with increasing oxygen-to-acetylene ratio. The displacement of the (211) peak toward smaller 2θ angles reflects subtle changes in the crystal lattice parameters, possibly caused by internal stresses or compositional variations. With higher oxygen content, this shift becomes more pronounced, suggesting improved crystallinity and reduced structural defects. The quantitative phase composition is presented in Table 2. The hydroxyapatite content exceeds 70% of the total phase composition in all coatings.

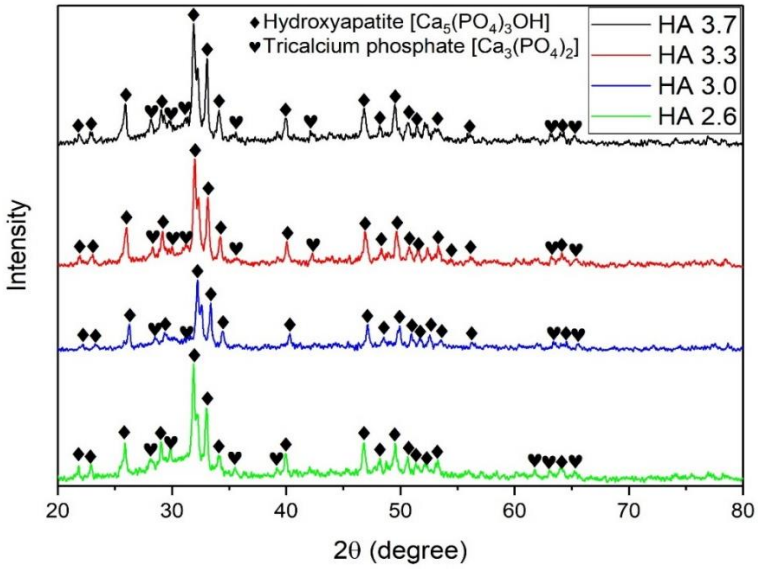


Figure 1 – Diffraction patterns of sprayed hydroxyapatite coatings

Table 2 – Results of X-ray phase analysis

Sample	Detected Phases	Phase Content, mas. %	Lattice Parameters, Å	Crystallite Size, nm	$\Delta d/d*10^{-3}$
HA 2.6	Hydroxyapatite $Ca_5(PO_4)_3OH$	71	a = 9.3949 c = 6.8811	48	1
	Tricalcium phosphate $Ca_3(PO_4)_2$	29	a = 12.9870 b = 27.2012 c = 12.9328	18	0.7
HA 3.0	Hydroxyapatite $Ca_5(PO_4)_3OH$	73	a = 9.3949 c = 6.8897	59	1
	Tricalcium phosphate $Ca_3(PO_4)_2$	27	a = 12.9515 b = 27.3361 c = 12.9063	25	1
HA3.3	Hydroxyapatite $Ca_5(PO_4)_3OH$	71	a = 9.3896 c = 6.8866	60	0.8
	Tricalcium phosphate $Ca_3(PO_4)_2$	29	a = 12.9492 b = 27.3800 c = 12.8901	18	0.7
HA 3.7	Hydroxyapatite $Ca_5(PO_4)_3OH$	75	a = 9.4128 c = 6.9045	62	1.4
	Tricalcium phosphate $Ca_3(PO_4)_2$	25	a = 12.8684 b = 27.3485 c = 12.8559	21	2.2

The obtained results allow for a detailed analysis of the tribological behavior of coatings formed at different oxygen-to-acetylene ratios and their comparison with pure Grade 2 titanium (Figure 2). It was found that coatings produced at O_2/C_2H_2 ratios of 3.0 and 3.3, the friction coefficient remains stable during the entire test (up to 50,000 cycles), confirming high wear resistance, whereas the coating formed at a ratio of 2.6 displays a rapid increase in friction coefficient after approximately 8,000 cycles, which indicates rapid wear and early loss of functional properties. The low initial friction coefficient can be attributed to a heterogeneous microstructure and a highly developed surface relief, which reduce the real contact area between the rubbing surfaces and, consequently, decrease

friction. With increasing friction cycles, the coating microstructure may undergo adaptation, surface smoothing, or localized degradation at the microscale, resulting in variations in the friction coefficient associated with surface stabilization. The coating obtained at an O_2/C_2H_2 ratio of 3.7 also demonstrates relatively stable tribological behavior; however, it is characterized by a higher friction coefficient, such behavior may reflect reduced antifriction capability. Although tribological performance is generally less significant for dental implant applications, it is essential for load-bearing systems such as joint replacements and orthopedic implants. Under such conditions, minimizing friction and wear is essential for increasing implant service life and ensuring stable performance under prolonged mechanical loads. Furthermore, reducing the formation of wear particles is important, as such particles may cause inflammatory reactions or contribute to biological rejection of the implant.

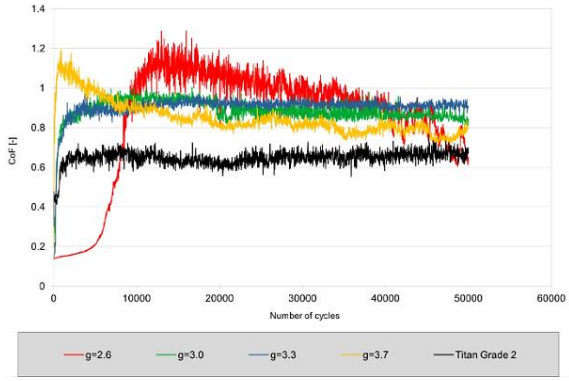


Figure 2 – Variation of the coefficient of friction (CoF) as a function of sliding cycles for coatings produced at different O_2/C_2H_2 ratios in comparison with pure titanium (Grade 2)

Figure 3 presents the tribological performance of hydroxyapatite coatings and Grade 2 titanium evaluated in Ringer's solution. The dependence of the friction coefficient on the number of sliding cycles is shown for each coating and for the titanium substrate, enabling an assessment of their wear behavior under simulated physiological conditions. Grade 2 titanium demonstrates the highest friction coefficient along with pronounced instability, which is indicative of accelerated wear and degradation of mechanical performance during sliding. In contrast, hydroxyapatite coatings – particularly those deposited at oxygen-to-acetylene ratios of 3.0 and 3.3 – exhibit markedly lower and more stable friction coefficients throughout the entire test, reflecting superior wear resistance. Surface micrographs further reveal wear tracks on both the coatings and the titanium; however, the hydroxyapatite-coated surfaces preserve their structural integrity to a greater extent than the uncoated titanium. These findings confirm the effectiveness of hydroxyapatite coatings in enhancing the durability and wear resistance of biomedical implants, especially under exposure to physiological media such as Ringer's solution.

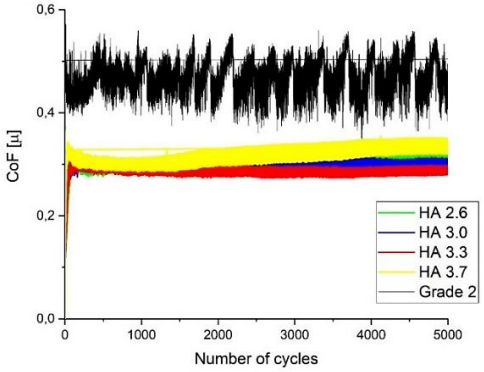


Figure 3 – Variation of the coefficient of friction (CoF) with sliding cycles for coatings deposited at different O_2/C_2H_2 ratios, compared with pure titanium (Grade 2), tested in Ringer's solution

Figure 4 presents the 3D profilometry results and wear volume measurements obtained after tribological testing of hydroxyapatite coatings and commercially pure Grade 2 titanium in Ringer's

solution. The corresponding 3D surface profiles clearly demonstrate significant differences in the wear behavior of the hydroxyapatite coatings compared with the titanium substrate after the tribological tests. The coating deposited at an oxygen-to-acetylene ratio of 2.6 exhibits severe surface degradation with extensive delamination areas. This behavior corresponds to higher friction coefficient values and indicates relatively poor wear resistance. In contrast, the coating produced at a ratio of 3.0 shows noticeably less damage and a more uniform wear pattern. This is reflected in lower friction coefficient values and suggests improved mechanical stability of the coating. The coating obtained at a ratio of 3.3 demonstrates an even lower and more stable friction coefficient, which corresponds to uniform wear and a minimal number of surface defects observed in the 3D profilometry images. Similarly, the coating deposited at a ratio of 3.7 maintains good surface integrity and exhibits limited wear, as indicated by consistently low friction coefficient values.

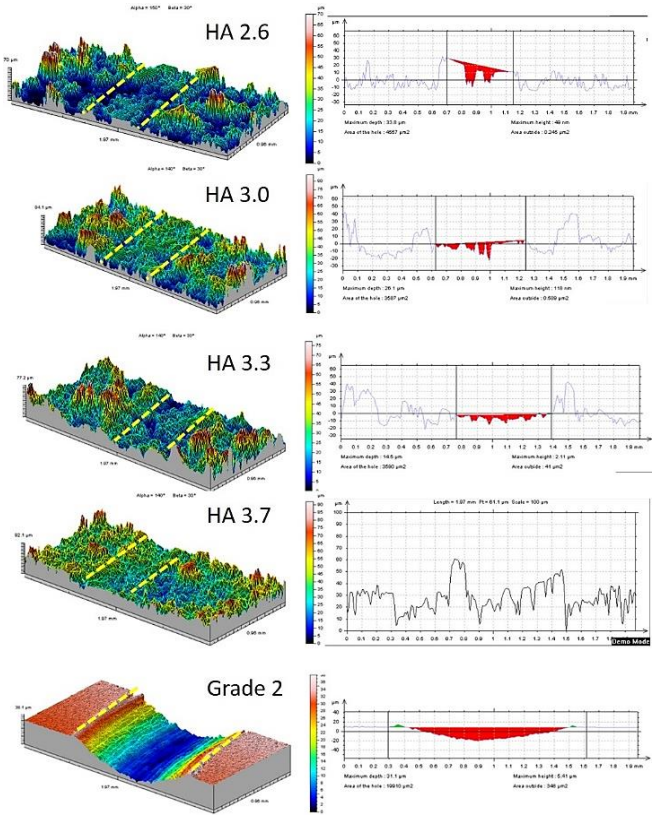


Figure 4 – 3D profilometry of wear tracks and wear volume of hydroxyapatite coatings deposited at different O_2/C_2H_2 ratios and Grade 2 titanium

In contrast, Grade 2 titanium experiences the most severe wear, characterized by the formation of deep grooves on the surface. This behavior is associated with the highest and most unstable friction coefficient values, indicating the relatively low wear resistance of the material. Overall, the obtained results clearly demonstrate that hydroxyapatite coatings-particularly those deposited at oxygen-to-acetylene ratios of 3.0 and 3.3-provide significantly higher wear resistance compared with titanium. Therefore, such coatings represent a promising solution for biomedical implant applications, where long-term durability and resistance to friction are essential performance requirements.

Table 3 provides a comparative summary of the tribological performance of coatings deposited at various oxygen-to-acetylene ratios, along with that of commercially pure Grade 2 titanium, evaluated under dry sliding conditions and in Ringer's solution. Under dry friction, the coating prepared at an O_2/C_2H_2 ratio of 2.6 exhibits the lowest friction coefficient (0.5); however, it also shows the highest wear, indicating limited durability. The coating produced at a ratio of 3.3 demonstrates the minimum wear, while coatings deposited at ratios of 3.0 and 3.3 offer the most favorable compromise between low friction and enhanced wear resistance. In contrast, the coating formed at a ratio of 3.7 displays relatively low friction but suffers from excessively high wear. Pure titanium shows inferior tribological performance compared to the coatings obtained at O_2/C_2H_2 ratios of 3.0 and 3.3.

Table 3 – Tribological performance of coatings deposited at different O_2/C_2H_2 ratios under dry conditions and in Ringer's solution, in comparison with Grade 2 titanium

Sample	In dry conditions		In Ringer's solution	
	Coefficient of Friction [μ]	Volumetric wear index ×10-6 [mm3/Nm]	Coefficient of Friction [μ]	Volumetric wear index ×10-6 [mm3/Nm]
A 2.6	0.5±0.29	741±283	0.302±0.014	150±43
HA 3.0	0.87±0.06	422±73	0.287±0.01	113±34
A 3.3	0.90±0.06	331±90	0.296±0.01	108±30
HA 3.7	0.85±0.09	1 230±148	0.319±0.014	152±35
Grade 2	0.65±0.04	734±266	0.471±0.014	630±120

In Ringer's solution, coatings deposited at ratios of 3.0 and 3.3 exhibit the lowest friction coefficients and minimal wear, confirming their superior performance in a simulated physiological environment. In contrast, pure titanium shows the highest friction and wear, indicating its poor suitability under these conditions.

Overall, coatings formed at oxygen-to-acetylene ratios of 3.0 and 3.3 demonstrate the best tribological performance in both dry and wet environments, making them the most promising for applications requiring low friction and high wear resistance.

Conclusions

Tribological evaluation performed under dry sliding conditions and in Ringer's solution revealed that coatings deposited at O_2/C_2H_2 ratios of 3.0 and 3.3 exhibit the lowest friction coefficients along with minimal wear. In comparison with uncoated Grade 2 titanium, these coatings demonstrate markedly enhanced wear resistance and more stable frictional performance. The results indicate that detonation spraying at O_2/C_2H_2 ratios of 3.0 and 3.3 promotes the formation of an optimized coating architecture with high density and a homogeneous phase distribution on the titanium substrate. Such a microstructural state provides reliable wear resistance and stable friction behavior in both dry and physiological environments. These findings confirm the suitability of the selected spraying parameters for the fabrication of functionally robust biocoatings. Consequently, hydroxyapatite coatings produced at O_2/C_2H_2 ratios of 3.0 and 3.3 can be considered the most promising candidates for biomedical implant applications.

References

1. 3D printing technologies in metallic implants: a thematic review on the techniques and procedures / S. Attarilar et al // International Journal of Bioprinting. – 2020. – Vol.7, № 1. – P. 306.
2. Chen Q. Metallic implant biomaterials / Q. Chen, G.A. Thouas // Materials Science and Engineering: R: Reports. – 2015. – Vol.87. – P. 1-57.
3. Latest trends in surface modification for dental implantology: Innovative developments and analytical applications / F. Accioni et al // Pharmaceutics. – 2022. – Vol.14, № 2. – P. 455.
4. Titanium and zirconium release from titanium-and zirconia implants in mini pig maxillae and their toxicity in vitro / X. He et al // Dental Materials. – 2020. – Vol.36, №. 3. – P. 402-412.
5. Nicholson, J. Titanium alloys for dental implants: A review / J. Nicholson // Prosthesis. – 2020. – Vol. 2. – № 2. – P. 11.
6. Biomimetic coatings in implant dentistry: A quick update / M.A. Abdulghafor et al // Journal of Functional Biomaterials. – 2023. – Vol. 15, № 1. – P. 15.
7. Nano-structure designing promotion osseointegration of hydroxyapatite coated Ti–6Al–4V alloy implants in diabetic model / Z. Hu et al //Journal of biomedical nanotechnology. – 2019. – Vol. 15. – №. 8. – P. 1701-1713.
8. Study of the Structural-Phase State of Hydroxyapatite Coatings Obtained by Detonation Spraying at Different O2/C2H2 Ratios / D. Baizhan et al // Crystals. – 2023. – Vol. 13, № 11. – P. 1564.
9. A review on the wettability of dental implant surfaces I: theoretical and experimental aspects / F. Rupp et al // Acta biomaterialia. – 2014. – Vol. 10, № 7. – P. 2894-2906.
10. The effect of the electrolyte composition on the microstructure and properties of coatings formed on a titanium substrate by microarc oxidation / B. Rakhadilov et al // AIMS Materials Science. – 2024. – T. 11, № 3. – P. 547-564.
11. Jadidi M. A Comprehensive Review on Fluid Dynamics and Transport of Suspension/Liquid Droplets and Particles in High-Velocity Oxygen-Fuel (HVOF) Thermal Spray / M. Jadidi, S. Moghtadernejad, A. Dolatabadi // Coatings. – 2015. – Vol. 5. – P. 576-645.

12. Obtaining of hydroxyapatite coatings on a titanium substrate by detonation-gas spraying / B. Rakhadilov et al // Eurasian Physical Technical Journal. – 2021. – 18(37). – P. 30-36.
13. Phase Evolution of Hydroxapatite Coatings Suspension Plasma Sprayed Using Variable Parameters in Simulated Body Fluid / R. d'Haese et al // Surface and Coatings Technology. – 2010. – 204. – P. 1236-1246.
14. Effects of Micro-Arc Oxidation Process Parameters on Characteristics of Calcium-Phosphate Containing Oxide Layers on the Selective Laser Melted Ti13Zr13Nb Alloy / M. Dziaduszewska et al // Coatings. – 2020. – № 10. – P. 745.
15. Properties of gas detonation ceramic coatings and their effect on the osseointegration of titanium implants for bone defect replacement / N.I. Klyui et al // Ceramics International. – 2021. – № 47. – P. 25425-25439.
16. Influence of Detonation Spraying Parameters on the Microstructure and Mechanical Properties of Hydroxyapatite Coatings / Z. Sagdoldina et al // Materials. – 2024. – № 17(21). – P. 5390. https://doi.org/10.3390/ma17215390.

Acknowledgment

This research is funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. AP23490355).

Ж.Б. Сағдолдина[1,2], Д.Р. Байжан[1,2], Т. Әлімбекұлы[1], А.Е. Әлібеков[1*]
[1]«Беттік инженерия және трибология» ғылыми-зерттеу орталығы,
Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті,
070002, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ., Шәкәрім к. 148
[2]Шәкәрім университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинка көшесі, 20А
*e-mail: aibek.alibekov.03@mail.ru

ДЕТОНАЦИЯЛЫҚ БҮРКУ ӘДІСІМЕН АЛЫНҒАН БИОЖАБЫНДАРДЫҢ ТРИБОЛОГИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ

Зерттеу барысында O_2/C_2H_2 қатынасы 2,6-3,7 аралығында өзгерте отырып, детонациялық бүрку технологиясы арқылы химиялық таза Grade 2 титан негіздеріне гидроксиапатиттің биоактивті жабындары қалыптастырылды. Рентгенфазалық талдау гидроксиапатит фазасының басым екенін айқындап, детонациялық ағынның жоғары температурасы мен қарқынды динамикалық үдерістерінің ықпалынан α-трикальцийфосфаттың ішінара түзілетінін көрсетті. Қалыптасқан жабындар айқын гидрофобтылығымен, жоғары құрылымдық біртексіздігімен және дамыған микрорельефті беткі топографиясымен сипатталады, бұл сүйек ұлпасымен өзара әрекеттесудің жақсаруына және остеоинтеграция үдерістерінің жеделдеуіне ықпал етеді. Құрғақ жағдайларда және Рингер ерітіндісінде жүргізілген трибологиялық сынақтардың нәтижелері бастапқы Grade 2 титанымен салыстырғанда тозуға төзімділіктің едәуір артқанын көрсетті. Үйкеліс коэффициентінің ең тиімді мәндері мен тозу көлемінің минималды көрсеткіштері O_2/C_2H_2 = 3,0 және 3,3 қатынастарында алынған жабындарда байқалды, бұл кристалдылық дәрежесінің, фазалық құрамның және трибологиялық қасиеттерінің оңтайлы үйлесуімен байланысты. Аталған режимдерде қалыптасқан жабындар физиологиялық жағдайларда тұрақты трибологиялық сипаттамаларды қамтамасыз етеді. Алынған нәтижелер детонациялық бүрку әдісімен алынған гидроксиапатитті титан имплантаттарының ұзақ мерзімділігін, биосәйкестілігін және пайдалану сенімділігін арттыру үшін тиімді екенін дәлелдейді.

Түйін сөздер: *титан негізіндегі материалдар; биосәйкесті жабындар; детонациялық бүрку технологиясы; гидроксиапатит жабындары; беткі қабаттың қасиеттері.*

Ж.Б. Сағдолдина[1,2], Д.Р. Байжан[1,2], Н.Е. Бердімуратов[1], Б.А. Алибекова[1*]
[1]Научно-исследовательский центр «Инженерия поверхности и трибология»,
Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова,
070002, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск, ул. Шакарима, 148
[2]Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20А
*e-mail: aibek.alibekov.03@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БИОПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ДЕТОНАЦИОННОГО НАПЫЛЕНИЯ

В работе получены биоактивные покрытия гидроксиапатита на подложках из химически чистого титана Grade 2 методом детонационного напыления при различных соотношениях O_2/C_2H_2 в диапазоне 2.6-3.7. Рентгенофазовый анализ подтвердил преобладание фазы гидроксиапатита с частичным образованием α-трикальцийфосфата, что обусловлено воздействием высоких температур и интенсивных динамических процессов в детонационной струе. Сформированные покрытия характеризуются выраженной гидрофобностью, высокой структурной неоднородностью и развитой микрорельефной поверхностной топографией, способствующей улучшенному взаимодействию с костной тканью и ускорению процессов остеоинтеграции. Результаты трибологических испытаний в сухих условиях и в растворе Рингера показали существенное повышение износостойкости по сравнению с исходным титаном Grade 2. Наилучшие значения коэффициента трения и минимальный объём износа продемонстрировали покрытия, полученные при соотношениях O_2/C_2H_2 = 3.0 и 3.3, что связано с оптимальным сочетанием степени кристалличности, фазового состава и трибологических свойств. Покрытия, сформированные при данных режимах, обеспечивают стабильное трибологическое поведение в физиологических условиях. Полученные результаты подтверждают перспективность использования детонационно нанесённого гидроксиапатита для повышения долговечности, биосовместимости и эксплуатационной надёжности титановых имплантатов.

Ключевые слова: *материалы на основе титана; биосовместимые покрытия; технология детонационного напыления; покрытия из гидроксиапатита; свойства поверхности.*

Information about authors

Zhuldyz Bolatkizy Sagdoldina – PhD, Associate Professor, senior Researcher at the Research Center for «Surface Engineering and Tribology» of the East Kazakhstan University named after Sarsen Amanzholov, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; e-mail: sagdoldina@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6421-2000.

Daryn Rashituly Baizhan – senior Researcher at the Research Center for «Surface Engineering and Tribology» of the East Kazakhstan University named after Sarsen Amanzholov, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; e-mail: daryn.baizhan@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9105-3129.

Temirlan Alimbekuly – Junior researcher of scientific research center «Surface Engineering and Tribology», Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; e-mail: temirlanalimbekuly@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-7419-1281.

Aibek Erkebulanuly Alibekov* – engineer researcher of Scientific Research Center «Surface Engineering and Tribology» at Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; e-mail aibek.alibekov.03@mail.ru. ORCID https://orcid.org/0009-0008-4271-0170.

Авторлар туралы мәліметтер

Жұлдыз Болатқызы Сағдолдина – PhD, қауымдастырылған профессор, Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан Университетінің «Беттік инженерия және трибология» ғылыми-зерттеу орталығының аға ғылыми қызметкері, Өскемен, Қазақстан; e-mail: sagdoldina@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6421-2000.

Дарын Рашитулы Байжан – Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан Университетінің «Беттік инженерия және трибология» ғылыми-зерттеу орталығының аға ғылыми қызметкері, Өскемен, Қазақстан; e-mail: daryn.baizhan@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9105-3129.

Темірлан Әлімбекұлы – «Беттік инженерия және трибология» ғылыми-зерттеу орталығының кіші ғылыми қызметкері, Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, Өскемен қаласы, Қазақстан; e-mail: temirlanalimbekuly@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-7419-1281.

Айбек Еркебұланұлы Әлібеков* – Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан Университетінің «Беттік инженерия және трибология» ҒЗО инженері, Өскемен, Қазақстан; e-mail: aibek.alibekov.03@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-4271-0170.

Сведения об авторах

Жулдыз Болаткызы Сагдолдина – PhD, ассоциированный профессор, старший научный сотрудник Научно-исследовательского центра «Инженерия поверхности и трибология» Восточно-Казахстанского университета имени Сарсена Аманжолова, Усть-Каменогорск, Казахстан; e-mail: sagdoldina@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6421-2000**.**

Дарын Рашитулы Байжан – старший научный сотрудник Научно-исследовательского центра «Инженерия поверхности и трибология» Восточно-Казахстанского университета имени Сарсена Аманжолова, Усть-Каменогорск, Казахстан; e-mail: daryn.baizhan@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9105-3129.

Темірлан Әлімбекұлы – младший научный сотрудник научно-исследовательского центра «Инженерия поверхности и трибология», Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена

Аманжолова, г. Усть-Каменогорск, Казахстан; e-mail: temirlanalimbekuly@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-7419-1281.

Айбек Еркебұланұлы Әлібеков* – инженер научно-исследовательского центра «Инженерия поверхности и трибология» Восточно-Казахстанского университета имени Сарсена Аманжолова, Усть-Каменогорск, Казахстан; e-mail: aibek.alibekov.03@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-4271-0170.

Received 06.02.2026
Revised 16.03.2026
Accepted 17.03.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-58

CC BY 4.0
Check for updates

МРНТИ: 44.31.35

Д.М. Тойбазар[1,2], И.М. Дауренова[1,2*], А.Б. Мустафаева[3], Б.А. Урмашев[4], М.Ж. Хазимов[1,2]
[1]Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева,
050013, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Байтурсынова, 126/1
[2]Казахский национальный аграрный исследовательский университет,
050010, Республика Казахстан, г. Алматы, пр. Абая, д. 8
[3]Казахстанско-Британский технический университет,
050000, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Толе би 59
[4]Казахский национальный университет имени Аль-Фараби,
050040, Республика Казахстан, г. Алматы, пр. Аль-Фараби 71
*e-mail: indikow-88-kz@mail.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЧАТКОВ КУКУРУЗЫ

Аннотация: *В работе рассматривались теплофизические свойства зерна кукурузы, а также початков кукурузы при различных уровнях влажности. Целью исследования являлось определение теплоёмкости, теплопроводности и температуропроводности для анализа процессов тепловой обработки и сушки кукурузы. Дополнительно были определены теплофизические характеристики, включая плотность зерна и початков кукурузы, и установлены зависимости этих параметров от уровня влажности. Полученные зависимости позволяют более точно описывать процессы переноса тепла и влаги при сушке и хранении кукурузы. Для определения теплофизических свойств початков кукурузы использовался прибор ИТП МГ4-100, обеспечивающий измерение основных теплофизических параметров с требуемой точностью. В работе также применялся шаровой бикалориметр, с помощью которого определялись теплофизические свойства зерна кукурузы и рассчитывались основные тепловые характеристики материала. Измерение температурных параметров на поверхности початков кукурузы осуществлялось с использованием инфракрасного термометра «Fluke», что позволило проводить контроль температуры в процессе эксперимента. Сушка образцов проводилась в сушильной установке «ШС-40 СПУ» в заданном диапазоне температур и влажностных режимов. В ходе исследования были определены теплофизические свойства зерна и початков кукурузы при разной влажности. Также изучены процессы влагообмена в результате сушки влажность продукции снизилась с 72% до 60%. Анализ экспериментальных данных и полученных зависимостей способствует разработке тепловой обработки и сушки, обеспечивающих снижение эффективности сушки кукурузы.*

Ключевые слова: *зерно кукурузы, початки кукурузы, теплофизические свойства, шаровой бикалориметр, ИТП МГ4 100.*

Введение

Кукуруза – одна из важнейших сельскохозяйственных культур, занимающая третье место в мире по посевной площади после пшеницы и риса. Уникальность кукурузы заключается в разносторонних направлениях использования зерна и листостебельной массы. Теплофизические свойства початков и отдельных зерен являются важным фактором, влияющим на качество сушки, хранения, очистки и переработки кукурузы [1]. Початки кукурузы

©Д.М. Тойбазар, И.М. Дауренова, А.Б. Мустафаева, Б.А. Урмашев, М.Ж.Хазимов, 2026

при сборе урожая характеризуются высокой влажностью, которая в ряде регионов превышает 70%. Повышенная влажность осложняет транспортировку и сокращает срок хранения зерна без предварительной послеуборочной обработки [2]. К тому же продолжительные осадки в период уборки приводят к тому, что зерно собирается с повышенной влажностью. Согласно исследованиям, около 80% урожая поступает на пункты приёма с влажностью выше 70%, что значительно увеличивает риск его порчи. В подобных условиях сушка зерна является главным и самым надёжным методом его сохранения, позволяя снизить влажность до безопасного уровня и сохранить качество урожая на длительный срок [3].

Початок кукурузы – сложная и неоднородная структура, состоящая из стержня, стебля, зерен и межзерновых пустот, что обуславливает различия теплофизических свойств по объёму. Отдельные зерна более однородны, но их свойства зависят от влажности, сорта и структуры. Сушка изменяет влажность, что значительно влияет на теплопроводность и теплоёмкость зерна и початка [4].

Сегодня особое внимание уделяется качеству сушки кукурузы и сохранению её питательных веществ. Для этого изучаются теплофизические свойства зерна, которые используются при создании математических моделей тепломассообмена, разработке сушильных установок, выборе оптимальных режимов конвективной и солнечной сушки, а также для предотвращения перегрева и порчи зерна в процессе хранения. Таким образом, изучение теплофизических характеристик початков и зерен кукурузы важно для технологических процессов в агропромышленном комплексе [5, 6].

Целью данного исследования является изучение взаимосвязи между теплофизическими свойствами початков кукурузы при влажности 70% и зерен при влажности 72% и их уровнем влажности, а также определение диапазона изменений этих свойств при разных показателях влажности.

Задачи исследования

Адаптировать существующие экспериментальные методы для определения теплофизических характеристик початков и зерна кукурузы.

Провести серию экспериментов по измерению теплоёмкости, теплопроводности и температуропроводности образцов при различной влажности.

Определить плотность исследуемых образцов и учесть её при расчётах теплофизических параметров.

Обработать экспериментальные данные и получить функциональные зависимости теплофизических характеристик от влажности.

Материалы и методы исследования

В качестве объектов исследования были использованы початки кукурузы и очищенные зерна одной партии, чтобы обеспечить однородность результатов. Образцы перед экспериментами сортировались по массе и размеру, исключая повреждённые и биологически поражённые початки и зерна. Образцы с разной влажностью использовались для исследования зависимости теплофизических характеристик от влаги: початки 60-70 %, зерно – 58-72 %. Влажность определяли термогравиметрическим методом при 105 ± 1 °C для установления исходного содержания влаги перед измерениями [7].

На поле оставляют часть початков для сохранения питательных свойств зерна и продления срока хранения кукурузы; початки сушат непосредственно в стебле. Такой подход обеспечивает естественное высыхание кукурузы и способствует сохранению питательных веществ зерен. Поэтому при изучении исследуемого объекта с разными показателями были использованы образцы, высушенные с разной влажностью. Изучение теплофизических характеристик початков и зерна кукурузы, в частности теплопроводности и теплоёмкости, позволяет оценить особенности распределения тепла в процессе сушки. Эти параметры играют ключевую роль при выборе рациональных режимов сушки, так как показывают, насколько равномерно и быстро тепло передаётся через материал [8].

Для определения теплофизических свойств материала на практике используют разные экспериментальные методы. Так, теплопроводность можно измерять стационарными и нестационарными способами, удельную теплоёмкость с помощью калориметров, а температуропроводность с помощью методов лазерной вспышки или переходного теплового зонда. Кроме того, плотность материала определяют пикнометрическими или объёмными методами, а влажность термогравиметрическим способом [9]. Рисунок 1 иллюстрирует

анатомическое строение зерновки кукурузы, что позволяет визуально соотнести её внутренние компоненты – эндосперм, зародыш и оболочки – с полученными теплофизическими характеристиками. Различия в строении тканей определяют распределение плотности, влажности и теплопроводности, что важно для интерпретации результатов экспериментов при изменении влажности материала.

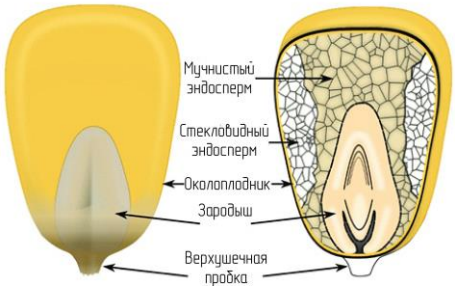


Рисунок 1 – Анатомическое строение зерновки кукурузы

Исследование теплофизических свойств початков кукурузы (прибор ИТП-МГ4 «100»).

Для измерения теплофизических свойств початков кукурузы использовался прибор ИТП-МГ4 «100» (Данный прибор рассчитан для определения свойств строительных материалов, есть какие-то дополнительные условия, например подготовка образца, для определения теплопроводности кукурузы?). Он работает так: через образец пропускается постоянный поток тепла, перпендикулярно его поверхности. Температуру на двух противоположных сторонах образца измеряют платиновые датчики, а термоэлементы Пельтье поддерживают стабильную разницу температур [10].

Измерения прибора включают температуру поверхности образца, плотность теплового потока и толщину материала. Затем вычисляют коэффициент теплопроводности, отражающий теплопроводящие свойства початка. Работы проводятся согласно ГОСТ 7076 для стационарного теплопереноса. Общий вид измерительного прибора показан на рисунке 2 [11].



Рисунок 2 – Общий вид измерительного прибора ИТП-МГ4 «100»

1 – исследуемый материал (початки кукурузы); 2 – камера испытаний; 3 – электронный блок управления

Значение теплопроводности материала λ вычисляли на основе теплового потока, проходящего через исследуемый образец, по уравнению стационарной теплопередачи [12]

$$\lambda = \frac{H \cdot q}{T_н - T_х}, \quad (1)$$

λ – коэффициент передачи тепла, Вт/м·К;

q – плотность постоянного теплового потока, через исследуемый образец, Вт/м^2;

$T_н$ – температура нагретой грани образца, К;

H – толщина измеряемого образца, мм;

$T_х$ – температура холодной грани образца, К.

Расчёт теплового сопротивления образца початка кукурузы проводили по формуле [12]:

$$R_{\text{н}} = \frac{T_{\text{н}} - T_{\text{х}}}{q} - 2 \cdot R_{\text{к}}, \quad (2)$$

$R_н$ – тепловое сопротивление исследуемого материала, м^2·К/Вт;

$R_к$ – сопротивление теплообмену между лицевой стороной образца и рабочей поверхностью прибора., м^2·К/Вт.

Удельную теплоёмкость рассчитывали по формуле [13]:

$$c = \frac{q}{m \cdot \Delta T}, \quad (3)$$

q – тепло, передающееся от внутренней к внешней поверхности шарового слоя початка кукурузы, Вт/м^2;

m – масса исследуемого образца початка кукурузы, кг;

ΔT – температурный перепад между горячей и холодной гранью $T_х$ ($T_н$-$T_х$), К

На основе рассчитанных значений теплопроводности λ и удельной теплоемкости вычисляли коэффициент температуропроводности [13]:

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}, \quad (4)$$

λ – теплопроводность, Вт/(м·К);

c – удельная теплоёмкость, кДж/(кг · К).

Для эксперимента образцы початков кукурузы размещались в рабочей камере ИТП-МГ4-100 (100×100 мм), где создавался постоянный температурный градиент, поддерживающий стационарный режим теплопередачи [12]. Датчики температуры, встроенные в прибор, фиксировали значения на нагретой и охлаждаемой сторонах образца, что позволяло точно измерить разность температур ΔT и плотность теплового потока q. На основе этих данных вычисляли теплопроводность λ, тепловое сопротивление $R_н$, теплоёмкость c и температуропроводность a по соответствующим формулам.

Исследование теплофизических свойств зерен кукурузы с помощью бикалориметра.

На рисунке 3 (а) показана установка на основе бикалориметра для изучения теплофизических свойств зерен кукурузы.

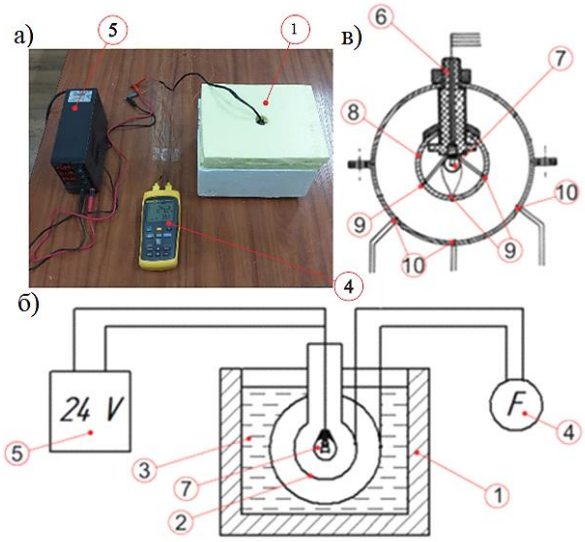


Рисунок 3 – Схема установки для определения теплофизических свойств зерна кукурузы:
а – общий вид установки; б – электрическая схема установки; в – схема шарового бикалориметра;
1 – термостат; 2 – шаровой бикалориметр; 3 – трансформаторное масло;
4 – термометр «Fluke»; 5 – источник питания, 6 – эбонитовый стержень; 7 – электрическая лампочка;
8 – внутренний шар; 9, 10 – внутренние и наружные термопары

Она состоит из двух медных сфер – внутренней и внешней, расположенных с общим центром. Диаметр внутренней сферы составляет 77,6 мм, а внутренний диаметр внешней – 42,3 мм. Зерна кукурузы помещаются в пространство между сферами для проведения измерений. В центре внутренней сферы установлена электрическая лампа, которая служит

источником тепла. Её мощность регулируется и контролируется с помощью ваттметра. Когда зерна плотно заполняют пространство между сферами, предполагается, что температура материала в местах соприкосновения с внутренними стенками совпадает с температурой медных сфер. Для измерения температурного перепада используется термометр «Fluke», оснащённый двумя термопарами. Одна термопара закрепляется на внутренней поверхности внешней сферы, а другая на внешней поверхности внутренней сферы. После того как пространство между сферами заполняется зерном и плотно закрывается, затем бикалориметр помещают в термостат с трансформаторным маслом, температура которого поддерживается постоянной. Активное перемешивание масла создаёт высокий коэффициент теплообмена ($\alpha \to \infty$). Внутренний источник тепла остаётся включённым на протяжении всего эксперимента. Как обеспечивается равномерность заполнения кукурузными зернами? Воздушные прослойки вносят погрешность Какие теплофизические характеристики определяли этим методом?

После помещения бикалориметра в термостат измеряют начальные температуры: T_1 на наружной поверхности внутренней сферы и T_2 на внутренней поверхности внешней сферы. Далее температуру записывали каждую минуту. Влажность зерна постепенно изменяли как изменяли влажность?, чтобы изучить её влияние на теплообмен. В эксперименте использовали пять образцов кукурузы одинаковой массы, но с разной влажностью. Перед экспериментом влажность определяли с помощью сушильного шкафа «ШС-40-02 СПУ» (рис. 3), а плотность зерна рассчитывали по массе и объёму образца.

$$\rho = \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{V}}, \tag{5}$$

где

ρ – массовая плотность початка кукурузы или зерна, кг/м^3;

m – объёмная масса зерна кукурузы, кг;

V – объем зернового материала, м^3.

Объём материала при изменении плотности определяли стандартным пикнометрическим методом. Для этого зерно загружали в цилиндр. Сначала фиксировали уровень жидкости в цилиндре, затем погружали материал. Разница между исходным и новым уровнем жидкости показывала объём зерна. В эксперименте также изучали, как влажность влияет на объёмную массу материала. Чтобы результаты были точными, все измерения проводили при контролируемой температуре и давлении. Для проверки достоверности данных проводились повторные эксперименты, а оборудование калибровали. Схема установки показана на рисунке 3.

На рисунке 4 представлен сушильный шкаф ШС-40-02, использованный для определения влажности початков и зерна кукурузы.



Рисунок 4 – Сушильный шкаф ШС-40-02 для определения влажности початков кукурузы и зерна

Сначала использовали измеренные значения температур и другие экспериментальные данные. По ним рассчитывали теплопроводность, теплоёмкость и температуропроводность материала.

Коэффициент теплопроводности исследуемого материала определялись по формуле а ранее писали по формуле 1 как это связано?:

$$\lambda = \frac{Q(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2})}{4\pi(T_{c1} - T_{c2})}, \tag{6}$$

где

Q – тепловой поток от внутренней стороны к наружной поверхности зерна, Вт;

R_1, R_2 – радиусы внутренней и наружной сфер, м;

T_{c1}, T_{c2}– температурный режим внутренней и наружной поверхности шарового слоя, ºС

Тепловой поток рассчитывали на основе мощности, потребляемой лампочкой, с использованием формулы:

$$Q = W, \tag{7}$$

где

W – мощность, подводимая к лампе, Вт.

Результаты исследования

На рисунках 5-7 представлены графические зависимости, показывающие, как теплофизические свойства початков кукурузы и зерна изменяются в зависимости от их влажности. Для обоих объектов характерна типичная для капиллярно-пористых растительных материалов зависимость теплофизических характеристик от содержания влаги. С увеличением влажности постепенно повышаются теплопроводность и удельная теплоёмкость материала. Рост теплопроводности объясняется замещением воздушных полостей влагой, обладающей большей теплопроводностью, чем воздух, что способствует более интенсивному переносу тепла через зерновую массу. Увеличение теплоёмкости связано с ростом количества связанной и свободной влаги, которая сама по себе хорошо накапливает тепло, что повышает общую способность материала удерживать тепловую энергию. При увеличении влажности температуропроводность уменьшается. Это происходит потому, что рост теплоёмкости и плотности материала замедляет распространение тепла внутри початков и зерна. Таким образом, высокая влажность помогает материалу накапливать тепло, но замедляет выравнивание температуры внутри него. Такое поведение теплофизических характеристик согласуется с закономерностями, характерными для большинства растительных материалов, отличающихся выраженной пористостью и влагоёмкостью.

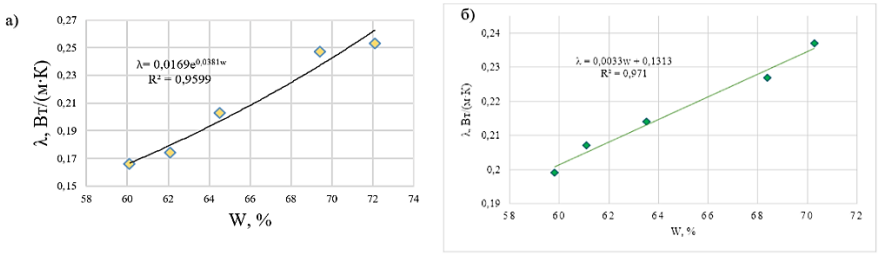


Рисунок 5 – Влияние влажности на теплопроводность початков кукурузы (а) и зерна (б)

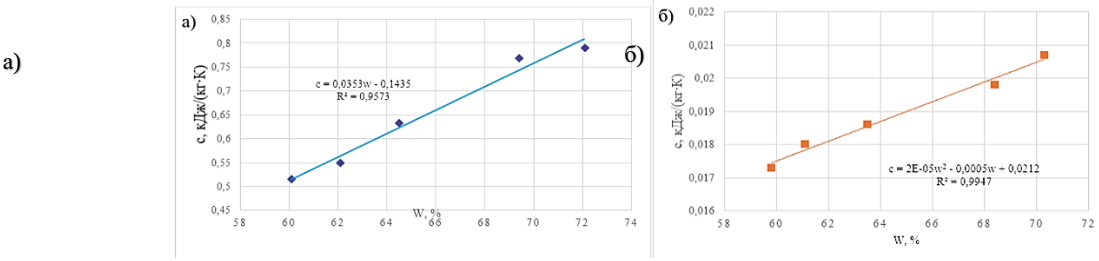


Рисунок 6 – Влияние влажности на теплоёмкость початков кукурузы (а) и зерна (б)

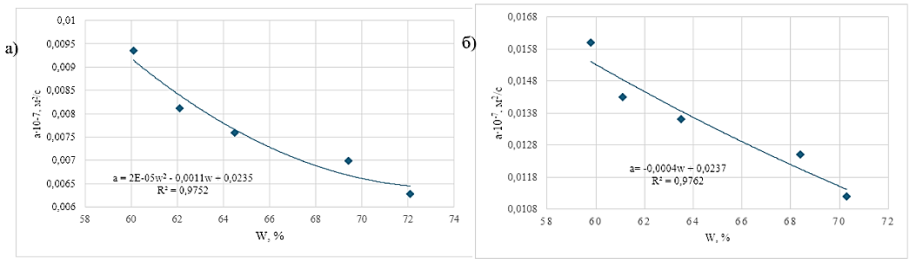


Рисунок 7 – Влияние влажности на температуропроводность початков кукурузы (а) и зерна (б)

На рисунках представлена, как изменяются основные теплофизические свойства зерна и початков кукурузы в зависимости от влажности. При увеличении влажности повышаются теплопроводность и удельная теплоёмкость, а температуропроводность наоборот снижается. На рисунке 5 видно, что теплопроводность зерна постепенно увеличивается при повышении влажности с 60 % до 72 %. Это связано с тем, что поры зерна заполняются влагой, а доля воздуха уменьшается. У початков кукурузы теплопроводность растёт более заметно, так как стержень и обёртки создают дополнительные пути для передачи тепла при увлажнении. На рисунке 6 видно, что удельная теплоёмкость зерна и початков кукурузы растёт с увеличением влажности, потому что вода удерживает тепло лучше, чем сухая часть растения. Увеличение теплоёмкости початков выражено сильнее из-за большей влагоёмкости и пористо-волокнистой структуры початков, удерживающих больше связанной воды. На рисунке 7 показано, что с увеличением влажности температуропроводность у зерна и початков кукурузы уменьшается. Это происходит из-за роста теплоёмкости и плотности материала, что замедляет распространение тепла. У початков снижение температуропроводности выражено сильнее из-за их сложной и неоднородной структуры. Следовательно, с увеличением влажности кукуруза лучше накапливает и проводит тепло, но тепловой поток распространяется медленнее. Эти данные важны для выбора оптимальных режимов сушки зерна и початков, чтобы сохранить качество и снизить затраты энергии при обработке.

Выводы

Для изучения теплофизических свойств и плотности зерна и початков кукурузы использовались числовые коэффициенты (какие именно и что за коэффициенты) для расчёта параметров оборудования для сушки и тепловой обработки. Метод исследования выбирали с учётом структуры материала для зерна использовали шаровой бикалориметр, который точно измеряет теплофизические свойства однородных и рыхлых образцов, а для початков кукурузы использовали прибор ИТП МГ4-100, подходящий для более сложной структуры и минимизации потерь тепла. Результаты показали, что при влажности зерна от 59,8 до 72,1 % теплофизические свойства изменяются следующим образом: удельная теплоёмкость увеличивается с 0,0173 до 0,0207 кДж/(кг·К), теплопроводность – с 0,199 до 0,237 Вт/(м·К), а температуропроводность снижается с $0{,}016 \cdot 10^{-7}$ до $0{,}0112 \cdot 10^{-7}$ м²/с.

При влажности 60,1-70,3 % у початков кукурузы заметно увеличиваются теплофизические свойства. Удельная теплоёмкость возрастает с 0,516 до 0,79 кДж/(кг·К), теплопроводность – с 0,166 до 0,253 Вт/(м·К), а температуропроводность снижается с $0{,}00935 \cdot 10^{-7}$ до $0{,}00628 \cdot 10^{-7}$ м²/с..

Полученные результаты закономерностей хорошо согласуются предыдущих исследований согласуются с литературными данными по теплофизическим свойствам капиллярно-пористых растительных материалов, приведёнными в работах Гинзбурга А.С., Буткова В.М., Mohsenin M.A., Choi S. и др. растительных материалов с похожей пористой структурой. Эти зависимости могут быть использованы при разработке и оптимизации конструктивно-технологических параметров оборудования для сушки зерна и початков кукурузы, что позволяет улучшить энергетическую эффективность процесса и сохранить качественные свойства сырья.

Список литературы

1. Szymanek, M. Influence of sweet corn harvest date on kernels quality / M. Szymanek // Research in Agricultural Engineering. – 2009. – № 55(1). – P. 10-17. https://doi.org/10.17221/13/2008-RAE.
2. Initial Moisture Content of Corncobs Plays an Important Role in Maintaining its Quality during Storage / L. Mukkun et al // agriTECH. – 2018. – Vol. 38, № 2. https://doi.org/10.22146/agritech.26663
3. Кузьмин, И.И. Научное обоснование повышения уровня гибридности семян кукурузы и технологии послеуборочной их переработки на заводах: автореф. дисс. канд.техн.наук. – М., 1999. – 24 с.
4. Пермяков В.Н. Обоснование режимов сушки початков кукурузы в толстом слое / В.Н. Пермяков, Ф.Р. Сафин // Известия оренбургского государственного аграрного университета. – 2021. – № 6(92). – С 150-153. https://doi.org/10.37670/2073-0853-2021-92-6-150-153.
5. Бакиев И.Т. Интенсификация процесса сушки початков кукурузы: автореф. дисс. канд.техн.наук. – Санкт-Петербург – Павловск, 2005.

6. Бакиев И.Т. Выбор режима сушки початков кукурузы / И.Т. Бакиев, И.Х. Масалимов, В.Н. Пермяков // Материалы XLII научно-технической конференции Челябинского государственного агроинженерного университета. – Челябинск, ЧГАУ, 2003, – Ч.2. – С. 36-38.
7. Кирпа М.Я. Кукуруза: сбор, сушка, качество: Монография / М.Я. Кирпа, Г.Н. Станкевич, М.О. Стюрко. – Одесса: КП ОМД, 2015. – 150 с.
8. Яковенко В.А. Сушка и хранение кукурузы: Монография. / В.А. Яковенко, Д.В. Гольберг. – Одесса: Одесское книжное изд-во, 1960. – 29 с.
9. Александр С.П. Теоретическое исследование тепловых процессов при экструдировании зерна кукурузы / С.П. Александр, К. Р. Георгий, Н.Б. Сергей // Вестник РГАТУ. – 2024. – т. 16, № 1. – С.195-200.
10. Contribution to thermal and acoustic characterization of corn cob / M. Bovo et al // Исследование термических свойств початков кукурузы. – 2022. – Том 262. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111994.
11. ГОСТ 7076. Методы определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме. – 1999.
12. СКБ «Стройприбор». Измерители теплопроводности ИТП-МГ4 «100», ИТП-МГ4 «250», ИТП-МГ4 «300». Техническое описание прибора, принцип работы, спецификации. stroypribor.com
13. Гинзбург, А.С. Теплофизические характеристики пищевых продуктов: А.С. Гинзбург, М.А. Громов, Г.И. Красовская // Пищевая промышленность. – Москва, 1990. – 288 с.

References

1. Szymanek, M. Influence of sweet corn harvest date on kernels quality / M. Szymanek // Research in Agricultural Engineering. – 2009. – № 55(1). – R. 10-17. https://doi.org/10.17221/13/2008-RAE. (In English).
2. Initial Moisture Content of Corncobs Plays an Important Role in Maintaining its Quality during Storage / L. Mukkun et al // agriTECH. – 2018. – Vol. 38, № 2. https://doi.org/10.22146/agritech.26663. (In English).
3. Kuz`min, I.I. Nauchnoe obosnovanie povy`sheniya urovnya gibridnosti semyan kukuruzy` i texnologii posleuborochnoj ix pererabotki na zavodax: avtoref. diss. kand.texn.nauk. – M. – 1999. – 24 s. (In Russian).
4. Permyakov V.N. Obosnovanie rezhimov sushki pochatkov kukuruzy` v tolstom sloe / V.N. Permyakov, F.R. Safin // Izvestiya orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2021. – № 6(92). – S 150-153. https://doi.org/10.37670/2073-0853-2021-92-6-150-153. (In Russian).
5. Bakiev I.T. Intensifikaciya processa sushki pochatkov kukuruzy`: avtoref. diss. kand.texn.nauk. – Sankt-Peterburg – Pavlovsk – 2005. (In Russian).
6. Bakiev I.T. Vy`bor rezhima sushki pochatkov kukuruzy` / I.T. Bakiev, I.X. Masalimov, V.N. Permyakov // Materialy` XLII nauchno-texnicheskoj konferencii Chelyabinskogo gosudarstvennogo agroinzhenernogo universiteta.- Chelyabinsk, ChGAU, 2003, – Ch.2. – S. 36-38. (In Russian).
7. Kirpa M.Ya. Kukuruza: sbor, sushka, kachestvo: Monografy`ya / M.Ya. Kirpa, G.N. Stankevich, M.O. Styurko. – Odessa: KP OMD, 2015. – 150 s. (In Russian).
8. Yakovenko V.A. Sushka i xranenie kukuruzy`: Monografiya. / V.A. Yakovenko, D.V. Gol`berg. – Odessa: Odesskoe knizhnoe izd-vo, 1960. – 29 s. (In Russian).
9. Aleksandr S.P. Teoreticheskoe issledovanie teplovy`x processov pri e`kstrudirovanii zerna kukuruzy` / S.P. Aleksandr, K. R. Georgij, N.B. Sergej // Vestnik RGATU. – 2024. – t. 16, № 1. – S.195-200. (In Russian).
10. Contribution to thermal and acoustic characterization of corn cob / M. Bovo et al // Issledovanie termicheskix svojstv pochatkov kukuruzy`. – 2022. – Tom 262. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111994. (In English).
11. GOST 7076. Metody` opredeleniya teploprovodnosti i termicheskogo soprotivleniya pri stacionarnom teplovom rezhime. 1999. (In Russian).
12. SKB «Strojpribor». Izmeriteli teploprovodnosti ITP MG4 «100», ITP MG4 «250», ITP MG4 «300». Texnicheskoe opisanie pribora, princip raboty`, specifikacii. stroypribor.com. (In Russian).
13. Ginzburg, A.S. Teplofizicheskie xarakteristiki pishhevy`x produktov: A.S. Ginzburg, M.A. Gromov, G.I. Krasovskaya // Pishhevaya promy`shlennost`. – Moskva, 1990. – 288 s. (In Russian).

Информация о финансировании *Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан по проекту «AP26199873 Разработка энерго- и ресурсосберегающей гибридной технологии транспортировки, хранения и складирования початков кукурузы с одновременной осциллирующей сушкой в контейнерах с использованием гелиовоздушных коллекторов и теплонасосной установки».*

И.М. Дауренова[1,2*], Д.М. Тойбазар[1,2], А.Б. Мустафаева[3], Б.А. Урмашев[4], М.Ж. Хазимов[1,2]
[1]Ғұмарбек Даукеев атындағы Алматы Энергетика және Байланыс Университеті,
050013, Қазақстан, Алматы қ., Байтұрсынұлы к-сі, 126/1
[2]Қазақ Ұлттық Аграрлық Зерттеу Университеті,
050010, Қазақстан, Алматы қ., Абай д-лы, 8.
[3]Қазақ-Британ техникалық университеті,
050000, Қазақстан, Алматы қ., Төле би к-сі, 59
[4]Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,
050040, Қазақстан, Алматы қ., Әл-Фараби д-лы, 71
*e-mail: indikow-88-kz@mail.ru

ЖҮГЕРІ СОБЫҚТАРЫНЫҢ ТЕРМОФИЗИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН АНЫҚТАУ

Жұмыста әртүрлі ылғалдылық деңгейлеріндегі жүгері дәнінің және жүгері собығының жылуфизикалық қасиеттері қарастырылды. Зерттеудің мақсаты – жүгеріні жылулық өңдеу және кептіру процестерін талдау үшін жылусыйымдылықты, жылуөткізгіштікті және температураөткізгіштікті анықтау болды. Қосымша түрде жүгері дәні мен собығының тығыздығын қоса алғанда, жылуфизикалық сипаттамалары анықталып, олардың ылғалдылық деңгейіне тәуелділігі белгіленді. Алынған тәуелділіктер жүгеріні кептіру және сақтау кезінде жылу мен ылғалдың тасымалдану процестерін неғұрлым дәл сипаттауға мүмкіндік береді.Жүгері собығының жылуфизикалық қасиеттерін анықтау үшін негізгі жылуфизикалық параметрлерді қажетті дәлдікпен өлшеуді қамтамасыз ететін ИТП МГ4-100 аспабы қолданылды. Сонымен қатар, жүгері дәнінің жылуфизикалық қасиеттерін анықтау және материалдың негізгі жылулық сипаттамаларын есептеу үшін шарлы бикалориметр пайдаланылды. Жүгері собықтарының беткі температуралық параметрлерін өлшеу «Fluke» инфрақызыл термометрі арқылы жүзеге асырылды, бұл эксперимент барысында температураны бақылауға мүмкіндік берді.Үлгілерді кептіру белгіленген температура және ылғалдылық режимдерінде «ШС-40 СПУ» кептіру қондырғысында жүргізілді. Зерттеу барысында әртүрлі ылғалдылықтағы жүгері дәні мен собығының жылуфизикалық қасиеттері анықталды. Сондай-ақ ылғал алмасу процестері зерттеліп, кептіру нәтижесінде өнімнің ылғалдылығы 72%-дан 60%-ға дейін төмендеді. Эксперименттік деректер мен алынған тәуелділіктерді талдау жүгеріні кептірудің тиімділігін арттыруды қамтамасыз ететін жылулық өңдеу және кептіру технологияларын әзірлеуге ықпал етеді.

Түйін сөздер: *жүгері дәні, жүгері собығы, жылуфизикалық қасиеттер, шарлы бикалориметр, ИТП МГ4-100.*

D.M. Toibazar[1,2], I.M. Daurenova[1,2*], A.B. Mustafaeva[3], B.A. Urmashev[4], M.Zh. Khazimov[1,2]
[1]Gumarbek Daukeev Almaty University of Energy and Communications,
050013, Republic of Kazakhstan, Almaty, Baitursynuly street, 126/1
[2]Kazakh National Agrarian Research University,
050000, Republic of Kazakhstan, Almaty, Abay avenue, 8
[3]Kazakh-British Technical University,
050000, Republic of Kazakhstan, Almaty, Tole bi street, 59
[4]Al-Farabi Kazakh National University,
050040, Republic of Kazakhstan, Almaty, Al-Farabi avenue, 71
*e-mail: indikow-88-kz@mail.ru

DETERMINATION OF THE THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF CORN COB

This study examines the thermophysical properties of corn grain and corn cobs at various moisture content levels. The aim of the research was to determine the specific heat capacity, thermal conductivity, and thermal diffusivity for the analysis of thermal treatment and drying processes of corn. In addition, thermophysical characteristics, including the density of corn grain and cobs, were determined, and the dependence of these parameters on moisture content was established. The obtained relationships allow for a more accurate description of heat and moisture transfer processes during the drying and storage of corn. To

determine the thermophysical properties of corn cobs, the ITP MG4-100 device was used, which provides measurement of the main thermophysical parameters with the required accuracy. A spherical bicalorimeter was also employed to determine the thermophysical properties of corn grain and to calculate the main thermal characteristics of the material. Measurement of temperature parameters on the surface of corn cobs was carried out using a Fluke infrared thermometer, which enabled temperature monitoring during the experiment. Drying of the samples was performed in the «ShS-40 SPU» drying unit within specified temperature and humidity ranges. During the study, the thermophysical properties of corn grain and cobs at different moisture contents were determined. Moisture transfer processes were also investigated; as a result of drying, the moisture content of the product decreased from 72% to 60%. Analysis of the experimental data and the obtained relationships contributes to the development of thermal treatment and drying methods aimed at improving the efficiency of corn drying.

Key words: *corn grain, corn cobs, thermophysical properties, spherical bicalorimeter, ITP MG4-100.*

Сведения об авторах

Даулет Мейирұлы Тойбазар – старший преподаватель кафедры «Электроэнергетические системы» Алматинский университет энергетики и связи, г. Алматы, Казахстан; e-mail: d.toibazar@gmail.com. ORCID https://orcid.org/0009-0002-4978-4400.

Индира Маликовна Дауренова* – доктарант, Казахский национальный аграрный исследовательский университет», г. Алматы, Казахстан; e-mail: indikow-88-kz@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-0155-6954.

Ардақ Болатқызы Мустафаева – сениор-лектор школа прикладной математики, «Казахстанско-Британский технический университет», г. Алматы, Казахстан; e-mail: mustafayeva.ab@gmail.com. ORCID https://orcid.org/ 0009-0008-0312-016X.

Байдаулет Амантаевич Урмашев – профессор, кафедра компьютерных наук факультета информационных технологий, Казахский национальный университет имени Аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан; e-mail:baydaulet.urmashev@gmail.com. ORCID https://orcid.org/ 0000-0001-7641-198X.

Марат Жалелович Хазимов – кандидат технических наук, профессор, кафедра «Теплоэнергетики и физика» Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, г. Алматы, Казахстан; e-mail: mkhazimov@gmail.com. ORCID https://orcid.org/0000-0001-5448-3122.

Авторлар туралы мәліметтер

Даулет Мейирұлы Тойбазар – «Электр энергетикасы» кафедрасының аға оқытушысы, Г. Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы қ., Қазақстан; e-mail: d.toibazar@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-4978-4400.

Индира Мәлікқызы Дауренова* – «Энергетика және электротехника» кафедрасының, доктаранты, Қазақ ұлттық аграрлық зерттеу университеті, Алматы қ. Қазақстан; e-mail: indikow-88-kz@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-0155-6954.

Ардақ Болатқызы Мустафаева – Қолданбалы математика мектебінің сениор-лекторы, Қазақ-Британ техникалық университеті, Алматы қ., Қазақстан; e-mail: mustafayeva.ab@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/ 0009-0008-0312-016X.

Байдаулет Амантаевич Урмашев – Ақпараттық технологиялар факультеті, Информатика кафедрасының профессоры, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан; e-mail:baydaulet.urmashev@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/ 0000-0001-7641-198X.

Марат Жалелович Хазимов – «Жылуэнегретикасы және физика» кафедрасының профессоры Г. Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы қ. Қазақстан; e-mail: mkhazimov@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5448-3122.

Information about the authors

Daulet Toibazar – Senior Lecturer, Department of Electric Power Systems, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications, Almaty, Kazakhstan; e-mail: d.toibazar@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-4978-4400.

Indira Daurenova* – PhD doctoral student, Kazakh National Agrarian Research University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: indikow-88-kz@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-0155-6954.

Ardak Mustafayeva – Senior Lecturer, School of Applied Mathematics, Kazakh-British Technical University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: mustafayeva.ab@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-0312-016X.

Baydaulet Urmashev – Professor, Department of Computer Science, Faculty of Information Technologies, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: baydaulet.urmashev@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7641-198X.

Marat Khazimov – Candidate of Technical Sciences, Professor, Department of Thermal Power Engineering and Physics, Gumarbek Daukeyev Almaty University of Power Engineering and Telecommunications, Almaty, Kazakhstan; e-mail: mkhazimov@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5448-3122.

Поступила в редакцию 14.01.2026
Поступила после доработки 27.03.2026
Принята к публикации 30.03.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-59

МРНТИ 31.15.10

И.М. Дауренова[1,2*], Д.М. Тойбазар[1,2], А.Б. Мустафаева[3], Б.А. Урмашев[4], М.Ж. Хазимов[1,2]
[1]Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева,
050013, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Байтурсынова, 126/1
[2]Казахский национальный аграрный исследовательский университет,
050010, Республика Казахстан, г. Алматы, пр. Абая, д. 8
[3]Казахстанско-Британский технический университет,
050000, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Толе би, 59
[4]Казахский национальный университет имени Аль-Фараби,
050040, Республика Казахстан, г. Алматы, пр. Аль-Фараби, 71
*e-mail: daurenovaindira1@gmail.com

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОВОЙ МОЩНОСТИ ГЕЛИОКОЛЛЕКТОРА ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОЙ СУШКИ КУКУРУЗЫ

Аннотация: *В статье представлено исследование процесса сушки кукурузы с использованием экспериментальной сушильной установки, работающей на базе воздушного солнечного коллектора. Проведены теплотехнические эксперименты, включающие измерение скорости воздушного потока и регистрацию изменения влажности кукурузы в процессе сушки. Дополнительно выполнен анализ конструктивных и эксплуатационных характеристик солнечного гелиоколлектора, исследованы показатели солнечной радиации в зоне эксперимента, что обеспечило оценку уровня доступной солнечной энергии и её влияния на эффективность нагрева воздуха. Проведённые исследования позволили определить тепловую мощность воздушного коллектора, оценить распределение температур по его длине и установить оптимальные параметры работы системы. Установлено, что использование солнечного нагрева обеспечивает значительное снижение энергозатрат на сушку кукурузы, повышает энергоэффективность процесса и способствует устойчивому использованию возобновляемых источников энергии. Дополнительно выполнено сравнение экспериментальных данных с расчётными зависимостями, что позволило уточнить кинетику влагопереноса и теплообмена в слое кукурузы. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и модернизации солнечных сушильных установок для сельскохозяйственной продукции, а также для обоснования рациональных режимов сушки в условиях переменной инсоляции и естественной вентиляции.*

Ключевые слова: *солнечные коллекторы, сушка кукурузы, солнечная радиация, пиранометр GSM/O-120, измерение излучения.*

Введение

Кукуруза является одной из ключевых зерновых культур, востребованных для продовольственных, кормовых и технических целей [1]. Высокая урожайность, универсальность использования и ценность химического состава делают её важным компонентом агропромышленного комплекса. Важнейшим элементом растения, определяющим продуктивность и качество урожая, является початок кукурузы [2].

Поздние сроки уборки и несвоевременная сушка негативно влияют на качество зерна, приводят к трещинам и повреждению початков, снижая товарную и семенную ценность [3]. Оптимальная влажность зерна для хранения и транспортировки составляет 14 –15%, при

©И.М. Дауренова, Д.М.Тойбазар, А.Б. Мустафаева, Б.А. Урмашев, М.Ж. Хазимов, 2026

пересушивании повышается количество брака. Содержание жира и белка в зерне кукурузы выше, чем у большинства других зерновых культур, что повышает её питательную и экономическую ценность [4].

Сушка кукурузы является одним из наиболее энергоёмких этапов послеуборочной обработки: потребление энергии на сушку початков в 4-5 раз выше, чем у других зерновых культур. В современных условиях значительные энергозатраты можно снизить за счёт внедрения энергоэффективных технологий и использования возобновляемых источников энергии, в частности солнечных коллекторов [5].

Широкое распространение получили сушилки косвенного нагрева на дизельном топливе, где до 30% всех затрат на производство приходится на сушку зерна. Использование солнечных коллекторов позволяет сократить расход топлива, снизить себестоимость продукции и повысить экологичность процесса. Разработка оптимальных температурных режимов сушки и внедрение энергосберегающих технологий являются актуальными задачами для повышения рентабельности производства [6].

Цель данного исследования – оценить возможность применения воздушных солнечных коллекторов для сушки кукурузы на примере сельскохозяйственного предприятия юга Казахстана, определить оптимальные параметры гелиоколлектора и режимы сушки, обеспечивающие сохранность зерна и снижение энергозатрат.

Научная новизна исследования заключается в экспериментальном определении тепловой мощности воздушного гелиоколлектора малой мощности в климатических условиях юга Казахстана. В работе выполнено сопоставление экспериментальных измерений солнечной радиации с данными платформы Global Solar Atlas, определён коэффициент светопропускания полиэтиленового покрытия коллектора и установлена зависимость температурного режима нагрева воздуха от скорости воздушного потока в канале коллектора. Полученные результаты позволяют уточнить теплотехнические характеристики гелиоколлекторов, применяемых в сельскохозяйственных сушильных установках.

Материалы и методы исследования

При анализе работы воздушного солнечного коллектора основное внимание уделялось его способности поглощать солнечное излучение и характеристикам прозрачной полиэтиленовой плёнки, влияющим на проникновение света [7]. Расчёт температур абсорбера и проходящего через коллектор воздушного потока осуществлялся путём составления теплового баланса и применения радиационных зависимостей, вытекающих из закона Стефана-Больцмана [8].

Модель была упрощена за счёт предположения, что температура абсорбирующей поверхности в пределах коротких временных интервалов остаётся почти постоянной, а теплопотери через нижний изолированный слой можно считать незначительными. В итоге работоспособность коллектора в первую очередь определяется тем, насколько сильно нагревается поглощающая поверхность и какие температурные параметры достигает воздух на выходе. На рисунке 1 показано схема воздушного гелиоколлектора.

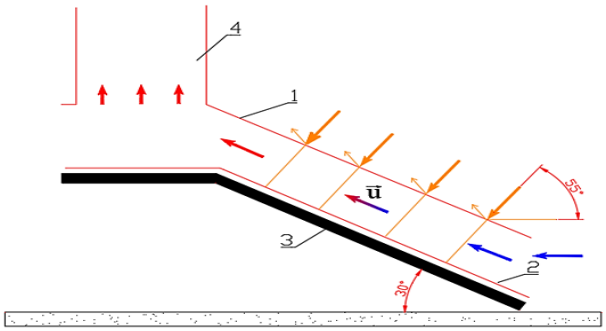


Рисунок 1 – Схема воздушного гелиоколлектора
1– прозрачная полиэтиленовая пленка; 2 – абсорбер; 3 – теплоизолятор;
4-нагретый воздух после гелио коллектора

Для упрощения расчета приняты следующие допущения: в рассматриваемый короткий промежуток времени температура абсорбера постоянна; потери теплоты через изоляцию дна коллектора являются незначительными. Солнечное излучение проходит через прозрачной

бесцветной полиэтиленовой пленки коэффициентом отражения 21 %. Учитывая потери теплового потока солнечной радиации при прохождении сквозь пленки коэффициентами отражения k, уравнение баланса теплового потока имеет вид:

$$q \cdot k = \varepsilon \cdot \sigma \left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right], \quad (1)$$

где:

σ=5,67 вт/м^{2}К^4 – постоянная Стефана – Больцмана;

ε = 0,8 – степень черноты тела;

k = 20% – коэффициентом отражения пленки.

Место проведения исследования (Алматинская область) находится на расположенную на северной широте 43.89568° и 70.37812° восточной долготы.

При вынужденной конвекции модель теплообмена в воздушном коллекторе запишется в виде.

$$q \cdot k = \varepsilon \cdot \sigma \left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right] + \alpha \frac{(\Delta t' - \Delta t'')}{ln\frac{\Delta t'}{\Delta t''}}, \quad (2)$$

где:

α – коэффициент теплообмена, W/(m^2 K).

Работа выполнялась в Алматинской области с целью изучения возможностей использования солнечной энергии и анализа климатических особенностей региона. Для оценки доступной солнечной радиации были использованы сведения платформы Global Solar Atlas, разработанной Всемирным банком при поддержке программы ESMAP [9]. Полученные данные о средней глобальной горизонтальной радиации и потенциальной солнечной генерации, в том числе для города Алматы, подтвердили эффективность применения гелиосушильных систем в этих климатических условиях.

В рамках исследования в этом регионе была измерена плотность солнечной энергии с использованием пиранометра, а полученные результаты сопоставлены с данными ГИС (рис. 2).

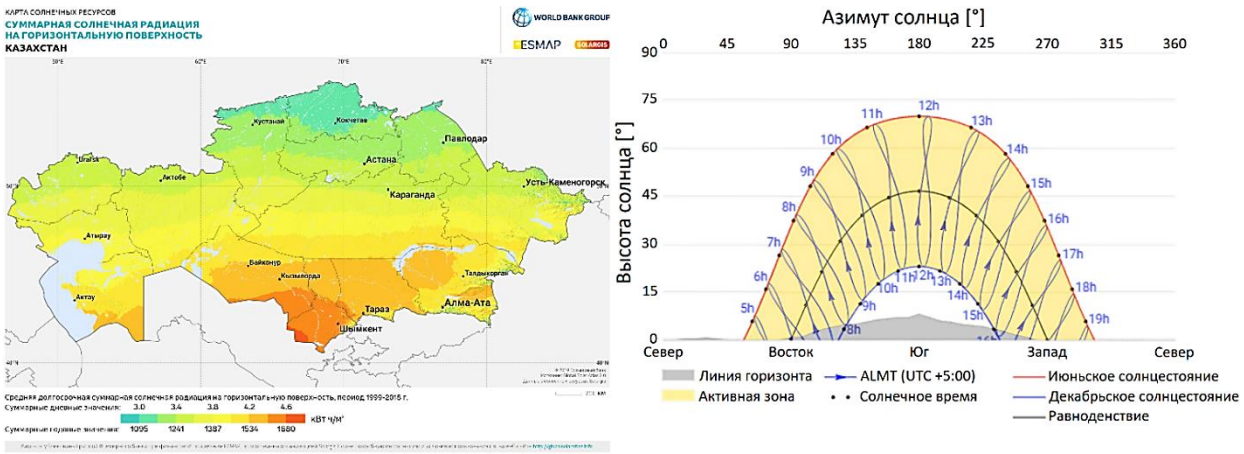


Рисунок 2 – Показатели солнечной радиации в зоне исследований:
а – Глобальное горизонтальное излучение; б – Солнечный азимут

В июне 2025 года на производственной базе Казахского Национального Аграрного Исследовательского Университета были проведены экспериментальные исследования теплопередачи. В качестве исследуемого устройства использовался солнечный коллектор размерами 1,5× 0,5 × 0,5 м. Эксперименты проводились при естественном дневном солнечном освещении. После выхода установки на квазистационарный режим при заданной интенсивности солнечного излучения выполнялись измерения температуры воздуха на входе (T′) и выходе (T″), температуры стенок абсорбера, а также скорости движения воздуха. Коэффициент теплопередачи абсорбера определялся после установления стабильной температуры его поверхности при постоянной солнечной радиации. Для каждой серии опытов тепловой поток рассчитывался с использованием соответствующего уравнения.

$$Q = G \cdot C_p(T'' - T'). \quad (3)$$

Расход воздуха была вычислен по формуле:

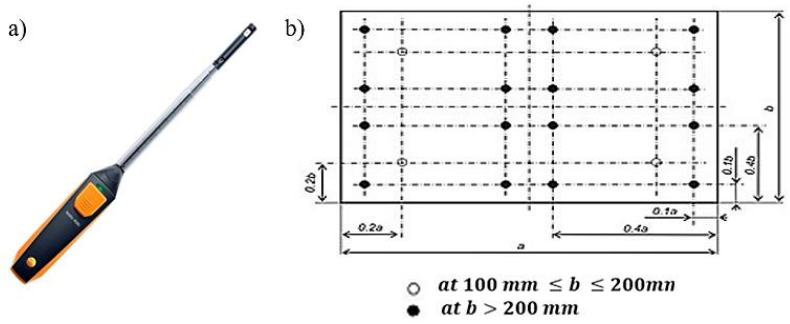
$$G = U \cdot \rho \cdot S, \quad (4)$$

где:

ρ =1,293 кг/м^3– плотность воздуха;

S – площадь поперечного сечения канала, м^2.

Скорость потока воздуха U была определена путем измерения с помощью смарт прибора (Тесто-смарт 405i) погрешность прибора $\pm(0{,}1$ м/с + 5%) согласно стандарту (рис. 3).



а) в)

Рисунок 3 – Измерение скорости потока воздуха в солнечном коллекторе

а – общий вид прибора Тесто-смарт 405i; в – схема замера скорости потока

Расчет коэффициента теплоотдачи (α) осуществлялся по формуле:

$$\propto = \frac{Q}{F\,(t_w - t_l)}, \quad (5)$$

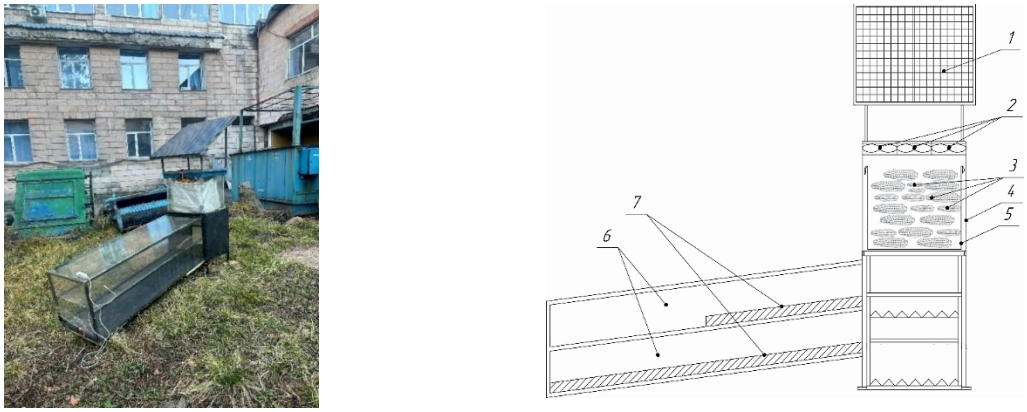
где:

F – площадь коллектора, м^2;

t_w – температура поверхности коллектора, °С;

t_l – температура воздуха на поверхности коллектора, °С.

В эксперименте измерялась плотность солнечной радиации на внешней поверхности покрытия и под плёнкой коллектора для определения коэффициента её светопропускания (рис. 4). На рисунке 4а слева показана реальная установка, а на рисунке 4б справа – её схематическое представление.



а) б)

а) общий вид оборудования; б) схема расположения приборов;

Рисунок 4 – Устройство для сушки початков кукурузы

1 – солнечная панель; 2 – батареи для вентиляторов вытежки; 3– початки кукурузы; 4 – короб из оргстекла; 5 – биг бэг; 6 – прозрачная пленка над солнечным коллектором; 7 – солнечные коллекторы

Солнечная радиация, зарегистрированная под плёнкой, отражает ту часть энергии, которая действительно проникает внутрь камеры, формируя внутренний энергетический поток системы. Сравнение значений излучения до и после фильтрации позволяет определить коэффициент светопропускания плёнки и оценить её роль в снижении тепловых потерь

коллектора. Таким образом, проведённое исследование направлено на количественную характеристику прозрачности покрытия и его влияния на общий энергетический баланс солнечного коллектора.

Результаты исследований

В результате проведенного экспериментального исследования была получена графическая зависимость температуры воздуха по длине солнечного коллектора для обогрева воздуха при различных значениях скоростей потока (рис. 5).

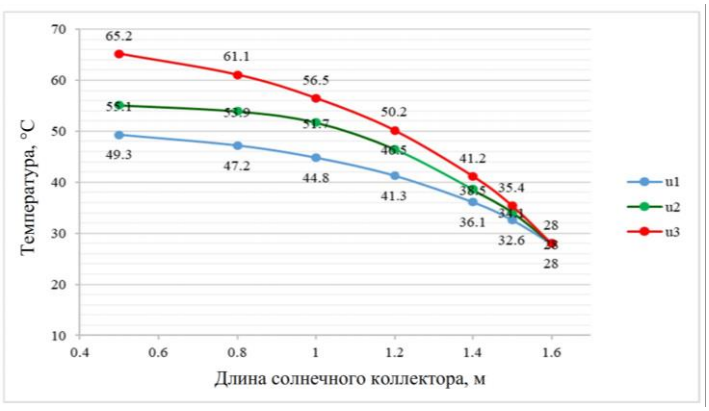


Рисунок 5 – Распределение температуры воздуха по длине солнечного коллектора сушилки при варьировании скорости движения воздуха

На основаниях полученных данных были обоснованы и комплектованы параметры солнечного коллектора для обогрева воздуха (табл. 1, 2).

Таблица 1 – Результаты измерения солнечной радиации и температуры коллектора в течение суток

Часы суток	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	17-18	18-19
Суммарная солнечная радиация, вт/м^2	305	500	615	693	738	763	761	729	683	615	525	405
Температура коллектора, °С	67	89	97	103	106	110	109	105	101	97	91	80

Таблица 2 – Технические характеристики электрической сушильной установки для сравнительного анализа

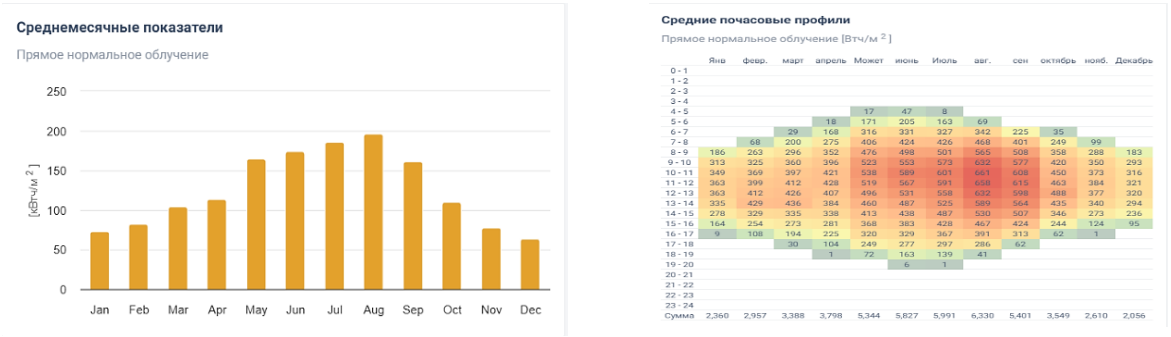
Показатели сушилок	Макетный образец модели сушилка электронагревом воздуха
Потребляемое напряжение, В	220
Потребляемая мощность электромоторов вентилятора, Вт	1600
Потребляемая мощность для нагрева воздуха, Вт	2000
Источник питания	Электросеть (220В)
Автономный источник питания	-
Контроллер электросистемы	ТРМ-1

Кукуруза в Казахстане является самой высокоурожайной зерновой и основной кормовой культурой универсального использования. Территория Республики Казахстан отличается разнообразием климатических условий – от холодных степей севера до жарких и сухих полупустынь южных районов [10]. Это обуславливает выращивание и производство гибридов кукурузы разных групп созревания от раннеспелых до позднеспелых. В последние годы в республике наметилась тенденция на переработку кукурузы в пищевых целях, хотя основным было и остается использование ее на корм [11].

Сушка кукурузы является одним из ключевых этапов при уборке урожая, позволяющим значительно увеличить срок её хранения [12].

Сушка кукурузы в оптимальном режиме способствует повышению всхожести и энергии прорастания зерна. Правильно высушенная кукуруза обеспечивает более высокий урожай по сравнению с зерном, высушенным естественным способом на воздухе [13].

Графики на рисунке 6 отражают сезонные и суточные колебания температуры, обусловленные изменением интенсивности солнечного излучения. Амплитуда пиков показывает эффективность нагрева в разные периоды года, достигая максимума в летние месяцы (июль, август) и минимума в зимние (декабрь) [9].



а) б)

Рисунок 6 – Показатели солнечной радиации в зоне исследований
а – Среднемесячные значения; б – Средние часовые профили

Статистические данные за несколько лет показывают, (рис 6), что среднегодовая величина глобальной горизонтальной радиации в регионе составляет 1470,3 кВт·ч/м², что свидетельствует о высоком солнечном потенциале. Показатель прямого солнечного излучения достигает 1494,2 кВт·ч/м², а рассеянного – 600,8 кВт·ч/м², что играет решающую роль при проектировании систем, использующих оба типа солнечной энергии. Расчёты годовой потенциальной выработки фотоэлектричества в стандартных условиях дают ориентировочно 1418,2 кВт·ч, что подтверждает эффективность применения солнечных технологий, включая гелиосушильные комплексы [14, 15]. Для достижения наилучших энергетических показателей солнечные модули следует устанавливать под углом 35° и ориентировать строго на юг (азимут 180°).

Дневные измерения солнечной радиации показали отчётливо выраженный суточный характер её распределения, типичный для устойчиво ясной погоды. Наибольшие значения плотности солнечного излучения фиксировались в промежутке между 12:00 и 13:00, когда поток достигал примерно 1000 Вт/м² на внешней поверхности и около 870 Вт/м² внутри сушильной установки. Этот период совпадает с максимальной высотой Солнца над горизонтом, что обеспечивает наиболее интенсивную инсоляцию и повышенную тепловую нагрузку на оборудование.

В утренние часы (05:00-08:00) облучённость возрастала постепенно по мере подъёма Солнца, а после 17:00 наблюдалось её равномерное снижение до минимальных значений порядка 0-200 Вт/м². Такой характер суточных колебаний свидетельствует о стабильных атмосферных условиях и позволяет более точно прогнозировать производительность солнечной сушильной установки. Дополнительный анализ этих данных может использоваться для оптимизации режима работы оборудования, выбора материалов и улучшения теплоизоляции конструкции.

Анализ величин облучённости снаружи и внутри сушильной камеры показал, что среднее снижение солнечного потока составляет примерно 13%, что эквивалентно коэффициенту пропускания плёночного материала 0,87. Такой уровень прозрачности соответствует действующим стандартам для гелиосушильных систем и подтверждает высокое качество применённого светопропускающего слоя. Небольшие потери излучения указывают на эффективное подавление излишних теплопотерь, благодаря чему покрытие способствует повышению энергетической отдачи всей установки. Это делает материал особенно подходящим для эксплуатации в условиях изменяющейся солнечной активности, обеспечивая устойчивый режим работы сушильной камеры на протяжении всего светового дня.

Определение потерь солнечной радиации через прозрачную плёнку. Для оценки величины потерь солнечного излучения через прозрачную плёнку, установленную над воздухонагревательным коллектором, были выполнены измерения с использованием пиранометра, погрешность пиранометра GSM-120 - ±5%; (рис. 7).



Рисунок 7 – Интенсивность солнечной радиации

Заключение

Проведённые исследования подтвердили, что использование солнечной энергии в условиях Алматы является эффективным решением для сушки кукурузы. Измерения солнечной облучённости показали, что гелиосушильная установка способна поддерживать стабильный температурный режим в течение большей части светового дня, особенно в летний период с высокой инсоляцией. Сравнение локальных данных с данными Global Solar Atlas показало хорошее соответствие и подчеркнуло значимость учёта местных факторов, таких как угол падения солнечных лучей, наличие затенений и свойства плёночного покрытия.

Коэффициент пропускания плёнки, равный примерно 0,87, подтвердил её эффективность для щадящей сушки кукурузы, минимизируя тепловые потери и обеспечивая безопасный режим обработки сырья. Временной интервал с 9:00 до 16:00 обеспечивает оптимальные условия для сушки без привлечения дополнительной энергии, что делает гелиосушильные установки экономичным и экологически устойчивым решением для небольших и средних хозяйств.

Таким образом, результаты исследования демонстрируют, что правильный подбор конструкции и параметров гелиоколлектора позволяет достичь высокой энергоэффективности и стабильности процесса сушки, подтверждая перспективность солнечных технологий для агропромышленных нужд региона.

Список литературы

1. Sotchenko V.S. Technology of corn cultivation / V.S. Sotchenko, V.N. Bagrintseva // Bulletin of the Agroindustrial Complex of Stavropol Special. – 2015. – Issue № 2. – 79 б.
2. Alabushev A.V. Corn: biology, breeding, cultivation technology / A.V. Alabushev // Rostov n/A: Phoenix, 2018. – P. 45-78.
3. Popova T.N. Chemical composition and nutritional value of corn grain / T.N. Popova // Food Industry. – 2022. – № 5. – P. 32-36.
4. Перспективная технология сушк влажного зерна кукурузы / В.Н. Пермяков и др. // Башкирский государственный аграрный университет.
5. Энергоэффективная технология сушка зерна, использующая солнечную энергию / Н.Ю. Куртченко и др. // Известия. – 2022. – № 4(68).
6. Technology and system of power supply / O. Gorbenko et al // Determination on energy efficiency in corn grain drying.
7. Barantsev A.I. Solar energy: heat engineering and technology / A.I. Barantsev, V.M. Kuznetsov. – Moscow: Energiya, 2019. – P. 112-145.
8. Fedyanina V.Ya. Fundamentals of using non-traditional and renewable energy sources / V.Ya. Fedyanina, S.O. Khomutova, V.M. Ivanova, / ed.- Barnaul, LLC «MC EOR». – 2018.

9. Globalis Solaris Atlas [Fontes electronici] / Grex Argentariae Mundanae, ESMAP. – Modus accessus: https://globalsolaratlas.info.
10. Dzyuba V.A. Breeding and seed production of corn / V.A. Dzyuba, V.V. Kozlov. – Moscow: Kolos, 2017. – P. 23-56.
11. Kuzmin, I.I. Scientific justification of increasing the level of hybridity of corn seeds and the technology of their post-harvest processing at plants: abstract of the dissertation. ... Candidate of Technical Sciences, Moscow, 1999. – 24 p.
12. GOST 32882-2014 «Corn, fresh on the cob» (for processing for food purposes and for fresh consumption).
13. ГОСТ 13634-90 Межгосударственный стандарт. Кукуруза Требования пи заготовках и поставках. – Москва. Стандартинформ. – 2010.
14. Duffie J.A. Solar Engineering of Thermal Processes / J.A. Duffie, W.A. Beckman // 4th ed. John Wiley & Sons, 2013. – 936 p.
15. Mishenin E.V. Modellatio mathematica radiationis solaris pro systematibus autonomis / E.V. Mishenin // Conservatio energiae et energia renovabilis. – 2020. – № 2. – P. 18-25.

References

1. Sotchenko V.S. Technology of corn cultivation / V.S. Sotchenko, V.N. Bagrintseva // Bulletin of the Agroindustrial Complex of Stavropol Special. – 2015. – Issue № 2. – 79 b. (In English).
2. Alabushev A.V. Corn: biology, breeding, cultivation technology / A.V. Alabushev // Rostov n/A: Phoenix, 2018. – R. 45-78. (In English).
3. Popova T.N. Chemical composition and nutritional value of corn grain / T.N. Popova // Food Industry. – 2022. – № 5. – R. 32-36. (In English).
4. Perspektivnaya tekhnologiya sushk vlazhnogo zerna kukuruzy / V.N. Permyakov i dr. // Bashkirskii gosudarstvennyi agrarnyi universitet. (In Russian).
5. Ehnergoehffektivnaya tekhnologiya sushka zerna, ispol'zuyushchaya solnechnuyu ehnergiyu / N.Yu. Kurtchenko i dr. // Izvestiya. – 2022. – № 4(68). (In Russian).
6. Technology and system of power supply / O. Gorbenko et al // Determination on energy efficiency in corn grain drying. (In English).
7. Barantsev A.I. Solar energy: heat engineering and technology / A.I. Barantsev, V.M. Kuznetsov. – Moscow: Energiya, 2019. – R. 112-145. (In English).
8. Fedyanina V.Ya. Fundamentals of using non-traditional and renewable energy sources / V.Ya. Fedyanina, S.O. Khomutova, V.M. Ivanova, / ed.- Barnaul, LLC «MC EOR». – 2018. (In English).
9. Globalis Solaris Atlas [Fontes electronici] / Grex Argentariae Mundanae, ESMAP. – Modus accessus: https://globalsolaratlas.info. (In English).
10. Dzyuba V.A. Breeding and seed production of corn / V.A. Dzyuba, V.V. Kozlov. – Moscow: Kolos, 2017. – R. 23-56. (In English).
11. Kuzmin, I.I. Scientific justification of increasing the level of hybridity of corn seeds and the technology of their post-harvest processing at plants: abstract of the dissertation. ... Candidate of Technical Sciences, Moscow, 1999. – 24 p. (In English).
12. GOST 32882-2014 «Corn, fresh on the cob» (for processing for food purposes and for fresh consumption). (In English).
13. GOST 13634-90 Mezhgosudarstvennyi standart. Kukuruza Trebovaniya pi zagotovkakh i postavkakh. – Moskva. Standartinform. – 2010. (In Russian).
14. Duffie J.A. Solar Engineering of Thermal Processes / J.A. Duffie, W.A. Beckman // 4th ed. John Wiley & Sons, 2013. – 936 p. (In English).
15. Mishenin E.V. Modellatio mathematica radiationis solaris pro systematibus autonomis / E.V. Mishenin // Conservatio energiae et energia renovabilis. – 2020. – № 2. – P. 18-25. (In English).

Информация о финансировании

Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан по проекту «AP26199873 Разработка энерго- и ресурсосберегающей гибридной технологии транспортировки, хранения и складирования початков кукурузы с одновременной осциллирующей сушкой в контейнерах с использованием гелиовоздушных коллекторов и теплонасосной установки».

И.М. Дауренова[1,2*], Д.М. Тойбазар[1,2], А.Б. Мустафаева[3], Б.А. Урмашев[4], М.Ж. Хазимов[1,2]
[1]Ғұмарбек Даукеев атындағы Алматы Энергетика және Байланыс Университеті,
050013, Қазақстан, Алматы қ., Байтұрсыұлы к-сі, 126/1
[2]Қазақ Ұлттық Аграрлық Зерттеу Университеті,
050010, Қазақстан, Алматы қ., Абай д-лы, 8
[3]Қазақ-Британ техникалық университеті,
050000, Қазақстан, Алматы қ., Төле би к-сі, 59
[4]Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,
050040, Қазақстан, Алматы қ., Әл-Фараби д-лы, 71
*e-mail: daurenovaindira1@gmail.com

ЖҮГЕРІНІ ТИІМДІ КЕПТІРУ ҮШІН ГЕЛИОКОЛЛЕКТОРДЫҢ ЖЫЛУ ҚУАТЫН АНЫҚТАУ

Мақалада ауа күн коллекторы негізінде жұмыс істейтін тәжірибелік кептіру қондырғысын пайдалана отырып, жүгеріні кептіру процесін зерттеу нәтижелері ұсынылған. Жылутехникалық тәжірибелер жүргізіліп, ауа ағынының жылдамдығы өлшенді және кептіру барысында жүгерінің ылғалдылығының өзгеруі тіркелді. Сонымен қатар күн гелиоколлекторының конструктивтік және пайдалану сипаттамалары талданып, тәжірибе аймағындағы күн радиациясының көрсеткіштері зерттелді, бұл қолжетімді күн энергиясының деңгейін және оның ауаны қыздыру тиімділігіне әсерін бағалауға мүмкіндік берді. Зерттеу нәтижесінде ауа коллекторының жылулық қуаты анықталып, оның ұзындығы бойынша температураның таралуы бағаланды және жүйенің оңтайлы жұмыс режимдері белгіленді. Күн энергиясын пайдалану жүгеріні кептіру кезіндегі энергия шығындарын едәуір төмендетіп, процестің энергия тиімділігін арттыратыны және жаңартылатын энергия көздерін орнықты пайдалануға ықпал ететіні анықталды. Қосымша түрде тәжірибелік нәтижелер есептік тәуелділіктермен салыстырылып, жүгері қабатындағы жылу және ылғал алмасу кинетикасы нақтыланды. Алынған деректер ауылшаруашылық өнімдерін кептіруге арналған күн кептіргіш қондырғыларын жобалау және жетілдіру кезінде, сондай-ақ өзгермелі инсоляция мен табиғи желдету жағдайында кептірудің ұтымды режимдерін негіздеу үшін пайдаланылуы мүмкін.

Түйін сөздер: *күн коллекторлары, жүгеріні кептіру, күн радиациясы, GSM/O-120 пиранометрі, радиацияны өлшеу.*

I.M. Daurenova[1,2*], D.M.Toibazar[1,2], A.B. Mustafaeva[3], B.A. Urmashev[4], M.Zh. Khazimov[1,2]
[1]Gumarbek Daukeev Almaty University of Energy and Communications,
050013, Republic of Kazakhstan, Almaty, Baitursynuly street, 126/1
[2]Kazakh National Agrarian Research University,
050000, Republic of Kazakhstan, Almaty, Abay avenue, 8
[3]Kazakh-British Technical University,
050000, Republic of Kazakhstan, Almaty, Tole bi street, 59
[4]Al-Farabi Kazakh National University,
050040, Republic of Kazakhstan, Almaty, Al-Farabi avenue, 71
*e-mail: daurenovaindira1@gmail.com

DETERMINATION OF THE THERMAL POWER OF A SOLAR COLLECTOR FOR EFFICIENT DRYING OF CORN

The article presents the results of an investigation of the corn drying process using an experimental drying unit based on an air-type solar collector. Thermotechnical experiments were conducted, including measurements of air flow velocity and monitoring of changes in corn moisture content during the drying process. In addition, the structural and operational characteristics of the solar heliocollector were analyzed, and solar radiation indicators in the experimental area were studied, which made it possible to assess the level of available solar energy and its influence on air heating efficiency. The study allowed the thermal power of the air collector to be determined, the temperature distribution along its length to be evaluated, and optimal operating parameters of the system to be established. It was found that the use of solar heating provides a significant reduction in energy consumption for corn drying, increases the energy efficiency of the process, and promotes the sustainable use of renewable energy sources. Furthermore, experimental results were compared with theoretical calculations, enabling refinement of heat and moisture transfer kinetics within the corn layer. The obtained results can be applied in the design and improvement of solar drying systems for agricultural products and in substantiating rational drying regimes under conditions of variable solar radiation and natural ventilation.

Key words: *solar collectors, corn drying, solar radiation, GSM/O-120 pyranometer, radiation measurement*

Информация об авторах

Индира Маликовна Дауренова* – доктарант, Казахский национальный аграрный исследовательский университет», г. Алматы, Казахстан; e-mail: daurenovaindira1@gmail.com. ORCID https://orcid.org/0009-0001-0155-6954.

Даулет Мейирұлы Тойбазар – старший преподаватель кафедры «Электроэнергетические системы» Алматинский университет энергетики и связи, г. Алматы, Казахстан; e-mail: d.toibazar@gmail.com. ORCID https://orcid.org/0009-0002-4978-4400.

Ардақ Болатқызы Мустафаева – сениор-лектор школа прикладной математики, Казахстанско-Британский технический университет, г. Алматы, Казахстан; e-mail: mustafayeva.ab@gmail.com. ORCID https://orcid.org/ 0009-0008-0312-016X.

Байдаулет Амантаевич Урмашев – профессор, кафедра компьютерных наук факультета информационных технологий, Казахский национальный университет имени Аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан; e-mail:baydaulet.urmashev@gmail.com. ORCID https://orcid.org/ 0000-0001-7641-198X.

Марат Жалелович Хазимов – кандидат технических наук, профессор, кафедра «Теплоэнергетики и физика» Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, г. Алматы, Казахстан; e-mail: mkhazimov@gmail.com. ORCID https://orcid.org/0000-0001-5448-3122.

Авторлар туралы мәліметтер

Индира Мәлікқызы Дауренова* – «Энергетика және электротехника» кафедрасының, доктаранты, Қазақ ұлттық аграрлық зерттеу университеті, Алматы қ. Қазақстан; e-mail: daurenovaindira1@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-0155-6954.

Даулет Мейирұлы Тойбазар – «Электр энергетикасы» кафедрасының аға оқытушысы, Г. Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы қ., Қазақстан; e-mail: d.toibazar@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-4978-4400.

Ардақ Болатқызы Мустафаева – Қолданбалы математика мектебінің сениор-лекторы, Қазақ-Британ техникалық университеті, Алматы қ., Қазақстан; e-mail: mustafayeva.ab@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/ 0009-0008-0312-016X.

Байдаулет Амантаевич Урмашев – Ақпараттық технологиялар факультеті, Информатика кафедрасының профессоры, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан; e-mail:baydaulet.urmashev@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/ 0000-0001-7641-198X.

Марат Жалелович Хазимов – «Жылуэнегретикасы және физика» кафедрасының профессоры Г. Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы қ. Қазақстан; e-mail: mkhazimov@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5448-3122.

Author information

Indira Daurenova* – PhD doctoral student, Kazakh National Agrarian Research University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: daurenovaindira1@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-0155-6954.

Daulet Toibazar – Senior Lecturer, Department of Electric Power Systems, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications, Almaty, Kazakhstan; e-mail: d.toibazar@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-4978-4400.

Ardak Mustafayeva – Senior Lecturer, School of Applied Mathematics, Kazakh-British Technical University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: mustafayeva.ab@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-0312-016X.

Baydaulet Urmashev – Professor, Department of Computer Science, Faculty of Information Technologies, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: baydaulet.urmashev@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7641-198X.

Marat Khazimov – Candidate of Technical Sciences, Professor, Department of Thermal Power Engineering and Physics, Gumarbek Daukeyev Almaty University of Power Engineering and Telecommunications, Almaty, Kazakhstan; e-mail: mkhazimov@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5448-3122.

Поступила в редакцию 05.01.2026
Поступила после доработки 05.03.2026
Принята к публикации 07.04.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-60

МРНТИ: 81.81.05; 81.81.21; 28.23; 44.33

А.И. Почекина*, Е.С. Юшков
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
115409, Российская Федерация, г. Москва, Каширское ш., 31
*e-mail: alenka_2011.kz@mail.ru

ЦИФРОВОЙ КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ НА ОСНОВЕ KPI, CAPA И ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА НА ПРЕДПРИЯТИИ АТОМНОГО ПРОФИЛЯ

Аннотация: *В статье представлен методический подход к формированию цифрового контура управления качеством на предприятии атомного профиля на основе стандартизации KPI, управления корректирующими и предупреждающими действиями (CAPA) и применения аналитических инструментов искусственного интеллекта. Исследование основано на данных за 2020-2024 гг., включающих показатели охраны труда и производственной безопасности, LTIFR, дозовый контроль персонала группы А, экологические показатели, а также сценарную экономическую оценку внедрения цифрового контура качества. Показано, что показатели безопасности, радиационного и экологического контроля могут рассматриваться как практические метрики устойчивости системы управления качеством. За анализируемый период число несчастных случаев снизилось с 1-2 случаев в 2020-2021 гг. до нулевых значений в 2022-2024 гг., а показатель LTIFR уменьшился с 0,28 до 0,00. Радиационные показатели находились ниже контрольного уровня 10 мЗв/год, однако максимальные дозы до 5,2 мЗв подтверждают необходимость управления локальными эпизодами, а не только средними значениями. Экологические KPI демонстрируют межгодовую волатильность, что обосновывает необходимость порогового контроля и анализа причин отклонений.*

Предложена логика цифрового контура «KPI – пороги – отклонение – CAPA – проверка эффективности – аудит», в которой ИИ используется как надстройка для выявления аномалий, приоритизации разборов и классификации причин. Экономическая оценка показывает, что при CAPEX 30 млн тг и OPEX 6 млн тг/год расчётный срок окупаемости составляет около 1,67 года, а в консервативном варианте – около 2,5 года. Полученные результаты подтверждают целесообразность поэтапного внедрения цифрового контура качества: от стандартизации данных и CAPA к аналитике и предиктивным моделям.

Ключевые слова: *управление качеством; Quality 4.0; KPI; CAPA; искусственный интеллект; цифровой контур; атомная отрасль; LTIFR; экономическая эффективность.*

Введение

Цифровая трансформация производственных систем является одним из ключевых направлений развития современной промышленности. Для предприятий высокорегулируемых и риск-ориентированных отраслей цифровизация имеет не только технологическое, но и управленческое значение, поскольку позволяет повысить прослеживаемость процессов, снизить влияние человеческого фактора и обеспечить более оперативное выявление отклонений. Особую значимость это приобретает в атомной отрасли, где качество продукции и процессов напрямую связано с требованиями безопасности, экологической устойчивости, радиационного контроля и доказуемости управленческих решений.

Современные исследования в области Quality 4.0 показывают, что развитие системы управления качеством должно рассматриваться не как внедрение отдельных цифровых инструментов, а как комплексная трансформация процессов менеджмента качества на основе данных, стандартизации, аналитики и постоянного улучшения [1-3]. В условиях усложнения производственных процессов традиционный документарный и периодический контроль становится недостаточным, так как он преимущественно фиксирует уже произошедшие отклонения. Поэтому актуальным становится переход от реактивного управления качеством к профилактической и предиктивной модели, основанной на анализе данных и прогнозировании рисков [4, 5].

©А.И. Почекина, Е.С. Юшков, 2026

Для предприятий атомного профиля качество следует рассматривать шире, чем только соответствие продукции техническим условиям. Оно проявляется через устойчивость производственных процессов, состояние охраны труда, радиационной безопасности, экологических показателей, промышленной и пожарной безопасности. В связи с этим показатели травматизма, LTIFR, дозовые нагрузки персонала, выбросы, сбросы, отходы и аварийность могут выступать как практические метрики результативности системы управления качеством. Эти данные являются измеримыми, сопоставимыми во времени и пригодными для построения цифрового контура, включающего сбор данных, пороговый контроль, анализ причин отклонений и оценку эффективности корректирующих действий.

Дополнительные возможности для развития системы качества связаны с применением искусственного интеллекта и машинного обучения. Эти инструменты позволяют выявлять скрытые закономерности, обнаруживать аномалии, классифицировать несоответствия, приоритизировать зоны риска и повышать качество подготовки к аудитам [6]. Однако для предприятий повышенной ответственности ИИ не может рассматриваться как автономная система принятия решений. Его роль должна заключаться в аналитической поддержке специалистов при сохранении принципа human-in-the-loop, когда человек остаётся в контуре принятия управленческих решений [7]. При этом результативное применение ИИ возможно только при наличии качественной базы данных, единых правил расчёта KPI и устойчивой системы CAPA, обеспечивающей связь «отклонение – причина – корректирующее действие – проверка результата» [8-10].

Для предприятий атомного профиля необходимость интеграции KPI, CAPA и инструментов искусственного интеллекта обусловлена спецификой самой отрасли. Управление качеством здесь связано не только с соответствием продукции техническим требованиям, но и с обеспечением промышленной, радиационной, экологической и производственной безопасности. Поэтому отдельное использование KPI без связи с корректирующими и предупреждающими действиями не позволяет в полной мере управлять причинами отклонений, а применение ИИ без стандартизированной базы данных и устойчивой процедуры CAPA может привести к формированию аналитических выводов, не связанных с реальными управленческими решениями.

Актуальность исследования определяется тем, что на предприятиях атомного профиля даже при наличии устойчивой отчётности по охране труда, радиационному контролю и экологическим показателям сохраняется необходимость более глубокого анализа причин отклонений и оценки результативности корректирующих действий. Годовые показатели позволяют фиксировать итоговое состояние процессов, однако не всегда раскрывают причины изменений, повторяемость несоответствий и эффективность управленческих мер. Поэтому требуется цифровой контур, в котором данные используются не только для отчётности, но и для своевременного выявления отклонений, запуска CAPA, контроля сроков мероприятий и проверки их эффективности.

Научная новизна исследования заключается в обосновании методического подхода к формированию цифрового контура управления качеством предприятия атомного профиля на основе интеграции KPI, CAPA и инструментов искусственного интеллекта. В отличие от подходов, ориентированных преимущественно на автоматизацию отчётности, в данной работе цифровой контур рассматривается как управленческая система, связывающая показатели безопасности, радиационного и экологического контроля с выявлением отклонений, анализом причин, корректирующими действиями, проверкой их эффективности и подготовкой к аудиту.

Целью исследования является разработка и обоснование методического подхода к формированию цифрового контура управления качеством на предприятии атомного профиля на основе интеграции KPI, CAPA и инструментов искусственного интеллекта.

Методика исследования

Эмпирической базой исследования послужили данные внутренней отчётности АО «Ульбинский металлургический завод» за 2020-2024 гг., включающие показатели охраны труда, промышленной и пожарной безопасности, радиационного контроля, экологической результативности, а также экономические параметры внедрения цифрового контура качества.

Выбор указанных групп показателей обусловлен тем, что на предприятиях атомного профиля качество не ограничивается только соответствием продукции техническим

требованиям. Оно также проявляется через устойчивость производственных процессов, управляемость рисков, безопасность персонала, экологическую результативность и прослеживаемость управленческих решений. В связи с этим показатели охраны труда, радиационного и экологического контроля рассматривались как практические метрики результативности системы управления качеством.

В рамках исследования анализировались следующие группы данных: показатели охраны труда и производственной безопасности, включая количество несчастных случаев, LTIFR, объём отработанных человеко-часов и затраты на охрану труда; показатели радиационной безопасности, включая контрольный уровень, среднюю и максимальную годовую эффективную дозу персонала группы «А»; экологические показатели, включающие выбросы, сбросы и объём образования отходов; показатели промышленной и пожарной безопасности; а также экономические параметры внедрения цифрового контура, включая капитальные затраты, эксплуатационные расходы, операционный эффект, предотвращённые потери и срок окупаемости.

Для повышения наглядности общая логика исследования представлена в виде блок-схемы, отражающей последовательность перехода от исходных данных предприятия к формированию цифрового контура управления качеством (рис. 1). Методика исследования включает систематизацию показателей, определение их управленческого значения, динамический анализ, выявление отклонений, запуск CAPA, применение аналитических инструментов искусственного интеллекта и оценку экономической эффективности внедрения цифрового контура.



Рисунок 1 – Блок-схема методики исследования

Представленная блок-схема отражает общую последовательность исследования: от систематизации исходных данных предприятия до формирования модели цифрового управления качеством на основе KPI, CAPA и аналитики/ИИ. В рамках данной логики показатели рассматривались не только как элементы отчётности, но и как управленческие индикаторы, позволяющие выявлять отклонения, определять их причины, запускать корректирующие и предупреждающие действия и оценивать их результативность.

Под CAPA в работе понимается система корректирующих и предупреждающих действий, включающая регистрацию отклонений, анализ причин, назначение мероприятий, контроль сроков и проверку эффективности принятых решений. Искусственный интеллект рассматривался как аналитическая надстройка над цифровым контуром качества,

предназначенная для выявления аномалий, повторяющихся причин, зон риска и поддержки подготовки материалов к аудиту, без замены ответственного управленческого решения специалиста.

Сценарная экономическая оценка внедрения цифрового контура выполнялась с учётом капитальных затрат, ежегодных эксплуатационных расходов, операционного эффекта, предотвращённых потерь и срока окупаемости проекта. Ниже приведены методические положения, раскрывающие порядок расчёта ключевых показателей и экономической эффективности внедрения цифрового контура качества.

В рамках исследования ключевые показатели результативности рассматривались как количественные индикаторы, отражающие состояние процессов охраны труда, радиационного контроля, экологической результативности и экономической эффективности цифрового контура качества. Для каждого KPI определялись источник данных, единица измерения, периодичность расчёта, управленческий смысл и пороговое значение.

В общем виде оценка выполнения KPI рассчитывалась с учётом направленности показателя. Для показателей, увеличение которых характеризует положительный результат, использовалась формула:

$$\text{KPI} = \frac{\text{Фактическое значение}}{\text{Плановое значение}} \times 100\% \quad (1)$$

Для показателей, снижение которых является положительным результатом, использовалась обратная логика расчёта:

$$\text{KPI} = \frac{\text{Плановое значение}}{\text{Фактическое значение}} \times 100\% \quad (2)$$

При этом для показателей безопасности, радиационного контроля и экологии основное значение имеет не только достижение планового значения, но и соблюдение установленных пороговых уровней. В случае достижения или превышения порогового значения показатель рассматривался как отклонение, требующее анализа причин и запуска корректирующих или предупреждающих действий.

Показатель LTIFR использовался для оценки частоты несчастных случаев с потерей трудоспособности на 1 млн отработанных человеко-часов. Расчёт выполнялся по формуле:

$$\text{LTIFR} = \frac{\text{N}}{\text{H}} \times 1\,000\,000, \quad (3)$$

где N – количество несчастных случаев с потерей трудоспособности за анализируемый период;

H – общее количество отработанных человеко-часов за тот же период.

CAPA в работе рассматривалась не как единичный числовой показатель, а как управленческий процесс корректирующих и предупреждающих действий. Для оценки результативности CAPA использовались показатели своевременности закрытия, доли просроченных мероприятий и эффективности выполненных действий:

$$\text{Доля CAPA, закрытых в срок} = \frac{\text{Количество CAPA, закрытых в срок}}{\text{Общее количество CAPA}} \times 100\ \% \quad (4)$$

$$\text{Доля просроченных CAPA} = \frac{\text{Количество просроченных CAPA}}{\text{Общее количество CAPA}} \times 100\ \% \quad (5)$$

$$\text{Эффективность CAPA} = \frac{\text{Количество результативных CAPA}}{\text{Количество CAPA, прошедших проверку эффективности}} \times 100\ \% \quad (6)$$

Такой подход позволяет оценивать CAPA не только как факт выполнения корректирующих мероприятий, но и как инструмент управления причинами отклонений, сроками исполнения, ответственностью исполнителей и результативностью принятых решений.

В рамках экономической оценки использовались показатели CAPEX и OPEX. Под CAPEX понимаются капитальные затраты на внедрение цифрового контура качества, включая разработку или приобретение программного решения, настройку модулей KPI и CAPA, интеграцию с действующими информационными системами, первоначальную настройку аналитических инструментов и обучение пользователей. Под OPEX понимаются ежегодные эксплуатационные расходы, связанные с техническим сопровождением системы, обновлением программного обеспечения, администрированием данных, поддержкой пользователей и дальнейшим развитием аналитических модулей.

Экономическая эффективность внедрения цифрового контура качества с использованием аналитики/ИИ оценивалась сценарным методом. В расчётах учитывались операционный эффект, риск-эффект, валовый годовой эффект, чистый годовой эффект и срок окупаемости проекта. Операционный эффект формируется за счёт сокращения трудозатрат на сбор, обработку, проверку и подготовку отчётности. Риск-эффект связан со снижением потенциальных потерь за счёт более раннего выявления отклонений, повышения дисциплины CAPA и уменьшения повторяемости причин несоответствий.

Валовый годовой эффект определялся по формуле:

$$E_{вал} = E_{опер} + E_{риск}, \quad (7)$$

где $E_{вал}$ – валовый годовой эффект;
$E_{опер}$ – операционный эффект;
$E_{риск}$ – эффект от предотвращения потенциальных потерь.

Чистый годовой эффект рассчитывался с учётом ежегодных эксплуатационных расходов:

$$E_{чист} = E_{вал} - OPEX, \quad (8)$$

где $E_{чист}$ – чистый годовой эффект;
OPEX – ежегодные эксплуатационные расходы.

Срок окупаемости проекта определялся по формуле:

$$T = \frac{CAPEX}{E_{чист}}, \quad (9)$$

где T – срок окупаемости, лет;
CAPEX – капитальные затраты на внедрение цифрового контура;
$E_{чист}$ – чистый годовой экономический эффект.

Дополнительно рассматривался консервативный сценарий, в котором учитывался только операционный эффект без риск-эффекта:

$$T_{конс} = \frac{CAPEX}{(E_{опер} - OPEX)} \quad (10)$$

Применение двух сценариев позволяет оценить экономическую целесообразность внедрения цифрового контура как при базовом варианте, учитывающем операционный эффект и предотвращённые потери, так и при более осторожном варианте расчёта, основанном только на снижении трудозатрат.

Результаты и обсуждение

Анализ данных внутренней отчётности АО «Ульбинский металлургический завод» за 2020-2024 гг. показывает, что показатели охраны труда, радиационного контроля, экологической результативности, промышленной и пожарной безопасности могут быть использованы не только как элементы обязательной отчётности, но и как практические метрики устойчивости системы управления качеством. Их динамика позволяет оценить, насколько предприятие способно поддерживать управляемость процессов, своевременно выявлять отклонения и формировать основу для цифрового контура качества.

Первый аналитический блок связан с динамикой охраны труда и производственной безопасности. На рисунке 2 представлена динамика количества несчастных случаев и показателя LTIFR за 2020-2024 гг.

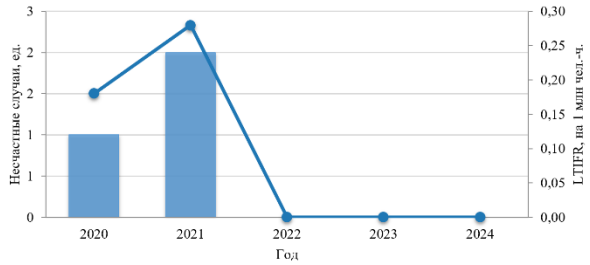


Рисунок 2 – Динамика несчастных случаев и LTIFR за 2020-2024 гг.

Данные показывают, что в 2020 г. был зарегистрирован 1 несчастный случай, в 2021 г. – 2 случая, после чего в 2022-2024 гг. значение показателя снизилось до 0. Аналогичная динамика наблюдается по LTIFR: в 2020 г. показатель составил 0,18, в 2021 г. увеличился до 0,28, а в 2022-2024 гг. сохранялся на уровне 0,00.

С управленческой точки зрения данная динамика свидетельствует о переходе от периода остаточной событийности к периоду нулевого травматизма. Однако нулевые значения LTIFR не должны рассматриваться как основание для снижения внимания к системе управления качеством и безопасности. Напротив, при отсутствии происшествий возрастает значение ведущих индикаторов, контроля процедур, анализа предвестников и дисциплины корректирующих действий. Иными словами, нулевой LTIFR показывает итоговый результат, но не раскрывает состояние причин, барьеров и процессов, за счёт которых этот результат удерживается (рис. 3).

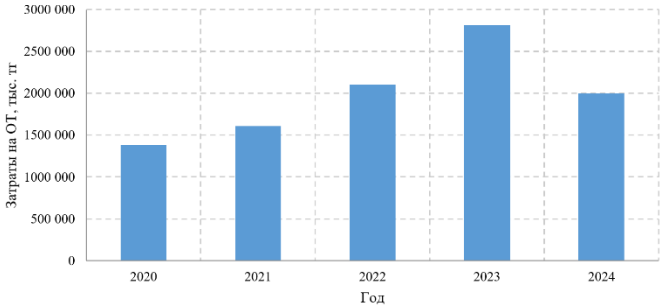


Рисунок 3 – Динамика затрат на охрану труда за 2020-2024 гг.

Затраты на охрану труда увеличились с 1 382 325 тыс. тг в 2020 г. и 1 608 726 тыс. тг в 2021 г. до 2 102 982 тыс. тг в 2022 г. и 2 814 728 тыс. тг в 2023 г. В 2024 г. затраты составили 1 997 480 тыс. тг, то есть снизились относительно пикового значения 2023 г., но остались выше уровня 2020-2021 гг.

Сопоставление рисунков 2 и 3 позволяет выделить три периода. Первый период – 2020-2021 гг., когда сохранялись ненулевые значения травматизма при относительно меньшем уровне затрат. Второй период – 2022-2023 гг., когда на фоне роста финансирования был достигнут нулевой уровень LTIFR. Третий период – 2024 г., когда нулевой LTIFR сохранился при снижении затрат относительно 2023 г.

Такая динамика может быть интерпретирована как переход от фазы усиления системы к фазе поддержания результата. Для цифрового контура качества это означает, что затраты должны рассматриваться не только как финансовый показатель, но и как ресурс поддержания процессов, процедур, обучения, контроля и корректирующих действий. При этом важно не допустить формального вывода о том, что снижение травматизма автоматически позволяет снижать внимание к системе качества. В условиях нулевой событийности критичным становится контроль состояния процессов, а не только итоговых происшествий.

Следующий аналитический блок связан с радиационной безопасностью. На рисунке 4 представлена динамика средней и максимальной годовой эффективной дозы персонала группы «А» относительно контрольного уровня 10 мЗв/год.

Средняя годовая эффективная доза персонала группы «А» находилась в диапазоне от 0,8 до 1,4 мЗв/год. В 2020 г. она составила 0,8 мЗв, в 2021-2022 гг. – 0,9 мЗв, в 2023-2024 гг. – 1,4 мЗв. Все значения существенно ниже контрольного уровня 10 мЗв/год.

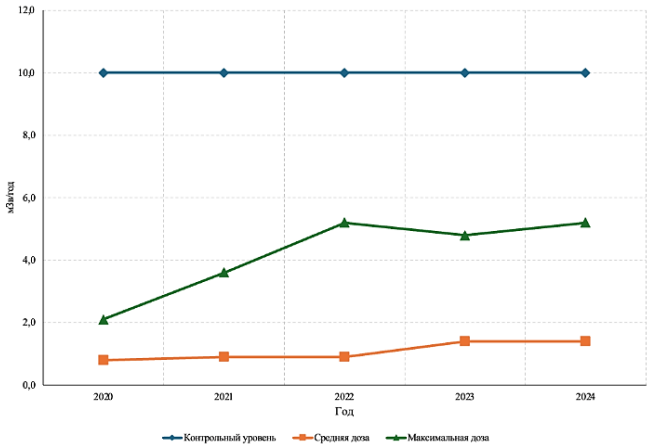


Рисунок 4 – Средние и максимальные дозы персонала группы А относительно контрольного уровня

В то же время максимальная годовая эффективная доза изменялась более выраженно: 2,1 мЗв в 2020 г., 3,6 мЗв в 2021 г., 5,2 мЗв в 2022 г., 4,8 мЗв в 2023 г. и 5,2 мЗв в 2024 г. Несмотря на отсутствие превышения контрольного уровня, максимальные значения показывают наличие локальных эпизодов повышенной дозовой нагрузки.

Данный результат имеет важное методическое значение. Если анализировать только средние значения, система может выглядеть устойчивой и не требующей дополнительного внимания. Однако максимальные значения позволяют выявлять эпизоды, которые скрываются внутри усреднённой статистики. Для цифрового контура качества это означает необходимость управления не только средним уровнем показателей, но и пиковыми значениями. Рост максимальной дозы должен запускать анализ причин: вид работ, участок, продолжительность воздействия, организация допуска, применяемые защитные меры и корректирующие действия.

Именно поэтому, радиационный блок подтверждает необходимость перехода от отчётного контроля к риск-ориентированному мониторингу. В цифровой системе такие показатели могут использоваться для порогового контроля, автоматического выделения отклонений и формирования задач CAPA.

Экологический блок представлен двумя графиками. На рисунке 5 показана динамика выбросов загрязняющих веществ в атмосферу и сбросов загрязняющих веществ в водные объекты.

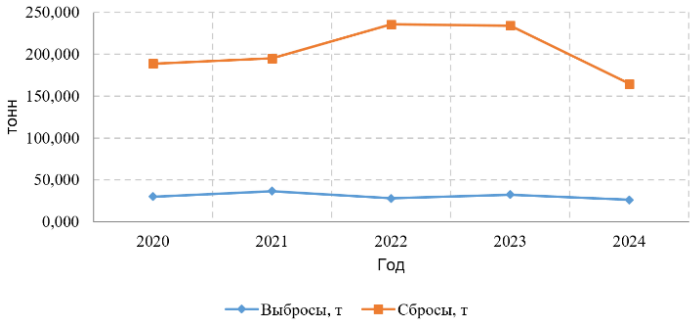


Рисунок 5 – Динамика выбросов и сбросов за 2020-2024 гг.

Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу составили 30,087 т в 2020 г., 36,666 т в 2021 г., 27,830 т в 2022 г., 32,499 т в 2023 г. и 26,114 т в 2024 г. В целом за рассматриваемый период наблюдается снижение выбросов к 2024 г., несмотря на отдельные межгодовые колебания.

Сбросы загрязняющих веществ в водные объекты изменялись более резко: 188,780 т в 2020 г., 194,950 т в 2021 г., 235,759 т в 2022 г., 234,193 т в 2023 г. и 164,716 т в 2024 г. Максимальные значения зафиксированы в 2022-2023 гг., после чего в 2024 г. наблюдается заметное снижение.

Динамика сбросов показывает, что экологические показатели имеют выраженную волатильность и требуют причинного анализа. Сам факт снижения в 2024 г. является

положительным результатом, однако для системы управления качеством важно понимать, за счёт чего он достигнут: изменения производственных режимов, природоохранных мероприятий, технического обслуживания, модернизации оборудования или иных факторов. Без цифрового контура такие взаимосвязи трудно фиксировать и проверять.

На рисунке 6 представлена динамика объёма образования производственных отходов.

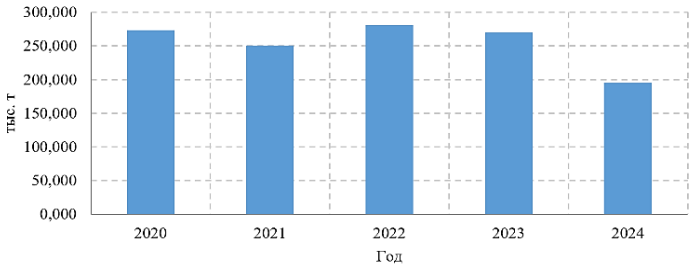


Рисунок 6 – Динамика образования производственных отходов за 2020-2024 гг.

Объём образования производственных отходов составил 273,249 тыс. т в 2020 г., 250,785 тыс. т в 2021 г., 281,289 тыс. т в 2022 г., 269,644 тыс. т в 2023 г. и 194,780 тыс. т в 2024 г. Наибольшее значение наблюдалось в 2022 г., после чего показатель начал снижаться. Минимальное значение зафиксировано в 2024 г.

Полученная динамика показывает, что экологический контур также может рассматриваться как часть системы управления качеством. Выбросы, сбросы и отходы отражают не только экологическое воздействие, но и устойчивость технологических режимов, эффективность природоохранных мероприятий и управляемость производственных процессов. Для цифровой системы качества такие показатели должны быть связаны с ответственными подразделениями, источниками данных, пороговыми значениями и корректирующими действиями.

На основе анализа производственных, радиационных и экологических показателей была сформирована логика цифрового контура управления качеством, представленная на рисунке 7.

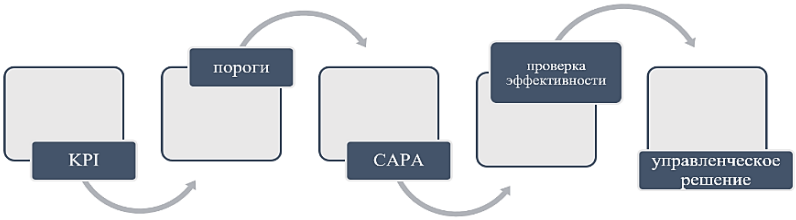


Рисунок 7 – Цифровой контур управления качеством на основе KPI, CAPA и аналитики

Представленный на рисунке 7 цифровой контур обобщает результаты анализа производственных, радиационных и экологических показателей и показывает, каким образом данные могут быть переведены из формата отчётности в формат управленческого действия. В такой модели KPI используются для фиксации состояния процессов и выявления отклонений, CAPA обеспечивает анализ причин и контроль корректирующих мероприятий, а аналитика/ИИ применяется для выявления аномалий, повторяющихся причин и зон риска.

Практическое значение данного контура заключается в том, что каждый показатель связывается с пороговым значением, ответственным подразделением и последующим управленческим действием. Например, рост LTIFR или несчастных случаев должен запускать анализ причин в контуре охраны труда; увеличение максимальной индивидуальной дозы - разбор конкретных работ и условий воздействия; волатильность сбросов или отходов - анализ технологических режимов, состояния оборудования и эффективности природоохранных мероприятий.

При этом ИИ в предложенной модели не заменяет ответственное управленческое решение, а выполняет вспомогательную аналитическую функцию. Для предприятий атомного профиля принципиально важно, чтобы окончательное решение оставалось за компетентным специалистом, а результаты работы цифровой системы были объяснимыми, проверяемыми и документально подтверждёнными.

Экономическая оценка внедрения цифрового контура представлена на рисунке 8.

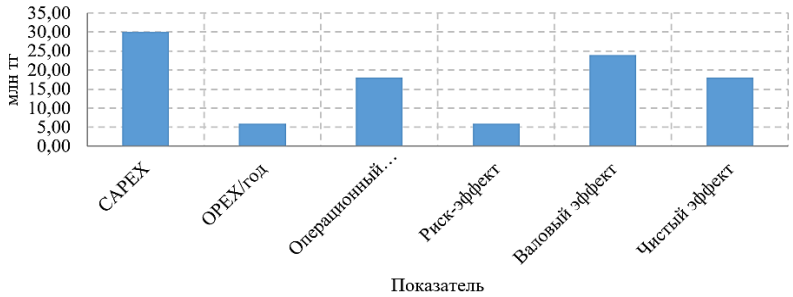


Рисунок 8 – Экономическая эффективность внедрения цифрового контура управления качеством

Расчётный сценарий предполагает капитальные затраты на внедрение цифрового контура в размере 30 млн тг и ежегодные эксплуатационные расходы в размере 6 млн тг. Операционный эффект, связанный со снижением трудозатрат на сбор, обработку, проверку и подготовку отчётности, оценивается в 18 млн тг в год. Дополнительно учитывается риск-эффект в размере 6 млн тг в год, связанный с предотвращением потенциальных потерь за счёт более раннего выявления отклонений и повышения дисциплины CAPA.

Валовый годовой эффект составляет 24 млн тг, а чистый годовой эффект после учёта эксплуатационных расходов – 18 млн тг. При капитальных затратах 30 млн тг расчётный срок окупаемости составляет около 1,67 года. В консервативном варианте, когда учитывается только операционный эффект без предотвращённых потерь, срок окупаемости составляет около 2,5 года.

Полученные результаты показывают, что экономическая целесообразность цифрового контура связана не только с применением ИИ, но и с построением единой управляемой системы, где данные, пороговые значения, CAPA и аналитика работают совместно. Основной эффект формируется за счёт сокращения трудоёмкости отчётности, повышения скорости реакции на отклонения, улучшения дисциплины корректирующих действий и снижения вероятности повторяемости причин.

Вместе с тем необходимо учитывать ограничения полученных результатов. Используемые данные представлены преимущественно на годовом уровне, что достаточно для анализа динамики и обоснования цифрового мониторинга, но ограничивает возможности построения полноценной предиктивной модели. Для более точного применения ИИ потребуются данные более высокой детализации: по подразделениям, участкам, видам работ, сменам, режимам оборудования, прединцидентам и карточкам CAPA.

Кроме того, устойчивость цифрового контура зависит от качества исходных данных, единых справочников, регламентов ввода информации и ответственности владельцев показателей. При отсутствии системы управления данными, то есть data governance, цифровизация может привести к накоплению несогласованных данных, а не к повышению управляемости. Поэтому первым этапом внедрения должны стать стандартизация KPI, источников данных и правил расчёта, а уже затем – подключение аналитики и ИИ.

В целом результаты исследования подтверждают, что показатели охраны труда, радиационного контроля и экологии могут использоваться как метрики устойчивости системы управления качеством. Их включение в цифровой контур KPI-CAPA создаёт основу для перехода от отчётного контроля к управлению на основе данных. Применение ИИ в такой системе является целесообразным при соблюдении трёх условий: наличие качественных данных, объяснимость аналитических выводов и сохранение участия человека в принятии решений.

Предложенный подход позволяет рассматривать цифровую систему управления качеством как инструмент интеграции производственных, радиационных, экологических и экономических показателей в единый управленческий контур. Это обеспечивает повышение прозрачности данных, ускорение реакции на отклонения, подготовку к аудитам и экономически обоснованное развитие системы качества на предприятии атомного профиля.

Заключение

По результатам исследования установлено, что показатели охраны труда, радиационной безопасности, экологического контроля, промышленной и пожарной

безопасности могут рассматриваться как элементы единого цифрового контура управления качеством на предприятии атомного профиля. Такой подход позволяет перейти от разрозненной отчётности к управлению устойчивостью процессов, предупреждению отклонений и прослеживаемости управленческих решений.

Анализ данных АО «Ульбинский металлургический завод» за 2020-2024 гг. показал наличие измеримой базы для построения такого контура. В сфере охраны труда наблюдается положительная динамика: число несчастных случаев снизилось с 1-2 случаев в 2020-2021 гг. до 0 в 2022-2024 гг., а показатель LTIFR – до 0,00. Радиационные показатели не превышали контрольный уровень, однако максимальные дозы до 5,2 мЗв подтверждают необходимость контроля не только средних значений, но и отдельных локальных эпизодов. Экологические KPI характеризуются межгодовой волатильностью, что требует порогового контроля и анализа причин отклонений.

В работе предложена логика цифрового контура: KPI – пороговые значения – отклонение – анализ причин – CAPA – проверка эффективности – аудит – аналитическая поддержка ИИ. Искусственный интеллект в данном случае рассматривается не как самостоятельный механизм принятия решений, а как аналитическая надстройка для выявления аномалий, приоритизации рисков, классификации причин и подготовки материалов к аудиту.

Экономическая оценка показала целесообразность внедрения цифрового контура: при CAPEX 30 млн тг и OPEX 6 млн тг/год срок окупаемости составляет около 1,67 года, а в консервативном варианте около 2,5 года. При этом ключевым условием эффективности является предварительная стандартизация данных, правил расчёта KPI, процедур CAPA и сохранение принципа human-in-the-loop.

Следовательно, цифровой контур управления качеством на основе KPI, CAPA и ИИ может рассматриваться как эффективный инструмент перехода от отчётного контроля к профилактическому управлению качеством, безопасностью и экологической устойчивостью предприятия атомного профиля.

Список литературы

1. Gueorguiev T. An approach to integrate Artificial Intelligence in ISO 9001-based quality management systems / T. Gueorguiev // Measurement: Sensors. – 2025. – Article 101787. https://doi.org/10.1016/j.measen.2024.101787.
2. The Quality 4.0 Roadmap: Designing a capability roadmap toward quality management in Industry 4.0 / A.M. Carvalho et al // Quality Management Journal. – 2024. – Vol. 31(2). – P. 117-137. https://doi.org/10.1080/10686967.2024.2317478.
3. Sader S. A review of quality 4.0: definitions, features, technologies, applications, and challenges / S. Sader, I. Husti, M. Daroczi // Total Quality Management & Business Excellence. – 2022. – Vol. 33(9-10). – P. 1164-1182. https://doi.org/10.1080/14783363.2021.1944082.
4. Tercan H. Machine learning and deep learning based predictive quality in manufacturing: a systematic review / H. Tercan, T. Meisen // Journal of Intelligent Manufacturing. – 2022. – Vol. 33. – P. 1879-1905. https://doi.org/10.1007/s10845-022-01963-8.
5. Artificial Intelligence in manufacturing: State of the art, perspectives, and future directions / R.X. Gao et al // CIRP Annals. – 2024. – Vol. 73(2). – P. 723-749. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2024.04.101.
6. A review of explainable artificial intelligence in smart manufacturing / A. Puthanveettil Madathil et al // International Journal of Production Research. – 2025. – Vol. 63(23). – P. 8654-8697. https://doi.org/10.1080/00207543.2025.2513574.
7. Human-in-the-loop machine learning: a state of the art / E. Mosqueira-Rey et al // Artificial Intelligence Review. – 2023. – Vol. 56. – P. 3005-3054. https://doi.org/10.1007/s10462-022-10246-w.
8. Data Quality Assessment in Smart Manufacturing: A Review / T. Peixoto et al // Systems. – 2025. – Vol. 13(4), Article 243. https://doi.org/10.3390/systems13040243.
9. Data governance & quality management-Innovation and breakthroughs across different fields / B.M.V. Bernardo et al // Journal of Innovation & Knowledge. – 2024. – Vol. 9(4), Article 100598. https://doi.org/10.1016/j.jik.2024.100598.

10. Arunagiri T. Enhancing Pharmaceutical Product Quality With a Comprehensive Corrective and Preventive Actions (CAPA) Framework: From Reactive to Proactive / T. Arunagiri, K.P. Kannaiah, M. Vasanthan // Cureus. – 2024. – Vol. 16(9). – P. e69762. https://doi.org/10.7759/cureus.69762.

А.И. Почекина*, Е.С. Юшков
Ұлттық зерттеу ядролық университеті «МИФИ»,
115409, Ресей Федерациясы, Мәскеу қ., Каширское тас жолы, 31
*e-mail: alenka_2011.kz@mail.ru

KPI, CAPA ЖӘНЕ ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ НЕГІЗІНДЕ АТОМ САЛАСЫ КӘСІПОРНЫНДА САПАНЫ БАСҚАРУДЫҢ ЦИФРЛЫҚ КОНТУРЫ

Мақалада атом саласы кәсіпорнында KPI көрсеткіштерін стандарттау, түзетуші және алдын алу іс-қимылдарын басқару (CAPA), сондай-ақ жасанды интеллекттің аналитикалық құралдарын қолдану негізінде сапаны басқарудың цифрлық контурын қалыптастыруға арналған әдістемелік тәсіл ұсынылған. Зерттеу 2020-2024 жылдар аралығындағы деректерге негізделген. Бұл деректерге еңбек қауіпсіздігі және өндірістік қауіпсіздік көрсеткіштері, LTIFR, А тобы персоналының дозалық бақылауы, экологиялық көрсеткіштер, сондай-ақ сапаның цифрлық контурын енгізудің сценарийлік экономикалық бағалауы кіреді.

Қауіпсіздік, радиациялық және экологиялық бақылау көрсеткіштері сапаны басқару жүйесінің тұрақтылығын сипаттайтын практикалық метрикалар ретінде қарастырылуы мүмкін екені көрсетілген. Талдау жүргізілген кезеңде жазатайым оқиғалар саны 2020-2021 жылдардағы 1-2 жағдайдан 2022-2024 жылдары нөлдік мәндерге дейін төмендеген, ал LTIFR көрсеткіші 0,28-ден 0,00-ге дейін азайған. Радиациялық көрсеткіштер жылына 10 мЗв бақылау деңгейінен төмен болғанымен, максималды дозалардың 5,2 мЗв-қа дейін жетуі тек орташа мәндерді ғана емес, сонымен бірге жергілікті эпизодтарды да басқару қажеттілігін растайды. Экологиялық KPI көрсеткіштері жылдар бойынша құбылмалылық танытады, бұл шекті бақылауды және ауытқу себептерін талдауды қажет етеді.

Жұмыста «KPI – шекті мәндер – ауытқу – CAPA – тиімділікті тексеру – аудит» цифрлық контурының логикасы ұсынылған. Бұл модельде жасанды интеллект аномалияларды анықтау, талдауларды басымдық бойынша сұрыптау және себептерді жіктеу үшін қосымша аналитикалық құрал ретінде қолданылады. Экономикалық бағалау нәтижелері бойынша CAPEX 30 млн теңге және OPEX жылына 6 млн теңге болған жағдайда есептік өтелу мерзімі шамамен 1,67 жылды, ал консервативті сценарийде шамамен 2,5 жылды құрайды. Алынған нәтижелер сапаның цифрлық контурын кезең-кезеңімен енгізудің орынды екенін растайды: деректерді және CAPA жүйесін стандарттаудан бастап аналитика мен предиктивті модельдерге дейін.

Ключевые слова: *сапаны басқару; Quality 4.0; KPI; CAPA; жасанды интеллект; цифрлық контур; атом саласы; LTIFR; экономикалық тиімділік.*

A.I. Pochekina*, E.S. Yushkov
National Research Nuclear University MEPhI,
31 Kashirskoe Highway, Moscow, 115409, Russian Federation
*e-mail: alenka_2011.kz@mail.ru

DIGITAL QUALITY MANAGEMENT LOOP BASED ON KPI, CAPA AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE AT A NUCLEAR INDUSTRY ENTERPRISE

The article presents a methodological approach to the development of a digital quality management loop at a nuclear industry enterprise based on KPI standardization, management of corrective and preventive actions (CAPA), and the use of artificial intelligence analytical tools. The study is based on data for 2020-2024, including occupational health and industrial safety indicators, LTIFR, dose monitoring of Group A personnel, environmental indicators, as well as a scenario-based economic assessment of the implementation of the digital quality loop.

It is shown that safety, radiation and environmental monitoring indicators can be considered practical metrics of the stability of the quality management system. During the analyzed period, the number of accidents decreased from 1-2 cases in 2020-2021 to zero values in 2022-2024, while the LTIFR indicator decreased from 0.28 to 0.00. Radiation indicators remained below the control level of 10 mSv/year; however, maximum doses of up to 5.2 mSv confirm the need to manage local episodes rather than relying only on average values. Environmental KPIs demonstrate year-to-year volatility, which justifies the need for threshold control and analysis of the causes of deviations.

The paper proposes the logic of the digital loop «KPI – thresholds – deviation – CAPA – effectiveness verification – audit», in which artificial intelligence is used as an additional tool for anomaly detection, prioritization of reviews, and classification of causes. The economic assessment shows that with CAPEX of 30

million tenge and OPEX of 6 million tenge per year, the estimated payback period is approximately 1.67 years, and about 2.5 years in the conservative scenario. The obtained results confirm the feasibility of a phased implementation of the digital quality loop: from data and CAPA standardization to analytics and predictive models.

Key words: *quality management; Quality 4.0; KPI; CAPA; artificial intelligence; digital loop; nuclear industry; LTIFR; economic efficiency.*

Сведения об авторах

Алёна Игоревна Почекина* – магистрант программы «Управление в атомной отрасли» (направление 38.04.02 «Менеджмент») кафедры № 72 «Управления бизнес-проектами», Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Российская Федерация; e-mail: alenka_2011.kz@mail.ru.

Евгений Семёнович Юшков – к.т.н., доцент кафедры № 72 «Управления бизнес-проектами», Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Российская Федерация; e-mail: esyushkov@mephi.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-9161-0877.

Авторлар туралы мәліметтер

Алёна Игоревна Почекина* – «Атом саласындағы басқару» бағдарламасының магистранты, 38.04.02 «Менеджмент» бағыты, № 72 «Бизнес-жобаларды басқару» кафедрасы, Ұлттық зерттеу ядролық университеті «МИФИ», Ресей Федерациясы; e-mail: alenka_2011.kz@mail.ru.

Евгений Семёнович Юшков – техника ғылымдарының кандидаты, № 72 «Бизнес-жобаларды басқару» кафедрасының доценті, Ұлттық зерттеу ядролық университеті «МИФИ», Ресей Федерациясы; e-mail: esyushkov@mephi.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-9161-0877.

Information about the authors

Alyona Igorevna Pochekina* – Master's student of the program «Management in the Nuclear Industry» in the field of study 38.04.02 «Management», Department № 72 «Business Project Management», National Research Nuclear University MEPhI, Russian Federation; e-mail: alenka_2011.kz@mail.ru.

Evgeny Semyonovich Yushkov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department № 72 «Business Project Management», National Research Nuclear University MEPhI, Russian Federation; e-mail: esyushkov@mephi.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-9161-0877.

Поступила в редакцию 30.03.2026
Поступила после доработки 25.05.2026
Принята к публикации 28.05.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-61

МРНТИ: 76.29.33

CC BY 4.0
Check for updates

И.М. Увалиева, Ж.Т. Рахметуллина, Ш.Т. Тезекпаева*, Д.Р. Борозенец, Ж.Ж. Нурумов
Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева,
Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск, ул. Серикбаева, 19
*e-mail: shtezekpaeva@ektu.kz

МОДЕЛЬ ПОДДЕРЖКИ КЛИНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ НАРУШЕНИЙ КИСЛОТНО-ОСНОВНОГО РАВНОВЕСИЯ ПО ДАННЫМ ГАЗОМЕТРИИ КРОВИ НА ОСНОВЕ УРАВНЕНИЯ ГЕНДЕРСОНА-ХАССЕЛЬБАХА

Аннотация: *В статье рассматривается система поддержки клинических решений для диагностики нарушений кислотно-основного равновесия на основе анализа газового состава крови с использованием уравнения Гендерсона-Хассельбаха. В условиях возрастающих требований к точности и скорости клинической диагностики особую актуальность приобретает алгоритмизированная интерпретация показателей газометрии. Работа направлена на систематизацию ключевых параметров ABG (pH, P_aCO_2, HCO_3^-, BE и др.), анализ их физиологических взаимосвязей и разработку логико-математической модели для автоматизированной классификации кислотно-щелочных нарушений. Представлен алгоритмический подход к оценке*

©И.М. Увалиева, Ж.Т. Рахметуллина, Ш.Т. Тезекпаева, Д.Р. Борозенец, Ж.Ж. Нурумов, 2026

метаболических и респираторных расстройств, включая смешанные формы, с учётом механизмов компенсации. Показано, что применение компьютерной модели повышает объективность интерпретации, снижает вероятность диагностических ошибок и способствует принятию обоснованных клинических решений в терапевтической практике.

Разработанная модель предусматривает модульную архитектуру, включающую блок ввода данных, аналитический модуль, реализующий расчёты по уравнению Гендерсона-Хассельбаха, и блок интерпретации результатов с выдачей диагностических заключений. Также рассматривается возможность расширения модели за счёт внедрения методов машинного обучения и применения правил логического вывода для повышения точности классификации и адаптации к различным клиническим сценариям.

Ключевые слова: *кислотно-основное равновесие, газовый состав артериальной крови, артериальная газометрия (ABG), уравнение Гендерсона–Хассельбаха, система поддержки клинических решений, алгоритмизированная интерпретация, респираторные и метаболические нарушения, математическое и логическое моделирование.*

Введение

Нарушения газообмена и кислотно-основного равновесия (*КОР*) остаются одной из наиболее частых причин клинической нестабильности у пациентов как в отделениях интенсивной терапии, так и при хронических заболеваниях дыхательной и метаболической природы [1-3]. Анализ газового состава крови (arterial blood gas analysis, *ABG*) обеспечивает количественную оценку параметров вентиляции (P_aCO_2), оксигенации (P_aO_2 , S_aO_2), кислотности (*pH*) и метаболического компонента буферных систем (HCO_3^- , base excess), что делает его критически важным инструментом диагностики и мониторинга при острой и хронической дыхательной недостаточности, сепсисе, шоке, диабетическом кетоацидозе и других потенциально жизнеугрожающих состояниях [4]. Однако интерпретация *ABG* требует строгого алгоритмического подхода: последовательной оценки первичного сдвига *pH*, ведущего компонента (респираторного или метаболического), степени компенсации, а также выявления смешанных нарушений [5].

Несмотря на высокую информативность *ABG*, практическая интерпретация результатов остаётся уязвимой к когнитивным ошибкам и вариативности клинического опыта, особенно при сочетанных нарушениях, неполных данных или необходимости быстрого решения. В этой связи особую значимость приобретают системы поддержки принятия решений (clinical decision support systems), обеспечивающие стандартизированную и воспроизводимую интерпретацию лабораторных показателей. Одним из ранних и концептуально важных примеров такого подхода является компьютерная программа оценки кислотно-основных нарушений, предложенная H.L. Bleich (1969) [6], которая в интерактивном режиме запрашивает клинико-лабораторные параметры, проверяет их внутреннюю согласованность, вычисляет недостающие величины и формирует структурированное клиническое заключение с указанием ограничений и рекомендаций.

С учётом современных требований к точности и скорости клинической диагностики актуальным является рассмотрение *ABG* как основы алгоритмизированной оценки КОР и обоснование применимости компьютерных логических моделей для повышения качества интерпретации. Настоящая работа направлена на систематизацию ключевых параметров газового состава крови и принципов их физиологического поведения, а также на обсуждение результатов применения алгоритмического подхода к анализу кислотно-щелочных нарушений на примере компьютерной системы поддержки решений.

Цель исследования - обосновать диагностическую значимость анализа газового состава крови и продемонстрировать возможности алгоритмизированной и математической интерпретации нарушений кислотно-основного равновесия на основе клинико-лабораторных данных.

Задачи исследования

– проанализировать физиологические основы формирования показателей газового состава крови;

– разработать алгоритмизированную модель диагностики нарушений КОР;

– оценить диагностическую эффективность компьютерной системы поддержки решений.

Научная новизна исследования заключается в разработке алгоритма автоматизированного анализа кислотно-щелочного состояния, объединяющего интерпретацию газового состава крови, расчёт анионного промежутка и механизм проверки

внутренней согласованности лабораторных параметров.

В отличие от существующих решений, предложенная система не только выполняет классификацию нарушений кислотно-щелочного равновесия, но и осуществляет предварительную валидацию входных данных на основе физиологических закономерностей и уравнения Гендерсона-Хассельбаха, что позволяет выявлять потенциально ошибочные или несовместимые показатели до формирования клинического заключения.

Методы исследования

1) Уравнение Гендерсона-Хассельбаха

Кислотно-щелочной баланс поддерживается с помощью химических буферных систем, легочной активности и почечной активности [7].

Химические буферные системы – это растворы, демпфирующие изменения *pH*. Внутри- и внеклеточные буферные системы немедленно реагируют на нарушения кислотно-основного баланса. Важную буферную функцию выполняют и кости, особенно при перегрузке кислотами [8].

Буферная система состоит из слабой кислоты и связанного с ней основания. Основание присоединяет H^+, а слабая кислота его отсоединяет, тем самым сводя к минимуму изменения концентрации свободного H^+. Буферная система позволяет минимизировать изменения *pH* вблизи константы равновесия (*pKa*); таким образом, хотя в организме потенциально существуют много буферных пар, физиологически значимы только некоторые из них.

В рамках исследования математическая интерпретация кислотно-основного состояния осуществлялась с использованием комплекса физиологически обоснованных уравнений, описывающих взаимосвязь между вентиляционными, метаболическими и электролитными параметрами крови. Формулы интегрировались в алгоритм поддержки клинических решений и применялись для количественной оценки кислотно-щелочного баланса, выявления скрытых метаболических нарушений и оценки адекватности компенсаторных реакций организма.

Отношения между *pH* буферной системы и концентрацией ее компонентов описывается уравнением Гендерсона-Хассельбаха (1) [9]:

$$pH = pKa + lg\frac{[anion]}{[weak\ acid]} \quad (1)$$

где *pKa* в (1) представляет собой константу диссоциации слабой кислоты.

Наиболее важная внеклеточная буферная система HCO_3^-/CO_2 описывается уравнением (2):

$$H^+ + HCO_3^- \leftrightarrow H_2CO_3 \leftrightarrow CO_2 + H_2O \quad (2)$$

Увеличение концентрации H^+ сдвигает уравнение (2) вправо, т.е. образуется CO_2.

Эта важная буферная система регулируется на высоком уровне. Концентрацию CO_2 можно точно контролировать с помощью альвеолярной вентиляции, а концентрации H^+ и HCO_3^- можно точно отрегулировать с помощью почечной экскреции.

Соотношение между *pH*, HCO_3^- , и CO_2 в системе, описываемой уравнением Гендерсона-Хассельбаха, следующее (3):

$$pH = 6{,}1 + lg\frac{HCO_3^-}{0{,}03\cdot PCO_2} \quad (3)$$

где HCO_3^- измеряется в мЭкв/л, а PCO_2 — это парциальное давление CO_2 , измеряемое в мм рт.ст.

Или аналогично, с помощью уравнения Кассирера-Блайха (4), полученного из уравнения Гендерсона-Хассельбаха [10]:

$$H^+ = 24\cdot\frac{PCO_2}{HCO_3^-} \quad (4)$$

Для преобразования артериального *pH* в $[H^+]$ (4) используют (5):

$$pH = -lg[H^+] \quad (5)$$

Или (6):

$$[H^+] = 10\ \hat{}(-pH) \quad (6)$$

Оба уравнения показывают, что кислотно-щелочной баланс зависит от соотношения парциального давления углекислого газа (PCO_2) и концентрации HCO_3^- в сыворотке или плазме, а не абсолютного значения только одного из этих веществ. С помощью формул (5)-(6) любую из 2 переменных можно использовать для вычисления третьей.

Уравнение Гендерсона-Хассельбаха использовалось для проверки внутренней согласованности лабораторных показателей и вычисления недостающих параметров при неполных данных. Применение модели позволило формализовать взаимодействие респираторного и метаболического компонентов регуляции кислотно-основного равновесия.

2) Алгоритм первичной интерпретации кислотно-основного равновесия по артериальным газам крови (pH и PCO_2)

Алгоритм первичной интерпретации кислотно-основного равновесия (*КОР*) реализован в виде логической последовательности решений, основанной на анализе показателей артериальных газов крови и электролитов сыворотки [11]. Метод направлен на стандартизированную оценку респираторных и метаболических нарушений, автоматическую проверку согласованности данных и формирование диагностических заключений [12-14]. Графическое описания этапа сбора и валидации исходных параметров представлен на рисунке 1.

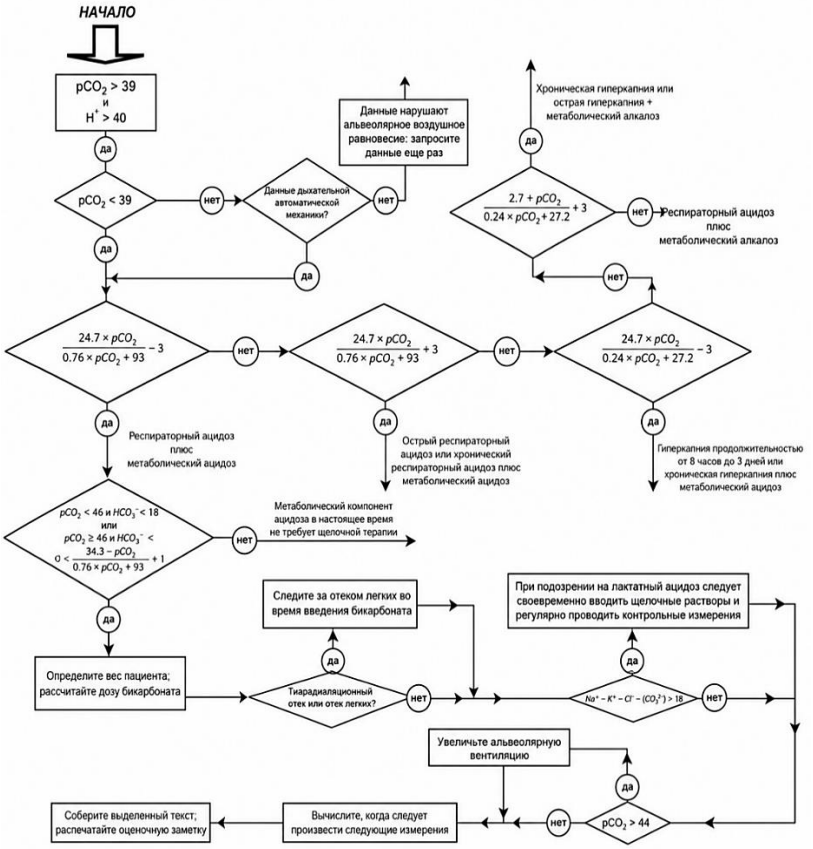


Рисунок 1 – Этап сбора и валидации исходных параметров первичной интерпретации кислотно-основного равновесия по артериальным газам крови

На первом этапе алгоритм предусматривает ввод ключевых лабораторных показателей: концентраций натрия (Na^+), калия (K^+), хлорида (Cl^-) и общего содержания углекислого газа (CO_2T), а также значений *pH* и парциального давления углекислого газа (PCO_2). Полученные данные подвергаются первичной проверке на физиологическую допустимость и внутреннюю согласованность.

Для выявления возможных ошибок ввода используется расчёт выражения (7):

$$Na^+ + K^+ - Cl^- - CO_2, \quad (7)$$

функционально соответствующего оценке анионной разницы. При обнаружении несовместимых значений алгоритм генерирует поясняющее сообщение и запрашивает повторный ввод данных. В случае неполного набора параметров система реализует

процедуру восстановления недостающих величин на основе уравнения Гендерсона-Хассельбаха, что позволяет сохранить непрерывность анализа.

Дальнейшая логика предусматривает оценку соответствия концентрации бикарбоната условному референтному диапазону (≈25±3 ммоль/л) и определение необходимости перехода к более углублённому анализу. При отсутствии отклонений формируется заключение о нормальных показателях внеклеточного кислотно-щелочного баланса. При повышении расчётной анионной разницы (>18 ммоль/л) алгоритм инициирует блок расширенной интерпретации, представленный на рисунке 2.

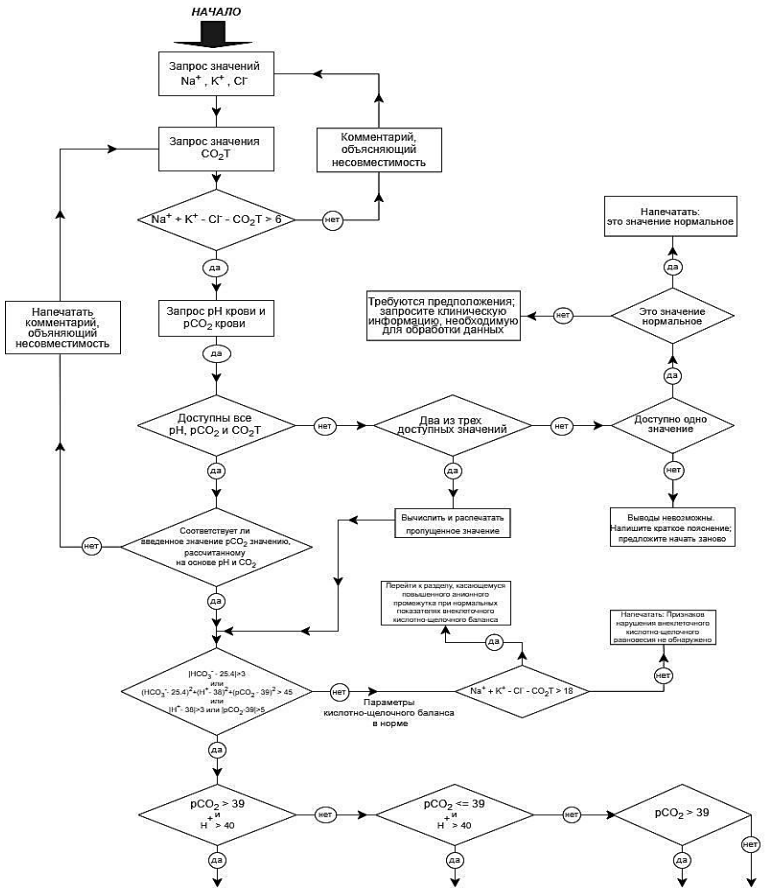


Рисунок 2 – Этап дифференциальной оценки кислотно-щелочных нарушений

Вторая часть алгоритма, представленная на рисунке 2, направлена на классификацию выявленных отклонений и оценку характера компенсации. Исходной точкой служит анализ соотношения PCO_2 и активности ионов водорода, позволяющий определить ведущий компонент нарушения – респираторный или метаболический.

Система сопоставляет показатели пациента с расчетными кривыми титрования углекислого газа, что позволяет разграничивать острые и хронические формы гиперкапнии, а также выявлять наложение метаболического ацидоза или алкалоза [15-18]. При обнаружении повышенного уровня PCO_2 и соответствующих изменений концентрации бикарбоната алгоритм дифференцирует респираторный ацидоз, хроническую гиперкапнию или смешанные состояния. Дополнительные логические ветви предусматривают оценку адекватности метаболической компенсации и необходимость коррекции бикарбонатом.

Алгоритм также содержит клинические рекомендации, формируемые автоматически в зависимости от полученных результатов анализа. К ним относятся увеличение альвеолярной вентиляции, мониторинг риска отёка лёгких при введении щелочных растворов, расчёт дозы бикарбоната на основе массы тела пациента и планирование повторных лабораторных измерений.

Представленный алгоритм отражает формализацию клинического мышления при интерпретации артериальных газов крови и основан на последовательной оценке электролитного баланса, параметров вентиляции и метаболических показателей.

Использование логической сети решений обеспечивает воспроизводимость анализа, уменьшает влияние субъективных факторов и позволяет стандартизировать первичную диагностику кислотно-щелочных нарушений.

Результаты исследования

1) Программная реализация системы

Разработанная система поддержки клинических решений реализована в виде локального программного приложения. Программа разработана с использованием языка программирования Python и библиотеки Tkinter для создания графического пользовательского интерфейса.

Архитектура системы включает три основных модуля:

- модуль ввода лабораторных данных;
- аналитический модуль;
- модуль интерпретации результатов.

Модуль ввода обеспечивает получение значений электролитов крови (Na^+, K^+, Cl^-, HCO_3^-), а также параметров газового состава крови (pH, pCO_2). Аналитический модуль реализует вычисления на основе уравнения Гендерсона–Хассельбаха, расчёт анионного промежутка и проверку согласованности введённых данных. Модуль интерпретации формирует диагностическое заключение о типе нарушения кислотно-щелочного состояния.

Пользовательский интерфейс программы содержит поля ввода параметров, кнопки запуска анализа и окна отображения результатов. Для повышения надёжности системы реализован механизм автоматической проверки корректности и физиологической совместимости вводимых данных.

2) Результаты экспериментального исследваония системы

В ходе исследования была реализована компьютерная система поддержки клинических решений, предназначенная для анализа нарушений кислотно-щелочного равновесия на основе клинических и лабораторных данных. Разработка подобных систем соответствует современным тенденциям цифровизации здравоохранения и направлена на повышение эффективности диагностики, снижение вероятности врачебных ошибок и оптимизацию клинического процесса. В литературе отмечается значительная роль интерфейсов взаимодействия человека и интеллектуальных систем в обеспечении качества медицинской помощи [19].

Полученные результаты показали, что разработанный алгоритм (рис. 1, 2) способен автоматически запрашивать необходимые параметры, проверять корректность введённых значений и формировать клиническое заключение с учётом выявленных физиологических закономерностей. Программный модуль реализует поэтапный ввод данных, включающий значения электролитов (Na^+, K^+, Cl^-, HCO_3^-) и газов крови (pH, pCO_2), после чего выполняет автоматическую интерпретацию результатов.

Результаты тестирования показали, что при вводе значений электролитов (Na^+ = 130 ммоль/л, K^+ = 3 ммоль/л, Cl^- = 98 ммоль/л, HCO_3^- = 23 ммоль/л) система автоматически выполняет проверку их взаимосвязи и, в случае выявления отклонений от ожидаемых соотношений, формирует предупреждение о несовместимости данных (рис. 3).

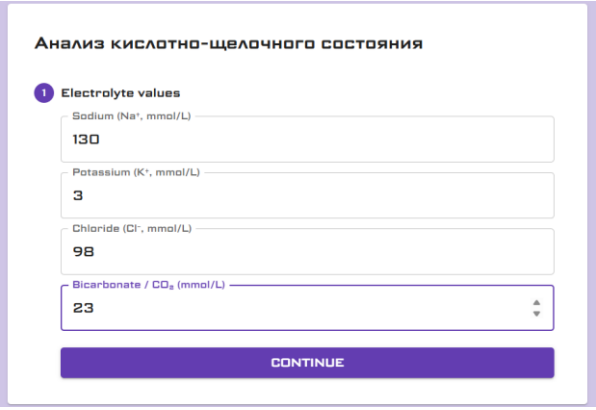


Рисунок 3 – Окно ввода исходных значений

В частности, пользователю выводится сообщение о необходимости верификации измерений, а дальнейший анализ блокируется.

Система корректно выявляет внутренне несогласованные комбинации электролитных показателей и автоматически блокирует дальнейший анализ при обнаружении таких данных. В частности, при вводе значений, не соответствующих физиологически допустимым соотношениям, программный модуль формирует предупреждение о несовместимости параметров и предлагает пользователю проверить корректность измерений.

Реализация данного механизма позволяет исключить использование ошибочных или противоречивых данных на последующих этапах анализа кислотно-щелочного состояния, что существенно повышает надёжность формируемых диагностических заключений. В отличие от предыдущей версии алгоритма, новая реализация обеспечивает предварительную валидацию входных параметров и предотвращает интерпретацию некорректных значений.

Для количественной оценки эффективности разработанной системы было проведено тестирование на наборе клинических сценариев, включающих различные типы нарушений кислотно-щелочного состояния. Всего было проанализировано 50 тестовых случаев, среди которых присутствовали метаболический ацидоз, метаболический алкалоз, дыхательный ацидоз, дыхательный алкалоз, а также смешанные нарушения (рис. 4).

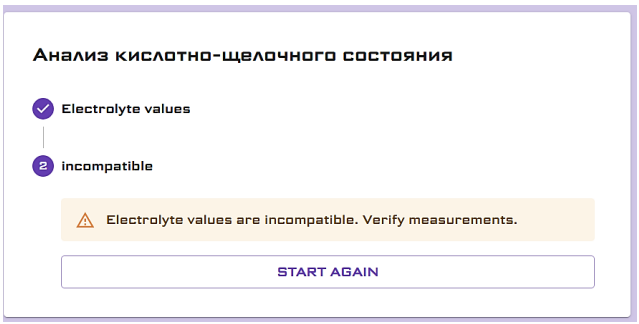


Рисунок 4 – Окно с результатом анализа кислотно-щелочного равновесия на основе клинических и лабораторных данных

Результаты тестирования показали, что система корректно классифицировала 47 из 50 случаев, что соответствует точности 94%. Наибольшая эффективность алгоритма наблюдалась при анализе типичных форм нарушений кислотно-щелочного равновесия. Ошибки интерпретации были связаны преимущественно с внутренне противоречивыми или физиологически несогласованными входными данными.

Таким образом, внедрение блока контроля совместимости электролитов повышает устойчивость системы к ошибкам ввода и лабораторным погрешностям, а также способствует повышению клинической достоверности результатов, что является важным условием её практического применения в медицинской диагностике. Полученные результаты подтверждают эффективность применения разработанной системы для анализа нарушений кислотно-щелочного состояния и согласуются с современными исследованиями, посвящёнными использованию алгоритмических и интеллектуальных методов в интерпретации газового состава крови и электролитных нарушений [20-23].

Заключение

Проведённый анализ подтверждает, что исследование газового состава крови, особенно артериальной, является ключевым инструментом диагностики нарушений вентиляции, оксигенации и кислотно-основного равновесия. Комплексная оценка *pH*, P_aCO_2, HCO_3^- /BE и показателей оксигенации позволяет дифференцировать респираторные и метаболические расстройства, определить степень компенсации и своевременно выявлять смешанные нарушения.

Цель исследования достигнута – обоснована клиническая значимость *ABG* и показана эффективность алгоритмизированной интерпретации *KOP*. Использование компьютерной системы поддержки решений демонстрирует, что формализация физиологических закономерностей способствует стандартизации анализа, повышает воспроизводимость заключений и снижает риск интерпретационных ошибок.

Научная новизна работы заключается в представлении *ABG* как основы для

алгоритмического анализа и обосновании применения логических моделей для поддержки клинических решений. Практическая значимость связана с возможностью использования алгоритмизированной интерпретации в интенсивной терапии, при хронической дыхательной недостаточности и метаболических нарушениях для ускорения диагностики и контроля компенсации. Особенностью разработанной системы является интеграция этапа автоматического контроля достоверности лабораторных данных, что снижает риск диагностических ошибок.

К ограничениям относится ориентация алгоритма на единичный временной срез данных. Перспективы дальнейших исследований включают разработку модулей портала интеллектуальной системы поддержки принятия клинических решений в гематологии и диабетологии на основе технологии газометрии крови.

Список литературы

1. Pippalapalli J. The respiratory system and acid–base disorders / J. Pippalapalli, A.B. Lumb // BJA education. – 2023. – № 23(6). – P. 221-228. https://doi.org/10.1016/j.bjae.2023.03.002.
2. Arterial blood gas / D. Castro et al // StatPearls. – 2024. https://www.statpearls.com/point-of-care/17837#ref_18755915.
3. Arterial Versus Venous Blood Gas Analysis Comparisons, Appropriateness, and Alternatives in Different Acid/Base Clinical Settings: A Systematic Review / L. Saberian et al // Cureus. – 2023. – № 15(7). – P. e41707. https://doi.org/10.7759/cureus.41707.
4. Fundamentals of arterial blood gas interpretation / J. Yee et al // Kidney360. – 2022. – № 3(8). – P. 1458-1466. https://doi.org/10.34067/KID.0008102021.
5. Sanagustín M.N. Blood gas analysis: Clinical applications, interpretation and future directions / M.N. Sanagustín, J. Osredkar // Medicine International. – 2025. – № 6(1). – P. 7. https://doi.org/10.3892/mi.2025.291.
6. Bleich H.L. Computer evaluation of acid-base disorders / H.L. Bleich // The Journal of clinical investigation. – 1969. – № 48(9). – P. 1689-1696. https://doi.org/10.1172/JCI106134.
7. Shaw I. Acid-base balance: a review of normal physiology / I. Shaw, K. Gregory // BJA education. – 2022. – № 22(10). – P. 396-401. https://doi.org/10.1016/j.bjae.2022.06.003.
8. Physiology of intracellular calcium buffering / D. Eisner et al // Physiological Reviews. – 2023. – № 103(4). – P. 2767-2845. https://doi.org/10.1152/physrev.00042.2022.
9. Bear R.A. Assessing acid-base imbalances through laboratory parameters / R.A. Bear, M. Gribik // Hospital Practice. – 1974. – № 9(11). – P. 157-165. https://doi.org/10.1080/21548331.1974.11706454.
10. Zaharani L. Student exploration of the Henderson-Hasselbach equation and pH readings to determine the p K a value of 4, 4′-trimethylenedipiperidine (TMDP) / L. Zaharani, N.G. Khaligh // Chemistry Teacher International. – 2023. – № 5(4). – P. 427-437. https://doi.org/10.1515/cti-2023-0036.
11. Sanagustín M.N. Blood gas analysis: Clinical applications, interpretation and future directions / M.N. Sanagustín, J. Osredkar // Medicine International. – 2025. – № 6(1). – P. 7. https://doi.org/10.3892/mi.2025.291.
12. Dervieux, E. (2024). Caractérisation transcutanée non invasive du contenu sanguin en dioxyde de carbone (CO2) (Doctoral dissertation, Université de Strasbourg). https://theses.hal.science/tel-04960702/
13. Severinghaus J.W. Blood gas analysis and critical care medicine / J.W. Severinghaus, P. Astrup, J.F. Murray // American journal of respiratory and critical care medicine. – 1998. – № 157(4). – P. S. 114-122. https://doi.org/10.1164/ajrccm.157.4.nhlb1-9.
14. Agrò F.E. Acid-base balance and blood gas analysis. In Postoperative critical care for adult cardiac surgical patients / F.E. Agrò, M. Vennari, M. Benedetto // (Cham: Springer International Publishing. – 2018. – P. 495-526. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-75747-6_16
15. ABG Assistant—Towards an Understanding of Complex Acid-Base Disorders / Ł. Gutowski et al // Journal of Clinical Medicine. – 2021. – № 10(7). – P. 1516. https://doi.org/10.3390/jcm10071516.
16. Hubble S.M. Acid-base and blood gas analysis / S.M. Hubble // Anaesthesia & Intensive Care Medicine. – 2004. – № 5(11). – P. 380-383. https://doi.org/10.1383/anes.5.11.380.53406.
17. Constable P.D. Clinical assessment of acid-base status: comparison of the Henderson-Hasselbalch and strong ion approaches / P.D. Constable // Veterinary clinical pathology. – 2000. – № 29(4). – P. 115-128. https://doi.org/10.1111/j.1939-165x.2000.tb00241.x.

18. Algorithms to estimate PaCO2 and pH using noninvasive parameters for children with hypoxemic respiratory failure / R.G. Khemani et al // Respiratory care. – 2014. – № 59(8). – P. 1248-1257. https://doi.org/10.4187/respcare.02806.
19. Hutch M.R. Applications and challenges of human computer interaction and AI interfaces for health care / M.R. Hutch, Y. Luo // Human Computer Interaction in Healthcare: The Role of Cognition. – 2024. – P. 63-90.
20. Prediction of acid-base and potassium imbalances in intensive care patients using machine learning techniques / R. Phetrittikun et al // Diagnostics. – 2023. – № 13(6). – P. 1171. https://doi.org/10.3390/diagnostics13061171.
21. Smith-Erichsen N. Acid-base disturbances in intensive-care patients / N. Smith-Erichsen, J. Kofstad, B. Ingvaldsen // Tidsskrift for den Norske Laegeforening: Tidsskrift for Praktisk Medicin, ny Raekke. – 2010. – № 130(15). – P. 1471-1474. https://doi.org/10.4045/tidsskr.09.0302.
22. Arterial blood gas analysis and clinical decision-making in emergency and intensive care unit nurses: A performance evaluation / A. Zaboli et al // In Healthcare. – 2025. – Vol. 13, № 3. – P. 261. https://doi.org/10.3390/healthcare13030261.
23. Krbec M. Sources of error in interpretation of blood gas analysis: Current acid-base models of plasma. – 2023. https://air.unimi.it/handle/2434/976730.

И.М. Увалиева, Ж.Т. Рахметуллина, Ш.Т. Тезекпаева*, Д.Р. Борозенец, Ж.Ж. Нурумов
Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті,
Қазақстан Республикасы, Өскемен қаласы, Серікбаев көшесі, 19
*e-mail: shtezekpaeva@ektu.kz

ГЕНДЕРСОН-ХАССЕЛЬБАЛХ ТЕҢДЕУІНЕ НЕГІЗДЕЛГЕН ҚАН ГАЗОМЕТРИЯСЫ ДЕРЕКТЕРІ БОЙЫНША ҚЫШҚЫЛ-НЕГІЗДІК ТЕПЕ-ТЕҢДІК БҰЗЫЛЫСТАРЫН ДИАГНОСТИКАЛАУҒА АРНАЛҒАН КЛИНИКАЛЫҚ ШЕШІМДЕРДІ ҚОЛДАУ МОДЕЛІ

Мақалада қышқыл-негіздік тепе-теңдік (ҚНТ) бұзылыстарын диагностикалауға арналған клиникалық шешімдерді қолдау жүйесі қарастырылады. Жүйе қанның газдық құрамын (ABG) талдауға және Henderson-Hasselbalch equation теңдеуіне негізделген. Қазіргі клиникалық тәжірибеде диагностиканың дәлдігі мен жылдамдығына қойылатын талаптардың артуы ABG көрсеткіштерін алгоритмдік өңдеудің маңыздылығын күшейтеді. Зерттеу жұмысы қан газдарының негізгі параметрлерін (pH, P_aCO_2, HCO_3^-, BE) жүйелеуге, олардың физиологиялық өзара байланысын талдауға және қышқыл-негіздік бұзылыстарды автоматты түрде жіктейтін логикалық-математикалық модель құруға бағытталған. Алгоритмдік тәсіл метаболикалық және респираторлық бұзылыстарды, сондай-ақ аралас түрлерін компенсациялық механизмдерді ескере отырып анықтауға мүмкіндік береді. Нәтижесінде компьютерлік модельді қолдану диагноз қоюдың объективтілігін арттырып, клиникалық шешім қабылдау сапасын жақсартады.

Түйін сөздер: *қышқыл-негіздік тепе-теңдік, артериялық қанның газдық құрамы, артериялық газометрия (ABG), Гендерсон-Хассельбах теңдеуі, клиникалық шешімдерді қолдау жүйесі, алгоритмдік интерпретация, респираторлық және метаболикалық бұзылыстар, математикалық және логикалық модельдеу.*

I. Uvaliyeva, Zh. Rakhmetullina, Sh. Tezekpayeva*, D. Borozenets, Zh. Nurumov
D. Serikbayev East Kazakhstan technical university
*e-mail: shtezekpaeva@ektu.kz

CLINICAL DECISION SUPPORT MODEL FOR THE DIAGNOSIS OF ACID-BASE DISORDERS BASED ON BLOOD GAS ANALYSIS USING THE HENDERSON-HASSELBALCH EQUATION

This article presents a clinical decision support system for diagnosing acid–base balance disorders based on arterial blood gas (ABG) analysis using the Henderson–Hasselbalch equation. Considering the increasing requirements for accuracy and rapid clinical diagnostics, algorithm-based interpretation of ABG parameters has become highly relevant. The study aims to systematize the key blood gas indicators (pH, P_aCO_2, HCO_3^-, BE) and analyze their physiological relationships, as well as to develop a logical and mathematical model for automated classification of acid–base disorders. The proposed algorithm enables the identification of metabolic, respiratory, and mixed disturbances, taking compensatory mechanisms into account. The results demonstrate that the implementation of a computerized decision support model enhances diagnostic objectivity, reduces interpretation errors, and improves the quality of clinical decision-making.

Key words: *acid-base balance, arterial blood gas composition, arterial blood gas analysis (ABG), Henderson-Hasselbalch equation, clinical decision support system, algorithm-based interpretation, respiratory and metabolic disorders, mathematical and logical modeling.*

Сведения об авторах

Индира Махмутовна Увалиева – PhD, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан; e-mail: iuvalieva@ektu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2117-5390.

Женисгуль Толеухановна Рахметуллина – кандитат физико-математических наук, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г.Усть-Каменогорск, Казахстан; e-mail: zhrakhmetullina@ektu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0554-7684.

Шынар Толегеновна Тезекпаева* – докторант ОП «Информационные системы», школа цифровых технологий и искусственного интеллекта, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан; e-mail: shtezekpaeva@ektu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-9552-0288.

Давид Рафаэлевич Борозенец – магистрант ОП «Математическое и компьютерное моделирование», Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г.Усть-Каменогорск, Казахстан; e-mail: borozenets.david.sh4@yandex.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-2017-5840.

Жарас Жолымханулы Нурумов – докторант ОП «Информационные системы», школа цифровых технологий и искусственного интеллекта, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан; e-mail: znurumov@ektu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-2016-6876.

Авторлар туралы мәліметтер

Индира Махмутовна Увалиева – PhD, Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қаласы, Қазақстан; e-mail: iuvalieva@ektu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2117-5390.

Женисгуль Толеухановна Рахметуллина – физика-математика ғылымдарының кандидаты, Д.Серікбаев атындығы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қаласы, Қазақстан; e-mail: zhrakhmetullina@ektu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0554-7684.

Шынар Толегеновна Тезекпаева* – «Ақпараттық жүйелер» ББББ докторанты, цифрлық технологиялар және жасанды интеллект мектебі, Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қаласы, Қазақстан; e-mail: shtezekpaeva@ektu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-9552-0288.

Давид Рафаэлевич Борозенец – «Математикалық және компьютерлік модельдеу» ББББ магистранты, Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан Республикасы; e-mail: borozenets.david.sh4@yandex.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-2017-5840.

Жарас Жолымханулы Нурумов – «Ақпараттық жүйелер» ББББ докторанты, цифрлық технологиялар және жасанды интеллект мектебі, Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан Республикасы; e-mail: e-mail: znurumov@ektu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-2016-6876.

Information about the authors

Indira Uvaliyeva – PhD, D.Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; e-mail: iuvalieva@ektu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2117-5390.

Zhenisgul Rakhmetullina – Candidate of Physical- Mathematical Sciences, D.Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; e-mail: zhrakhmetullina@ektu.kz. ORCID: https://orcid.org/ 0000-0002-0554-7684.

Shynar Tezekpaeva* – PhD student, the School of Digital Technology and artificial intelligence, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; e-mail: shtezekpaeva@ektu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-9552-0288.

David Borozenets – student of the EP «Mathematical and Computer Modeling», D.Serikbayev Oskemen, East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan; e-mail: borozenets.david.sh4@yandex.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-2017-5840.

Zharas Nurumov – PhD student, the School of Digital Technology and artificial intelligence, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan; e-mail: znurumov@ektu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-2016-6876.

Поступила в редакцию 31.03.2026
Поступила после доработки 19.05.2026
Принята к публикации 20.05.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-62

IRSTI: 55.21.19

L.G. Sulyubayeva, S.D. Bolatov*, B.A. Alibekova
Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University
070002, Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk, st. Shakarima, 148
*e-mail: sanzharbolatov94@gmail.com

STUDY OF THE INFLUENCE OF ELECTROLYTIC-PLASMA TREATMENT PARAMETERS ON THE SURFACE STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF THE STRAIGHT TOOTH OF AN EARTHMOVING BUCKET

Abstract: *This study examines how electrolytic plasma treatment can improve the wear resistance of 30CrMnSi bucket teeth used in loaders operating under severe abrasive conditions. Samples were subjected to various processing methods, including electrolytic plasma hardening, nitriding, carburizing, nitrocarburizing hardening, and quenching. Multiple analytical techniques, including scanning electron microscopy energy dispersive spectroscopy, X-ray diffraction, and microhardness testing, were used to comprehensively characterize the structure, phases, and mechanical properties of the samples. The tribological properties of the materials were evaluated using a TRB3 tribometer, and abrasive wear testing was conducted according to GOST 23.208–79. The results show that electrolytic plasma treatment results in the formation of diffusion layers with a thickness of 15 to 25 μm. This process is accompanied by the formation of carbide, nitride, and carbonitride phases (Fe_4C, Fe_7C_3, Fe_4N, Fe_2N, and $Fe_3(CN)$). This process significantly increases surface hardness (up to 810 HV) and improves wear resistance. The study also showed that electrolytic plasma nitriding provides an optimal balance between hardness and toughness, resulting in low friction and increased resistance to abrasive wear. The development of this technology can extend the service life of earthmoving and mining equipment components, reducing maintenance costs and downtime.*

Key words: *bucket teeth; chemical-thermal treatment; electric discharge surface chemical-thermal treatment; abrasive wear; microhardness.*

Introduction

For many years, buckets were equipped with teeth to help penetrate, excavate, and break up materials. Teeth also serve as wear parts and can be replaced when worn, extending the life of the bucket. Early teeth were manufactured as one-piece constructions, requiring both cutting and welding to replace them, a labor-intensive process. Modern teeth consist of an adapter welded to the bucket and a tooth with a locking system, making it easy to replace when needed. Teeth available on the market today are cast, meaning their hardness cannot be guaranteed throughout their entire length.

In their study, Florea V. A. and Toderaș M. M. conducted a three-year monitoring of quarry equipment operating in a quarry [1]. The wear evolution of quarry equipment teeth, which directly contact rock, was specifically monitored during the production process, along with wear indicators obtained by simulating wear phenomena under laboratory conditions, in order to verify the data collected during the machines' operation. As a solution, the authors proposed welding worn bucket teeth to reduce downtime and reduce the cost of replacing them.

In a study by Shivali S. and his co-authors, analyzing the problem of intense abrasive wear on the working parts of earthmoving equipment, they concluded that applying hard-alloy coatings is an effective way to extend the service life of excavator bucket teeth [2]. Experiments showed that the use of ferrocarbon carbide electrodes with varying chromium and carbon contents significantly reduces material loss due to sliding friction. All the deposited layers tested demonstrated higher wear resistance than the original low-alloy steel.

The most common approaches include design improvements, the use of new materials, and the use of thermochemical treatment and surface hardening technologies [3]. These methods allow for improving surface properties without changing the characteristics of the component's core, maintaining its toughness and impact strength [4].

©L.G. Sulyubayeva, S.D Bolatov*, B.A. Alibekova, 2026

Classic methods of thermochemical treatment – carburizing, nitrocarburizing and nitriding – are based on diffusion saturation of the surface with active elements at elevated temperatures. They ensure the formation of a hard surface layer that retains the ductility of the core [5]. Carburizing provides high hardness (HRC 58-62), but requires significant energy consumption and a long processing time [6]. Nitrocarburizing is carried out at lower temperatures (570-750 °C) and provides high hardness with a smaller layer depth [7]. Nitriding (500-570 °C) makes it possible to obtain a layer with a hardness of 1000-1200 HV without subsequent hardening, but the process is lengthy - up to 60 hours [8]. Hardening forms a martensitic structure with high wear resistance, but requires precise selection of heating and cooling modes [9].

In [10], it was shown that traditional heat treatment of 30CrMnSi steel increases hardness but does not provide sufficient resistance to impact loads. In contrast, electrolytic plasma treatment forms a diffusion carbonitride layer with high hardness and wear resistance. Modern electric discharge surface chemical-thermal treatment combines the advantages of chemical-thermal treatment and high-energy impact, providing localized hardening, short process time, and cost effectiveness, making it a promising method for increasing the service life of loader bucket teeth [11-13].

The use of electric discharge plasma chemical-thermal treatment for hardening bucket teeth is particularly promising, as it allows for a significant increase in their service life under conditions of abrasive and impact-abrasive wear [14, 15]. This reduces operating costs, improves equipment reliability, and increases the efficiency of production processes.

Thus, improving the wear resistance of loader teeth has significant practical and economic implications. On the one hand, it extends maintenance intervals and reduces operating costs. On the other hand, it improves equipment efficiency and reduces the cost of mining and construction work.

Given the above circumstances, the primary objective of this study is to investigate the effect of electrolytic plasma treatment, including nitriding, carburizing, quenching, and carbonitriding, on the structure, phase composition, and wear resistance of 30CrMnSi steel used to manufacture earthmoving bucket teeth. This study aims to determine the optimal EPT regime for increasing hardness, reducing the friction coefficient, and extending the service life of loader bucket teeth operating under conditions of intense abrasive wear.

Materials and methods

For electrolytic plasma treatment, samples were cut from straight ladle teeth (30CrMnSi steel) (Fig. 2a) measuring 20x20x20 mm. The chemical composition of 30CrMnSi steel is given in Table 1 in accordance with GOST 4543-71.

Table 1 – Chemical composition of steel 30 CrMnSi according to GOST 4543-71

C	Mn	Si	Cr	Cu	S	P	Fe
0.28-0.34%	0.80-1.10%	0.9-1.2%	0.80–1.10%	no more than 0.30%	no more than 0.025%	no more than 0.025%	rest

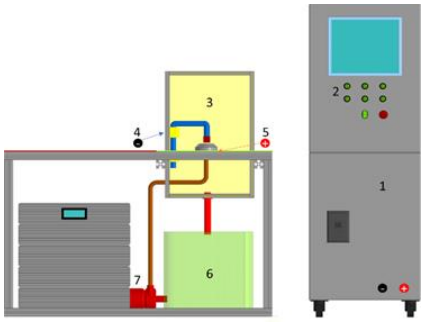


Figure 1 – Electrolytic-plasma treatment unit: 1) power source; 2) power source control panel; 3) electrolytic cell; 4) cathode; 5) anode; 6) container with electrolyte; 7) pump

The electrolytic-plasma unit operates as follows (Fig. 1): voltage is supplied from the power source (1) through the control panel (2) to the electrolytic cell (3), where the workpiece is connected as the cathode (4), and the opposite electrode serves as the anode (5); from the tank (6) the pump (7) circulates the electrolyte into the working area, where, when high voltage is applied, a vaporgas

shell is formed on the surface of the cathode, which passes into a plasma state, which ensures local heating and modification of the material – removal of oxides, smoothing of microroughness and formation of a hardened or polished layer with improved performance properties.

Table 2 shows the parameters for nitrocarburizing, nitriding, carburizing and hardening, as well as the electrolyte composition, process temperature, voltage and processing time.

Table 2 – Processing parameters for each regime

Processing regime	Electrolyte	Temperature, °C	Voltage, V	Time, min
Nitrocarburization	10% Na_2CO_3, 20% CH_4N_2O, 5% $C_3H_8O_3$	800	170	6
Nitriding	10% Na_2CO_3, 20% CH_4N_2O	600	170	5
Cementation	10% $C_3H_8O_3$, 15% Na_2CO_3	950	170	10
Hardening	15% Na_2CO_3	600	200	2

To study the cross-sectional microstructure of the samples before and after electrolytic plasma treatment, an SEM3200 scanning electron microscope (Guangzhou, China) equipped with an energy-dispersive spectrometer was used. X-ray diffraction analysis was performed using an X'PertPRO diffractometer (Kyoto, Japan) with Cu-Kα radiation (λ = 1.54 Å) at 40 kV and 30 mA to identify the phases of the samples before and after EPT. Diffraction patterns were collected in the 2θ range from 20° to 90° with a step size of 0.02° and a counting time of 1 second per step. The data were analyzed using HighScore software.

A TRB3 tribometer (Austria) was used to study the tribological properties of samples before and after EPT. The load was 6 N, the distance was 100 m, the track radius was 3 mm, and a 100Cr6 steel ball with a diameter of 6 mm served as the counterweight. The tests were conducted at room temperature (24°C).

Abrasive wear tests were conducted in accordance with GOST 23.208-79. The abrasive material was electrocorundum with a grain size of 16P and a relative humidity in accordance with GOST 23.208-79. The test lasted 30 minutes (1800 roller revolutions).

The abrasive wear testing apparatus (Figure 2b) operates as follows: a rotating rubber roller (1), driven by an electric motor, interacts with a sample (2) secured in a sample holder (3). A lever (4) creates a constant force pressing the sample against the roller surface. A continuous flow of abrasive material is fed from the dosing hopper (5) through a guide chute (6) positioned at an angle of 45° into the contact zone. Abrasive particles, getting between the surface of the roller and the sample, cause gradual abrasion of the material. After a specified number of roller revolutions has been completed, the test is stopped, and wear is assessed based on the loss of sample mass. The formula for abrasive wear (1):

$$K_w = \frac{g_R \rho_S N_S}{g_S \rho_R N_R} \quad (1)$$

Where: K_w is the coefficient of abrasive wear;

g_R, g_S – mass of the reference and test samples, respectively (g);

ρ_R, ρ_S – densities of the reference and test materials (g/cm³);

N_R, N_S – the number of roller revolutions (or friction cycles) for the test and reference samples, respectively.

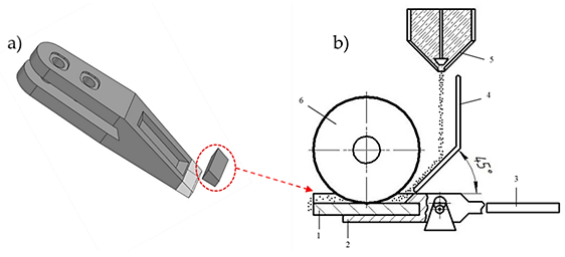


Figure 2 – 3D model of an excavator bucket tooth (a) and a setup diagram (b) for abrasive wear testing

Results and discussion

As shown in Figure 3, diffraction patterns of the original steel and samples after different types of electrolytic plasma treatment. In the initial state (initial), intense peaks of α-Fe (cubic body-centered lattice) are recorded, which confirms the ferrite structure of the material without any pronounced secondary phases.

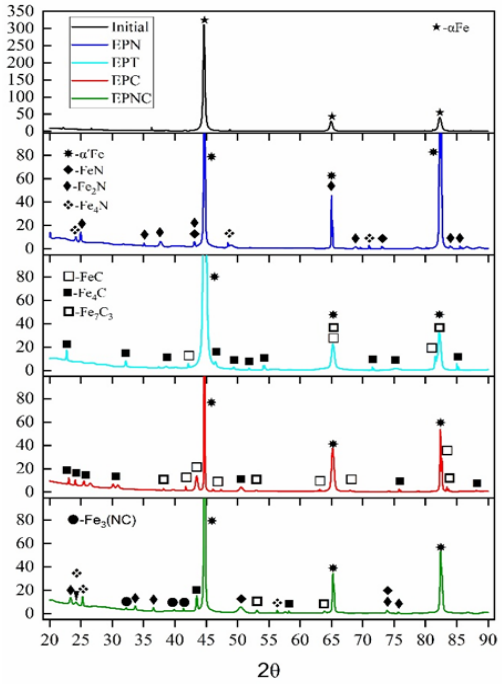


Figure 3 – X-ray diffraction patterns of the original steel and samples after different regimes of electrolytic-plasma treatment:
EPN – nitriding; EPT – hardening; EPC – carburizing; EPNC – nitrocarburizing

After electrolytic plasma nitriding, additional peaks corresponding to FeN, Fe_2N, and Fe_4N phases appear in the diffraction pattern at 2θ ≈ 37-43° and 55-75°, indicating effective nitrogen saturation and nitride layer formation.

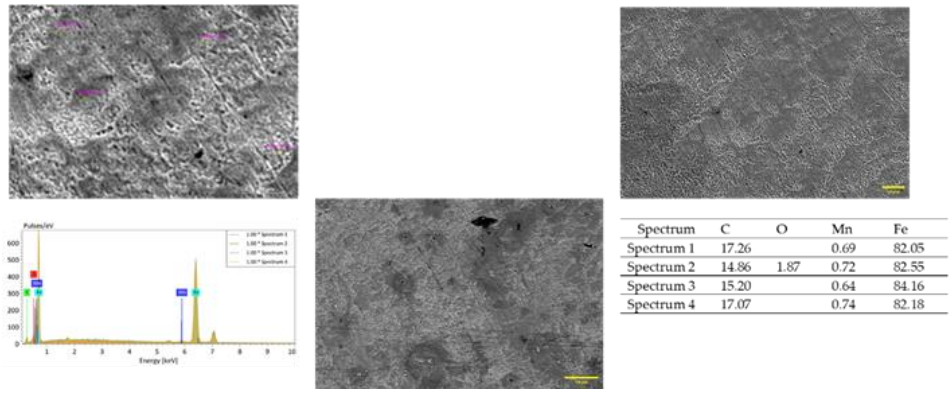
Carbon-enriched heat treatment results in the formation of iron carbides (FeC, Fe_4C, Fe_7C_3), while strong α-Fe reflections confirm their dispersed distribution within the ferrite matrix. Electrolytic plasma carburizing also produces these carbides, but with higher peak intensities due to enhanced carbon diffusion and a more saturated carbide layer.

After electrolytic plasma nitriding, a complex phase composition is observed, including nitrides (Fe_2N, Fe_4N), carbides (Fe_4C, Fe_7C_3), and $Fe_3(CN)$, confirming simultaneous nitrogen and carbon enrichment and the formation of a wear-resistant multicomponent structure. XRD analysis shows that each processing method forms a distinct phase set, with electrolytic plasma nitriding providing the highest structural diversity and performance.

In the initial state, 30CrMnSi steel exhibits a heterogeneous ferrite-pearlite microstructure with uniformly distributed carbides and minor surface defects, as confirmed by SEM and EDS analyses. This structure is typical of alloyed structural steels used for bucket teeth and serves as the basis for subsequent electrolytic plasma hardening (Fig. 4).

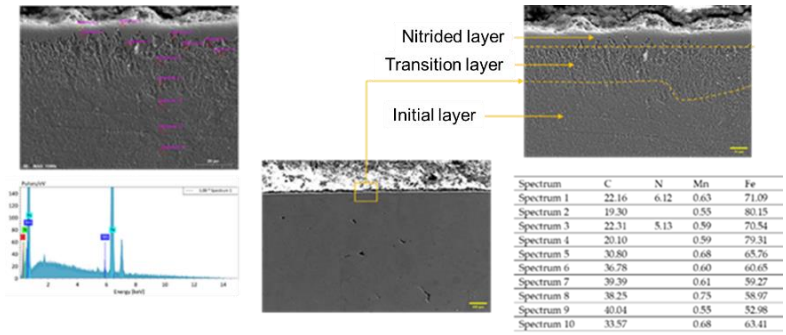
Figure 5 shows scanning electron micrographs of a cross-section of a 30CrMnSi steel sample after electrolytic plasma nitriding, along with energy-dispersive analysis results. The structure clearly reveals a modified surface layer approximately 15-20 μm thick, which has a lighter contrast than the substrate. The surface is characterized by the formation of a nitrided layer with a heterogeneous morphology.

Point EDS analysis (Table) shows a significant increase in carbon (19-40 at.%) and nitrogen (5-6 at.%) in the near-surface zone, while iron content decreases from 79.3 to 52.9 at.%, indicating effective surface saturation and diffusion layer formation. The maximum nitrogen content (6.12 at.%) recorded in the upper layer correlates with XRD results confirming FeN, Fe_2N, and Fe_4N phases. High carbon content (up to 40 at.%) suggests the formation of iron carbides and carbonitrides.



Spectrum	C	O	Mn	Fe
Spectrum 1	17.26		0.69	82.05
Spectrum 2	14.86	1.87	0.72	82.55
Spectrum 3	15.20		0.64	84.16
Spectrum 4	17.07		0.74	82.18

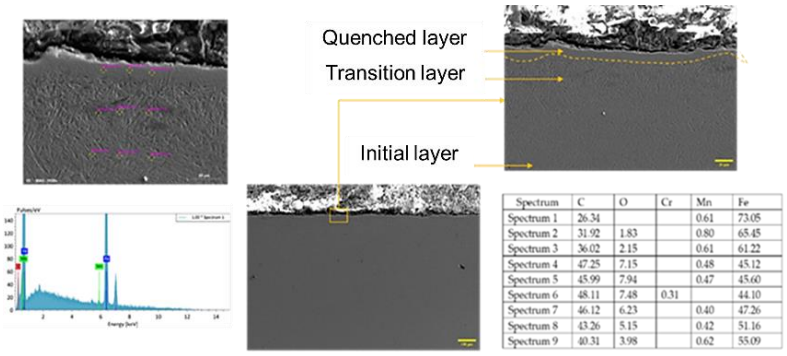
Figure 4 – Scanning electron micrographs and energy-dispersive analysis spectra of the surface of the original sample of a bucket tooth made of 30CrMnSi steel



Spectrum	C	N	Mn	Fe
Spectrum 1	22.16	6.12	0.63	71.09
Spectrum 2	19.30		0.55	80.15
Spectrum 3	22.31	5.13	0.59	70.54
Spectrum 4	20.10		0.59	79.31
Spectrum 5	30.80		0.68	65.76
Spectrum 6	36.78		0.60	60.65
Spectrum 7	39.39		0.61	59.27
Spectrum 8	38.25		0.75	58.97
Spectrum 9	40.04		0.55	52.98
Spectrum 10	33.57		0.68	63.41

Figure 5 – Microstructure of the cross-section of 30CrMnSi steel after electrolytic-plasma nitriding in a scanning electron microscope using energy-dispersive analysis

These results confirm that electrolytic plasma nitriding forms a diffusion layer enriched with carbon and nitrogen, promoting surface hardening through nitride and carbonitride formation. SEM cross-sections (Fig. 6) reveal a distinct modified layer 15-25 μm thick, featuring acicular and lamellar structures typical of martensitic transformation.



Spectrum	C	O	Cr	Mn	Fe
Spectrum 1	26.34			0.61	73.05
Spectrum 2	31.92	1.83		0.80	65.45
Spectrum 3	36.02	2.15		0.61	61.22
Spectrum 4	47.25	7.15		0.48	45.12
Spectrum 5	45.99	7.94		0.47	45.60
Spectrum 6	48.11	7.48	0.31		44.10
Spectrum 7	46.12	6.23		0.40	47.26
Spectrum 8	43.26	5.15		0.42	51.16
Spectrum 9	40.31	3.98		0.62	55.09

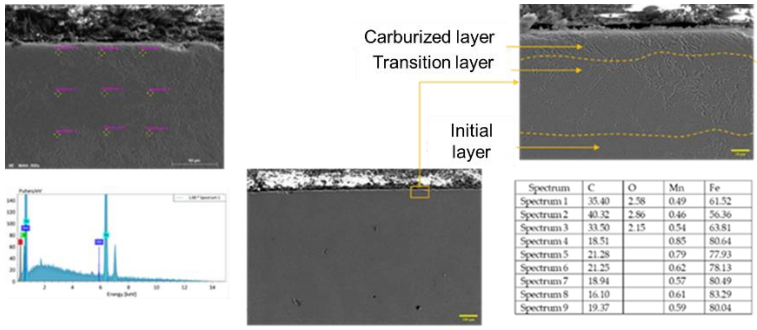
Figure 6 – Microstructure of the cross-section after electrolytic plasma hardening (EPH) in a scanning electron microscope using energy-dispersive analysis

Energy dispersive X-ray diffraction analysis revealed a significant increase in the carbon content in the upper layers, reaching 47-48 at.% (spectra 4-6), while in the substrate the carbon content decreased to 26-31 at.%. The oxygen concentration near the surface reached 7-8 at.%, which is possibly due to the formation of thin oxide films under the influence of intense thermal action in the electrolyte.

In contrast, the iron content in the surface layers decreases significantly from 73 at.% (spectrum 1) to 44 at.% (spectrum 6) due to the displacement of iron by carbon and oxygen during the formation of carbide and oxide compounds. Minor amounts of Cr (0.3-0.8 at.%) and Mn (0.3-0.8 at.%) are uniformly distributed and do not significantly affect phase formation.

Electrolytic plasma hardening produces a surface layer with a martensitic structure and high carbon content. The presence of oxygen indicates the formation of a thin oxide coating, which increases the hardness and wear resistance of the material.

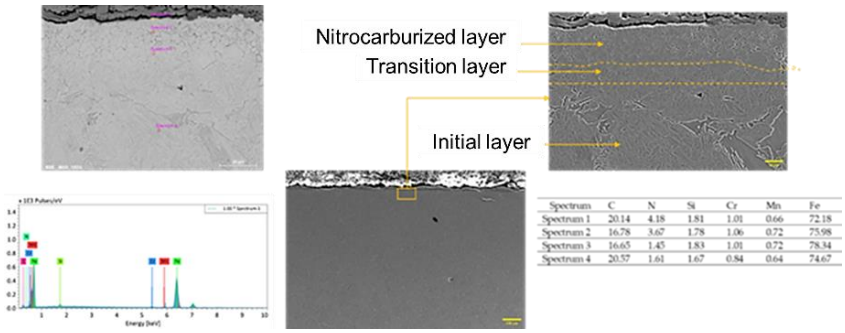
Figure 7 presents SEM images of a steel cross-section after electrolytic plasma carburizing. A modified surface layer 20-25 μm thick with a pronounced carbon-enriched zone is observed. At higher magnification, acicular and lamellar precipitates typical of carbide structures are clearly visible. EDS spectra confirm a significant increase in carbon content and a corresponding decrease in iron concentration, indicating the formation of iron carbides (FeC, Fe_4C, Fe_7C_3), in agreement with XRD results. Trace elements (Mn, Cr) are uniformly distributed and contribute to cementite stabilization. These results confirm the formation of a carbon rich diffusion layer, demonstrating the effectiveness of electrolytic plasma carburizing in improving hardness and wear resistance.



Spectrum	C	O	Mn	Fe
Spectrum 1	35.40	2.58	0.49	61.52
Spectrum 2	40.32	2.86	0.46	56.36
Spectrum 3	33.50	2.15	0.54	63.81
Spectrum 4	18.51		0.85	80.64
Spectrum 5	21.28		0.79	77.93
Spectrum 6	21.25		0.62	78.13
Spectrum 7	18.94		0.57	80.49
Spectrum 8	16.10		0.61	83.29
Spectrum 9	19.37		0.59	80.04

Figure 7 – Microstructure of the cross-section after electrolytic plasma carburizing in a scanning electron microscope using energy dispersive analysis

Figure 8 shows SEM cross-sections after electrolytic plasma nitriding, revealing a pronounced diffusion layer with an acicular-lamellar structure. Enlarged images display elongated precipitates characteristic of a hardened carbonitride layer formed by combined carbon and nitrogen saturation.



Spectrum	C	N	Si	Cr	Mn	Fe
Spectrum 1	20.14	4.18	1.81	1.01	0.66	72.18
Spectrum 2	16.78	3.67	1.78	1.06	0.72	75.98
Spectrum 3	16.65	1.45	1.83	1.01	0.72	78.34
Spectrum 4	20.57	1.61	1.67	0.84	0.64	74.67

Figure 8 – Microstructure of the cross-section after electrolytic plasma nitrocarburizing (EPNC) in a scanning electron microscope using energy-dispersive analysis

Energy-dispersive X-ray spectra demonstrate elevated carbon and nitrogen contents in the surface region compared to the substrate, accompanied by a decrease in iron concentration. The presence of carbon and nitrogen elements indicates the probable formation of iron carbonitride compounds ($Fe_3(CN)$, $Fe_{2-4}N$, Fe_4C), which is consistent with the X-ray diffraction analysis results.

The analysis revealed that electrolytic plasma nitriding promotes the formation of a multicomponent hardened layer enriched with nitrogen and carbon. The formation of carbonitride compounds, combined with the characteristic surface morphology, provides an optimal combination of increased hardness and wear resistance.

A comparison of microstructural studies, phase composition, element distribution, and microhardness shows that each type of electrolytic plasma treatment forms a specific hardened layer. During nitriding, nitride phases are formed, leading to an increase in hardness to 699 ± 57 HV. During the quenching process, the maximum hardness is recorded (810 ± 83 HV) due to the formation of a martensitic structure and a high carbon concentration. In the case of carburizing, the hardness is 586 ± 47 HV, which is associated with the formation of carbide phases, but their influence

is weaker. Nitrocarburizing provides a combined effect due to the formation of carbonitrides, providing a hardness of 545 ± 52 HV and a more balanced combination of wear resistance. The microhardness of the base steel was 178 ± 14 (Fig. 9).

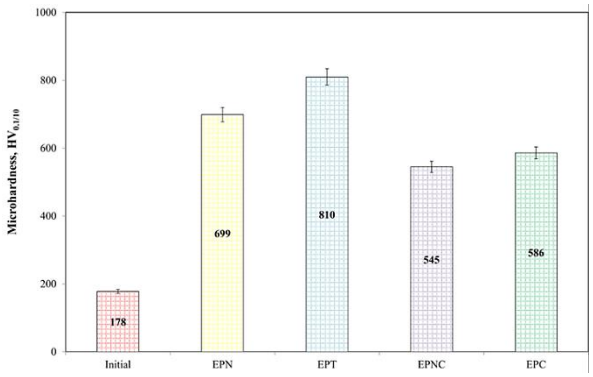


Figure 9 – Distribution of microhardness (HV) by surface depth of 30CrMnSi steel after different regimes of electrolytic-plasma treatment

As shown in Figure 10, tribological tests revealed that the electrolytic plasma treatment method has a significant impact on the frictional behavior of the steel. The initial sample demonstrated a high and unstable friction coefficient (0.55-0.60), indicating reduced wear resistance. Subsequent nitriding and carburizing processes reduced the friction coefficient to 0.45-0.50 and 0.45-0.48, respectively, resulting in more stable curves due to the formation of nitride and carbide phases. Despite achieving maximum hardness (812 HV), hardening was accompanied by the highest friction coefficient (0.55-0.60) and instability due to the formation of brittle martensite. Nitriding demonstrated optimal performance with a friction coefficient of only 0.25-0.35, maintaining stability. Throughout the experiment, the formation of a multicomponent carbonitride layer was observed, which provided an optimal balance of hardness and wear resistance.

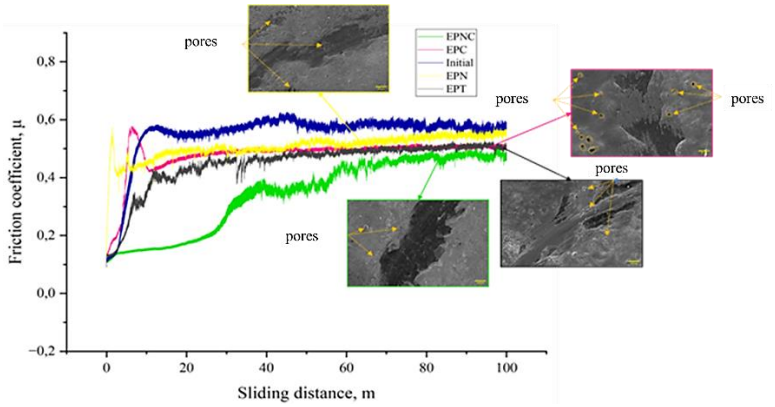


Figure 10 – Results of tribological tests of 30CrMnSi steel before and after and wear track morphology on scanning electron microscope:
change in friction coefficient depending on the processing mode

Abrasive wear tests were performed to determine the relative wear resistance of the initial sample (Table 3). The initial sample demonstrated a relative wear resistance of 0.2349, accompanied by a weight loss of 0.2046 g. The highest weight loss was observed after quenching (0.2539 g, K_w = 0.1893), which is explained by the brittleness of martensite. Nitriding gave K_w = 0.2102 with a weight loss of 0.2286 g, nitriding gave K_w = 0.2018 with 0.2382 g, and nitrocarburizing gave the best result with a weight loss of only 0.2021 g and a relative wear resistance of 0.2378, which exceeds the initial condition and is associated with the formation of. The presence of hard carbide phases is indicated.

Table 3 – Results of abrasive wear

Electrolytic plasma Processing regimes	Abrasive wear	
	Weight loss (g)	Relative wear resistance (K_w)
Standard steel 45	0.048	1
Initial	0.2046	0.234904
quenching	0.2539	0.18929287
nitriding	0.2286	0.21024261
carburizing	0,2021	0.23781029
nitrocarburizing	0.2382	0.20176935

Thus, the research results demonstrate that different processing regimes have a significant impact on the properties and structure of steels. The results of the studies and their analysis are summarized in Table 4.

Table 4 – Correlation table of results before and after electrolytic plasma treatment

Electrolytic plasma processing regimes	Phase composition	Microhardness, HV	Wear resistance assessment	
			μ	Abrasive wear
initial	α-Fe	178	0.55-0.60	0.2349
quenching	Fe_3C, FeO	810	0.55-0.60	0.1893
nitriding	FeN, Fe_2N, Fe_4N	699	0.45-0.50	0.2102
carburizing	FeC, Fe_4C, Fe_7C_3	586	0.45-0.48	0.2378
nitrocarburizing	$Fe_3(CN)$, $Fe_{2-4}N$, Fe_4C	545	0.25-0.35	0.2018

Conclusion

Comprehensive structural, phase, and tribological studies revealed that electrolytic plasma treatment of 30CrMnSi steel results in the formation of hardened diffusion layers. These layers were shown to significantly alter the physical and mechanical properties of the surface. A comparative analysis revealed that electrolytic plasma nitrocarburizing results in the formation of the most complex multicomponent layer, consisting of iron compounds and carbonitride ($Fe_3(CN)$, $Fe_{2-4}N$, Fe_4C), characterized by increased hardness and chemical stability. The presence of these phases ensures an optimal balance of surface hardness and sublayer ductility, preventing the formation of microcracks and fatigue failure under cyclic loading.

Clearly, the nitrocarburizing process reduces the friction coefficient and increases abrasion resistance. This is due to the uniform distribution of diffusion elements and the formation of a dense, fine-grained structure. Unlike traditional carburizing, which predominantly forms carbides, nitrocarburizing promotes the simultaneous saturation of the surface with carbon and nitrogen. This process creates favorable conditions for the formation of hard carbonitride phases and stabilization of the surface layer.

Therefore, electrolytic plasma nitrocarburizing is the most optimal method for treating loader bucket teeth, providing increased hardness, reduced friction, and improved wear resistance. This method has been proven to significantly increase the service life and operational reliability of earthmoving equipment components subject to intense abrasive wear.

References

1. Florea V.A. Efficiency of Maintenance Activities in Aggregate Quarries: A Case Study of Wear Parts on Loaders and Excavators / V.A. Florea, M. Toderaș // Applied Sciences. – 2024. – № 14(17). – P. 7649.

2. Singla S. Enhancing wear resistance of low alloy steel applicable on excavator bucket teeth via hardfacing / S. Singla, A.S. Kang, J.S. Grewal // Asian Review of Mechanical Engineering. – 2012. – № 1(2). – P. 51-54.
3. A Review on Wear-Resistant Coating with High Hardness and High Toughness on the Surface of Titanium Alloy / H. Bai et al // Journal of Alloys and Compounds. – 2021. – № 882. – P. 160645.
4. Effect of Thermal, Chemical and Thermo-Chemical Pre-Treatments to Enhance Methane Production / R. Rafique et al // Energy. – 2010. – № 35. – P. 4556-4561.
5. Electrolytic Plasma Processing for Cleaning and Metal- Coating of Steel Surfaces / E.I. Meletis et al // JC Surface and Coatings Technology. – 2002. – № 150. – P. 246-256.
6. Investigation on the Effect of Technological Parameters of Electrolyte-Plasma Cementation Method on Phase Structure and Mechanical Properties of Structural Steel 20Kh / B. Rakhadilov et al // AIMSMATES. – 2023. – № 10. – P. 934-947. https://doi.org/10.3934/matersci.2023050.
7. Duplex Surface Treatments Combining Plasma Electrolytic Nitrocarburizing and Plasma Immersion Ion-Assisted Deposition / AL. Yerokhin et al // Surface and Coatings Technology. – 2001. – № 142-144. – P. 1129-1136.
8. Electrolytic Plasma Nitriding of Medium-Carbon Steel 45 for Performance Enhancement / Z. Satbayeva et al // Crystals. – 2024. – № 14.
9. Improving Wear Resistance by Electrolyte-Plasma Hardening of Corrosion-Resistant Steel of the Tip / K. Kombaev et al // J Appl Eng Science. – 2023. – № 21. – P. 810-819.
10. MAR Analysis of AISI Material Power of AISI 4140 Bucket Teeth Excavator Using Influence of Abrasive Wear. / S.H. Suryo et al // Surakarta, Indonesia. – 2018. – P. 030022.
11. Richhariya V. Surface Modification of AISI 1020 Mild Steel by Electrical Discharge Coating with Tungsten and Copper Mixed Powder Green Compact Electrodes.
12. Electrolytic Plasma Treatment of the Surface of a Part Produced with the Use of Additive Technology / Metal Science and Heat Treatment Available online: https://link.springer.com/article/10.1007/s11041-018-0250-1 (accessed on 15 October 2025).
13. Electrolyte-Plasma Product Treatment / LI. Akhmadullina et al // J. Phys.: Conf. Ser. – 2020. – № 1588. – P. 012012, https://doi.org/10.1088/1742-6596/1588/1/012012.
14. Duradji A.Y. National University of Science and Technology «MISIS» (MISIS), Moscow, Russia Aluminum Treatment in the Electrolytic Plasma During the Anodic Process / A.Y. Duradji // JESTR. – 2017. – № 10. – P. 81-84. https://doi.org/10.25103/jestr.103.11.
15. Kashapov RN. Research of Plasma-Electrolyte Discharge in the Processes of Obtaining Metallic Powders / RN. Kashapov, LN. Kashapov, NF Kashapov,// J. Phys.: Conf. Ser. – 2017. – № 927. – P. 012086, https://doi.org/10.1088/1742-6596/927/1/012086.

Funding

This research has been funded by the Committee of Science Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant № BR24992879).

Л.Г. Сулюбаева, С.Д. Болатов*, Б.Ә. Әлібекова
Сәрсен Аманжолов Шығыс Қазақстан университеті,
070002, Қазақстан, Өскемен, Шәкәрім к-сі, 148
*e-mail: sanzharbolatov94@gmail.com

ЭЛЕКТРОЛИТТІК-ПЛАЗМАЛЫҚ ӨҢДЕУ ПАРАМЕТРЛЕРІНІҢ ЖЕР ҚАЗАТЫН ШӨМІШТІҢ ТҮЗУ ТІСІНІҢ БЕТКІ ҚҰРЫЛЫМЫ МЕН МЕХАНИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІНЕ ӘСЕРІН ЗЕРТТЕУ

Бұл зерттеу қатты абразивті жағдайларда жұмыс істейтін тиегіштерде қолданылатын 30CrMnSi маркалы шөміш тістерінің тозуға төзімділігін арттырудағы электролиттік-плазмалық өңдеудің тиімділігін қарастырады. Үлгілер әртүрлі өңдеу әдістеріне ұшыратылды, соның ішінде электролиттік-плазмалық шынықтыру, азоттау, цементациялау, азот-көміртекпен қанықтыру және шынықтыру процестері жүргізілді. Үлгілердің құрылымын, фазалық құрамын және механикалық қасиеттерін жан-жақты сипаттау үшін бірнеше талдау әдістері қолданылды: сканерлеуші электрондық микроскопия, энергия-дисперсиялық спектроскопия, рентгенқұрылымдық талдау және микротвердостық өлшеулер. Материалдардың трибологиялық қасиеттері TRB3 трибометрі көмегімен бағаланды, ал абразивтік тозу сынақтары ГОСТ 23.208-79 стандартына сәйкес жүргізілді. Нәтижелер электролиттік-плазмалық өңдеу кезінде қалыңдығы 15-25 мкм болатын

диффузиялық қабаттардың түзілетінін көрсетті. Бұл процесс карбид, нитрид және карбонитрид фазаларының (Fe_4C, Fe_7C_3, Fe_4N, Fe_2N және $Fe_3(CN)$) түзілуімен қатар жүреді. Аталған өңдеу беткі қаттылықты айтарлықтай арттырып (810 HV-қа дейін) және тозуға төзімділікті жақсартады. Зерттеу нәтижелері электролиттік-плазмалық азоттаудың қаттылық пен тұтқырлықтың оңтайлы тепе-теңдігін қамтамасыз ететінін, соның нәтижесінде үйкеліс коэффициенті төмендеп, абразивтік тозуға төзімділіктің артатынын көрсетті. Бұл технологияны дамыту жер қазу және тау-кен жабдықтары бөлшектерінің қызмет ету мерзімін ұзартуға, техникалық қызмет көрсету шығындары мен жабдықтың тоқтап қалу уақытын азайтуға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: *шөміш тістері; химиялық-термиялық өңдеу; электрразрядты беттік химиялық-термиялық өңдеу; абразивтік тозу;микроқаттылық.*

Л.Г. Сулюбаева, С.Д. Болатов*, Б.Ә. Әлібекова
Сарсен Аманжолов Восточно-Казахстанский университет
070002, Казахстан, Усть-Каменогорск, ул. Шакарима, 148
*e-mail: sanzharbolatov94@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ ПОВЕРХНОСТИ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРЯМОГО ЗУБА ЗЕМЛЕРОЙНОГО КОВША

В данном исследовании рассматривается эффективность электролитно-плазменной обработки в повышении износостойкости зубьев ковша марки 30CrMnSi, используемых в погрузчиках, работающих в условиях сильного абразива. Образцы подвергались различным методам обработки, включая электролитически-плазменную закалку, азотирование, цементацию, азотно-углеродное насыщение и процессы закалки. Для всестороннего описания структуры, фазового состава и механических свойств образцов было использовано несколько методов анализа: сканирующая электронная микроскопия, спектроскопия энергодисперсии, рентгеноструктурный анализ и микротвердостные измерения. Трибологические свойства материалов оценивали с помощью трибометра TRB3, а испытания на абразивный износ проводились в соответствии со стандартом ГОСТ 23.208-79. Результаты показали, что при электролитически-плазменной обработке образуются диффузионные слои толщиной 15-25 мкм. Этот процесс сопровождается образованием карбидной, нитридной и карбонитридной фаз (Fe_4C, Fe_7C_3, Fe_4N, Fe_2N и $Fe_3(CN)$). Указанная обработка значительно увеличивает твердость поверхности (до 810 HV) и улучшает износостойкость. Результаты исследования показали, что электролитически-плазменное азотирование обеспечивает оптимальный баланс твердости и вязкости, в результате чего снижается коэффициент трения и повышается износостойкость абразива. Разработка этой технологии позволит продлить срок службы деталей землеройного и горнодобывающего оборудования, снизить затраты на техническое обслуживание и время простоя оборудования.

Ключевые слова: *ковшовые зубья; химико-термическая обработка; электроразрядная поверхностная химико-термическая обработка; абразивный износ; микротвердость.*

Information about authors

Laila Gylimmeddenovna Sulyubayeva – PhD, associate professor, Senior Researcher of Scientific Research Center «Surface Engineering and Tribology» at S. Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; e-mail: lsulyubayeva@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1924-1459.

Sanzhar Daurenuly Bolatov* – junior researcher of Scientific Research Center «Surface Engineering and Tribology» at Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; e-mail: sanzharbolatov94@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-3136-0535.

Balym Alibekkyzy Alibekova – engineer of Scientific Research Center «Surface Engineering and Tribology» at Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; e-mail: balymalibekova304@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-7644-4527.

Авторлар туралы мәліметтер

Лайла Гылыммедденовна Сулюбаева – PhD, қауымдастырылған профессор, С.Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университетінің «Беттік инженерия және трибология» ғылыми-зерттеу орталығының аға ғылыми қызметкері, Өскемен қ., Қазақстан; e-mail: lsulyubayeva@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1924-1459.

Санжар Дәуренұлы Болатов* – Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан Университетінің «Беттік инженерия және трибология» ғылыми-зерттеу орталығының кіші ғылыми қызметкері, Өскемен, Қазақстан; e-mail: sanzharbolatov94@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-3136-0535.

Балым Әлібекқызы Әлібекова – Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университетінің «Surface Engineering and Tribology» ғылыми-зерттеу орталығының инженері, Өскемен қаласы, Қазақстан; e-mail: balymalibekova304@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-7644-4527.

Сведения об авторах

Лайла Гылыммедденовна Сулюбаева – PhD, ассоциированный профессор, старший научный сотрудник научно-исследовательского центра «Инженерия поверхностей и трибология» Восточно-Казахстанского университета имени С. Аманжолова, г. Усть-Каменогорск, Казахстан; e-mail: lsulyubayeva@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1924-1459.

Санжар Дауренулы Болатов* – младший научный сотрудник Научно-исследовательского центра «Инженерия поверхности и трибология» Восточно-Казахстанского университета имени Сарсена Аманжолова, Усть-Каменогорск, Казахстан; e-mail: sanzharbolatov94@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-3136-0535.

Балым Алибеккызы Алибекова – инженер Научно-исследовательского центра «Surface Engineering and Tribology» Восточно-Казахстанского университета имени Сарсена Аманжолова, г. Усть-Каменогорск, Казахстан; e-mail: balymalibekova304@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-7644-4527.

Received 14.04.2026
Revised 03.06.2026
Accepted 04.06.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-63

CC BY 4.0
Check for updates

МРНТИ: 55.22.01

М.К. Даутбеков[1], А.Б. Кеңесбеков[2], Т.Т. Төлеубаев[3], А. Мұрал[*]
[1]ТОО «PlasmaScience»,
070002, Казахстан, г. Усть-Каменогорск, ул. Гоголя, 7г
[2]ТОО «Институт композиционных материалов»
070002, Казахстан, г. Усть-Каменогорск, пр. Шакарим, 157
[3]ТОО «Усть-Каменогорская ТЭЦ»,
070002, Казахстан, г. Усть-Каменогорск, ул. Промышленная, 2
*e-mail: aibolm02@gmail.com

ВЛИЯНИЕ ТОНКОГО HVOF-ПОКРЫТИЯ CR_3C_2-NICR НА ТЕРМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ И ТЕМПЕРАТУРНОЕ СОСТОЯНИЕ ТРУБ ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЯ КОТЛА БКЗ-320-140

Аннотация: *В работе проведён анализ влияния газотермических покрытий на основе Cr_3C_2-NiCr, полученных методом высокоскоростного газопламенного напыления (HVOF), на теплофизические характеристики труб ширмовых пароперегревателей котлоагрегата БКЗ-320-140. Рассмотрено влияние защитного покрытия на процессы теплопередачи, включая конвективный и радиационный теплообмен, а также на температурное состояние металла в условиях высокотемпературного воздействия дымовых газов. Расчёт температурного поля выполнен методом конечных элементов в программном комплексе ELCUT 6.6 с учётом нестационарного режима теплопередачи. В ходе моделирования учтены реальные эксплуатационные параметры, включая давление и температуру пара, скорость потоков и теплофизические свойства материалов. Установлено, что наличие покрытия приводит к незначительному увеличению суммарного термического сопротивления системы «стенка трубы – покрытие». При этом влияние покрытия на температурный режим труб и плотность теплового потока остаётся минимальным. Показано, что применение покрытий Cr_3C_2-NiCr позволяет повысить коррозионно-эрозионную стойкость поверхностей нагрева без существенного снижения теплотехнической эффективности котлоагрегата в реальных условиях эксплуатации. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании, модернизации и оптимизации энергетического оборудования тепловых электростанций в промышленной энергетике Казахстана.*

©М.К. Даутбеков, А.Б. Кеңесбеков, Т.Т. Төлеубаев, А. Мұрал, 2026

Ключевые слова: *тепловые электростанции, поверхности нагрева, пароперегреватель, газотермическое напыление, HVOF, защитные покрытия.*

Введение

В рамках глобальной «зелёной» повестки и развития возобновляемых источников энергии традиционная тепловая энергетика продолжает играть ключевую роль в обеспечении базовой нагрузки энергосистем во многих странах, включая Китай, Индию и государства с развитой промышленной инфраструктурой [1]. Республика Казахстан, располагая значительными запасами угля и природного газа, сохраняет высокую долю тепловой генерации в структуре электроэнергетического баланса [2, 3]. В этой связи повышение надёжности и эффективности эксплуатации тепловых электростанций (ТЭС) остаётся актуальной инженерной и научной задачей. Значительная часть котлоагрегатов ТЭС Казахстана была введена в эксплуатацию несколько десятилетий назад и характеризуется высоким уровнем износа поверхностей нагрева [4, 5]. Наиболее уязвимыми элементами являются ширмовые пароперегреватели, работающие в условиях интенсивного лучистого теплообмена, высоких температур и воздействия золовых частиц. Для котлов типа БКЗ-320-140 характерно сочетание высокотемпературной коррозии и эрозионного износа, что приводит к утонению стенок труб, росту температур металла и снижению ресурса оборудования [6-8].

Коррозионно-эрозионный износ поверхностей нагрева оказывает комплексное влияние на работу котлоагрегатов, изменяя как механические свойства труб, так и условия теплообмена. Теплопередача в ширмовых пароперегревателях определяется излучением и конвекцией дымовых газов, а также теплофизическими свойствами материала труб и состоянием их поверхности [9, 10]. Изменение характеристик поверхности вследствие износа и нанесения защитных покрытий может существенно влиять на тепловой поток и температурное состояние металла.

Одним из перспективных методов повышения коррозионно-эрозионной стойкости поверхностей нагрева является применение газотермических покрытий. HVOF как один из видов газотермического напыления позволяет формировать плотные покрытия с низкой пористостью и высокой адгезией, что обеспечивает их устойчивость в условиях высоких температур и абразивного воздействия [11]. В качестве покрытий широко используются материалы на основе систем Cr_3C_2-NiCr, NiCr и WC-Co [12-14]. Современные исследования показывают, что газотермические покрытия, особенно HVOF-покрытия на основе Cr_3C_2-NiCr и NiCr-систем, остаются одним из наиболее эффективных способов защиты котельных труб от высокотемпературной коррозии, эрозионного износа и шлакования. В обзорах последних лет подчёркивается, что выбор состава покрытия, его пористость, адгезия, фазовый состав и теплопроводность являются ключевыми факторами, определяющими долговечность поверхностей нагрева в условиях эксплуатации котельного оборудования [15-17]. Однако влияние таких покрытий на теплофизические и термодинамические характеристики поверхностей нагрева изучено недостаточно. В связи с этим необходим анализ влияния покрытий полученных методом HVOF на теплопередачу и температурное состояние труб.

Покрытие Cr_3C_2-NiCr выбрано в качестве объекта исследования вследствие сочетания его высоких эксплуатационных свойств в условиях работы поверхностей нагрева котлоагрегатов. Карбид хрома Cr_3C_2 обеспечивает высокую твёрдость и устойчивость к эрозионному и абразивному износу в потоке дымовых газов и золовых частиц, тогда как связка NiCr способствует повышению жаростойкости и коррозионной стойкости за счёт формирования защитных оксидных слоёв на основе Cr_2O_3. Покрытия данной системы характеризуются устойчивостью к высокотемпературной оксидной, сульфатной и хлоридной коррозии, а также стабильностью фазового состава при рабочих температурах поверхностей нагрева, что делает их перспективными для защиты труб пароперегревателей энергетических котлов.

Целью работы является количественная оценка влияния тонкого защитного HVOF-покрытия Cr_3C_2-NiCr толщиной 100 мкм на суммарное термическое сопротивление, линейную плотность теплового потока и температурное состояние трубы ширмового пароперегревателя котла БКЗ-320-140 с учётом конвективного и радиационного теплообмена со стороны дымовых газов.

Научная новизна работы заключается в том, что для условий эксплуатации ширмового пароперегревателя котла БКЗ-320-140 выполнена количественная оценка вклада тонкого HVOF-покрытия Cr_3C_2-NiCr в общее термическое сопротивление многослойной системы «дымовые газы – покрытие – стенка трубы – пар». Показано, что при толщине покрытия 100 мкм его собственное термическое сопротивление составляет лишь малую долю от общего сопротивления теплопередаче, вследствие чего изменение температуры стенки трубы не превышает 1 °C, а изменение линейной плотности теплового потока составляет менее 1 %. Таким образом, установлено, что защитное покрытие может повышать коррозионно-эрозионную стойкость труб без существенного ухудшения их теплотехнической эффективности.

Материалы и методы

Наличие на внешней поверхности трубы слоя покрытия полученные методом HVOF из никель-хромового сплава с карбидом хрома (Cr_3C_2-NiCr) существенно снижает скорость как коррозии, так и эрозии. Такое покрытие характеризуется высокой жаростойкостью и твердостью: связка NiCr обеспечивает коррозионную стойкость (за счет образования стабильных оксидов Cr_2O_3), а твердые частицы Cr_3C_2 придают износостойкость. Однако, перед внедрением защитного покрытия требуется провести анализ его влияния на теплофизические свойства труб, включая процессы теплопередачи. В работе внимание уделено оценке возможного влияния покрытия на проектно-эксплуатационные характеристики котельного оборудования, параметры поверхностей нагрева которого изначально определены для конкретных заданных эксплуатационных условий.

Ключевой особенностью является учет защитного покрытия как фактора, меняющего граничные условия теплообмена (коэффициенты теплоотдачи сред и теплопроводность материала). Для оценки теплофизических свойств системы «стенка трубы–покрытие» было использовано компьютерное моделирование в программном комплексе ELCUT методом конечных элементов нестационарных температурных полей. Для построения расчётной модели были приняты допущения, характерные для задач теплопроводности многослойных цилиндрических конструкций [16]. Расчётная методика основана на применении критериальных зависимостей теплообмена и уравнений теплопередачи через многослойную цилиндрическую стенку.

Численный расчёт температурного поля в сечении трубы диаметром ∅ 32×4 выполнялся в программном комплексе ELCUT 6.6 методом конечных элементов для решения задач теплопроводности и теплопередачи. Моделирование проводилось в модуле «Нестационарная теплопередача» в плоской постановке задачи. Геометрия расчётной области представляла собой поперечное сечение трубного элемента, моделируемое в виде осесимметричной цилиндрической стенки. В качестве исходных данных задавались коэффициенты теплоотдачи от дымовых газов к наружной поверхности трубы и от внутренней поверхности к пару, а также температуры соответствующих сред. Теплофизические свойства материала трубы (сталь 12Х1МФ) и покрытия (Cr_3C_2-NiCr) включали коэффициент теплопроводности, удельную теплоёмкость и плотность.

Расчёт температурного поля выполнялся в радиальной постановке для многослойной цилиндрической стенки трубы. Задача рассматривалась как нестационарная теплопроводность с последующим выходом на установившийся режим. Для материала трубы и покрытия использовалось уравнение нестационарной теплопроводности:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad (1)$$

где

ρ – плотность материала, кг/м³;

c – удельная теплоёмкость, Дж/(кг·К);

T – температура, К или °C;

t – время, с;

λ – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·К).

Для цилиндрической стенки при радиальном переносе теплоты уравнение может быть записано в виде:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\lambda r \frac{\partial T}{\partial r}) \quad (2)$$

где

r – радиальная координата, м.

На внутренней поверхности трубы задавалось граничное условие конвективного теплообмена между стенкой и перегретым паром:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha_1 (T_s - T_p) \quad (3)$$

где

α_1 – коэффициент теплоотдачи от внутренней стенки к пару, Вт/(м²·К);

T_s – температура поверхности стенки, °С;

T_p – средняя температура пара, °С.

На наружной поверхности трубы с покрытием задавалось комбинированное граничное условие теплообмена с дымовыми газами, включающее конвективную и радиационную составляющие:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha_k \left(T_g - T_s\right) + \varepsilon\sigma (T_g^4 - T_s^4) \quad (4)$$

где

α_k– конвективный коэффициент теплоотдачи со стороны дымовых газов, Вт/(м²·К);

T_g – температура дымовых газов, К;

T_s – температура наружной поверхности, К;

ε – приведённая степень чёрноты поверхности;

σ=5,67·10^{-8} Вт/(м²·К⁴) – постоянная Стефана-Больцмана.

Для учёта теплофизических свойств были приняты параметры котла БКЗ-320-140 (табл. 1).

Таблица 1 – Параметры ширмового пароперегревателя по котлоагрегату БКЗ-320-140

Величина	Обозначение	Значение
Давление перегретого пара	p	14 МПа
Температура пара на входе в систему пароперегревателей	$T_{вх}$	372 °С
Температура пара на выходе из системы пароперегревателей	$T_{вых}$	410 °С
Внешний диаметр труб	d_2	32 мм
Внутрений диаметр труб	d_1	24 мм
Теплопроводность стенки (12Х1МФ)	λ_w	40 Вт/(м·К)
Теплопроводность стенки (Cr_3C_2-NiCr)	$\lambda_w^{пкр}$	19 Вт/(м К)
Скорость пара в трубах	w_1	16 м/с
Скорость газов (узкое сечение)	w_2	19,5 м/с
Температура дымовых газов на участке входа в ширмовый пароперегреватель	$T_{д1}$	1177 °С
Температура дымовых газов на участке выхода из ширмовый пароперегревателя	$T_{д2}$	1067 °С
Кинематическая вязкость при t=1122 °	ν	197,1·10$^{(-6)}$ м²/с;
Коэффициент теплопроводности дымовых газов при t=1122 °С	$\lambda_{дг}$	11,75·10$^{(-3)}$ Вт/(м·К)
Число Прандтля: при t=1122 °С	Pr	0,57
Плотность пара: при t=391 °С и давлении $p_{пп}$=14 Мпа	ρ	60,07 кг/м^3
Динамическая вязкость пара	μ	2,4828·10$^{(-5)}$ Па·с

Данные параметры приняты на основании литературных данных и эксплуатационных характеристик котла БКЗ-320-140.

Для оценки теплоотдачи со стороны рабочего тела (перегретого пара) в трубах пароперегревателя первоначально определялся режим течения. В качестве определяющего безразмерного параметра использовался критерий Рейнольдса для внутреннего течения в трубопроводе.

$$Re = \frac{w \cdot d_n}{\nu}, \quad (5)$$

где w – средняя скорость потока, м/с; d_n – внутренний диаметр трубы, м; ν – кинематическая вязкость, м²/с.

Согласно классическим положениям теории теплообмена [9], при Re>10^4 течение в трубах считается развитым турбулентным, что позволяет применять обобщённые критериальные зависимости для расчёта коэффициента теплоотдачи. Для турбулентного течения в трубах число Нуссельта определялось по формуле [4, 7]:

$$Nu = cRe^n \cdot Pr^{0,43} \cdot (\frac{Pr}{Pr_w})^{0,25} \quad (6)$$

Где Pr – число Прандтля теплоносителя при средней температуре потока;
Pr_w – число Прандтля при температуре стенки.
Коэффициент теплоотдачи [10,11]:

$$a_n = \frac{Nu \cdot \lambda_n}{d_n} \quad (7)$$

где λ_n – теплопроводность рабочей среды [12]

Схема теплопередачи через цилиндрическую стенку без покрытия приведена на рисунке 1.

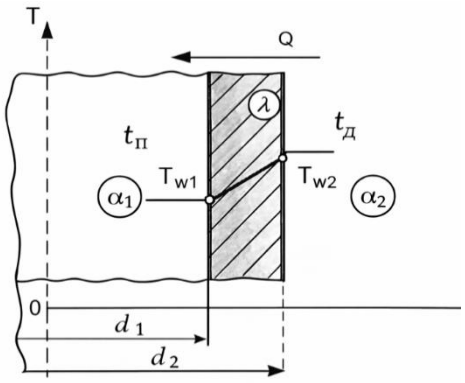


Рисунок 1 – Распределение температуры по толщине однослойной стенки (метал 12Х1МФ). T_{w2} внешняя граница

Схема теплопередачи через градиентную структуру покрытия Cr_3C_2-NiCr и цилиндрическую стенку приведена на рисунок 2.

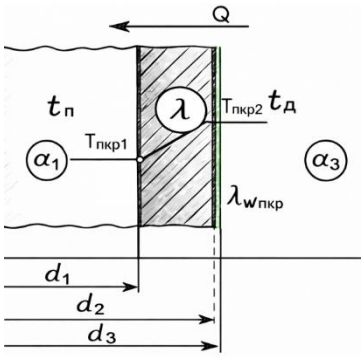


Рисунок 2 – Распределение температуры по толщине многослойной стенки (метал 12Х1МФ+покрытие Cr_3C_2-NiCr). $T_{Пкр2}$ внешняя граница

Эффективность котлоагрегата определяется долей тепла, переданного рабочему телу (пару), от общего количества теплоты, подведённой с продуктами сгорания. При неизменном тепловом вводе снижение интенсивности теплопередачи через стенку труб поверхностей нагрева приводит к уменьшению полезного теплового потока, проходящего через рассматриваемый участок трубы длиной l.

Поскольку перенос теплоты к пару осуществляется через последовательную систему «дымовые газы – наружная конвекция – стенка трубы – внутренняя конвекция – пар», физически обоснованным является использование эквивалентного линейного термического сопротивления [7,12].

$$R_l = \frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda_\omega} ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 \sum d_2} \text{(м·К)/Вт} \quad (8)$$

Где R_l – суммарное линейное термическое сопротивление трубы без покрытия, (м·К)/Вт;

α_1 – коэффициент теплоотдачи от внутренней стенки трубы к пару, Вт/(м²·К);

α_2,Σ – суммарный коэффициент теплоотдачи от дымовых газов к наружной поверхности трубы с учётом конвекции и излучения, Вт/(м²·К);

d_1 – внутренний диаметр трубы, м;

d_2 – наружный диаметр трубы без покрытия, м;

λ_w – коэффициент теплопроводности стали 12Х1МФ, Вт/(м·К).

$$\mathrm{R_{l,1}} = \frac{1}{\alpha_1 \cdot \mathrm{d_1}} \quad (9)$$

$$\mathrm{R_{l,2}} = \frac{1}{2\lambda_w} \ln \frac{\mathrm{d_2}}{\mathrm{d_1}} \quad (10)$$

$$\mathrm{R_{l,3}} = \frac{1}{\alpha_2 \cdot \mathrm{d_3}} \quad (11)$$

Составляющие суммарного линейного термического сопротивления определялись по формулам (9-11).

Температурное состояние стенки трубы с покрытием определяется совместным действием конвективного теплообмена и теплопроводности материалов, при этом наличие покрытия увеличивает суммарное линейное термическое сопротивление Rl, изменяя распределение температуры по радиусу и влияя на линейную плотность теплового потока и выглядит следующим образом:

$$R_{l,p} = \frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \frac{1}{2\lambda_w} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\lambda_p} \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{a_2, \sum d_3} \text{ (м·К)/Вт} \quad (12)$$

Для цилиндрической стенки линейная плотность теплового потока определяется из условия равенства теплового потока на всех участках теплопередачи и может быть выражена через суммарное линейное термическое сопротивление без покрытия [7]:

$$\mathrm{q_l} = \frac{\pi(\mathrm{T_п} - \mathrm{T_{дг}})}{\sum R_l} \quad \text{Вт/м} \quad (13)$$

или с покрытием Cr_3C_2-NiCr:

$$\mathrm{q_l} = \frac{\pi(\mathrm{T_п} - \mathrm{T_{дг}})}{\sum R_{l,п}} \text{Вт/м} \quad (14)$$

Расчет температур наружной и внутренней стенок трубы основан на определении линейной плотности теплового потока и пропорциональности перепадов температур термическим сопротивлениям соответствующих участков и выглядит следующим образом:

$$T_{w,1} = t_п - q_l \cdot \frac{R_{l,1}}{\pi} \ ^oC \quad (15)$$

$$T_{w,2} = t_д - q_l \cdot \frac{R_{l,3}}{\pi} \ ^oC \quad (16)$$

Для трубы с покрытием Cr_3C_2-NiCr:

$$T_{пкр1} = T_п - q_l \cdot \frac{R_{l,1}}{\pi} \ ^oC \quad (17)$$

$$T_{пкр2} = t_д - q_l \cdot \frac{R_{l,4}}{\pi} \ ^oC \quad (18)$$

Результаты и обсуждения

Расчёты выполнены для условий эксплуатации ширмового пароперегревателя котла БКЗ-320-140 с использованием аналитических зависимостей и численного моделирования в программном комплексе ELCUT. Моделирование в ELCUT проводилось для нестационарного режима с последующим выходом на стационарное состояние. Полученные коэффициенты теплоотдачи использованы при моделировании температурного состояния трубы без покрытия и с покрытием Cr_3C_2-NiCr.

Внешний теплообмен со стороны дымовых газов рассматривался с учётом конвективной и лучистой составляющих. Полученный суммарный коэффициент теплоотдачи использован при расчёте теплового состояния трубы без покрытия и с покрытием Cr_3C_2-NiCr.

Результаты расчёта теплового состояния трубы без покрытия представлены в таблице 2. Полученные значения показывают, что температура наружной поверхности трубы выше

температуры внутренней поверхности, что соответствует направлению теплопередачи от дымовых газов к перегретому пару.

Нестационарный расчет (паропровод без покрытия) проводился в программе Elcut. Исходными данными служили коэффициенты теплоотдачи от дымовых газов к стенке и от стенки к пару, определяющие температуры дымовых газов и пара, а также коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость и плотность стали 12Х1МФ. В расчете не учитывалась зависимость этих параметров от температуры, т.к. по табличным данным примерно в диапазоне от 20-400 градусов параметры меняются незначительно.

Начальная температура для нестационарного расчета была принята за $T_0 = 25\ ^oC$.

На рисунке 3 показано температурное поле трубы без покрытия после выхода системы на установившийся режим. Температурное распределение имеет равномерный радиальный характер. Распределение температуры по толщине трубопровода представлено на рисунке 4.

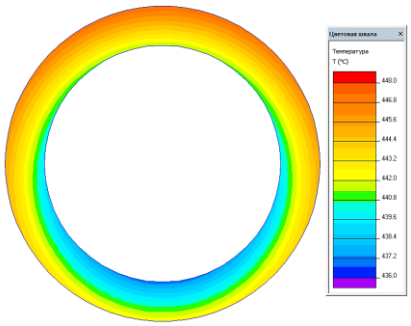


Рисунок 3 – Температурное поле в сечении спустя t=600 сек

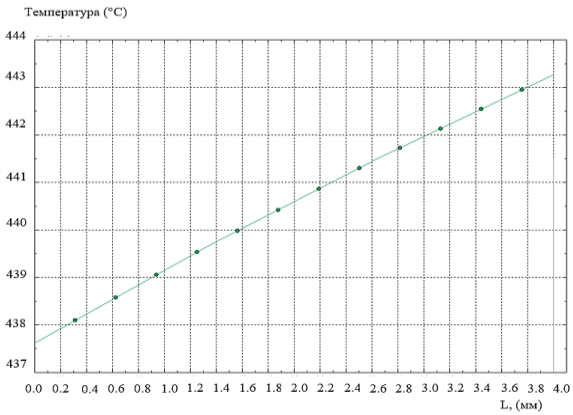


Рисунок 4 – Распределение температуры по толщине трубы после 60 с.

На рисунке 4 представлено распределение температуры по толщине стенки трубы без покрытия. Разность температур между внутренней и наружной поверхностями составляет около 9°C.

Из представленных в таблице 2 данных следует, что результаты аналитического расчёта и численного моделирования в программном комплексе ELCUT хорошо согласуются между собой. Расхождение между полученными значениями не превышает 0,1%, что подтверждает корректность разработанной расчётной модели. Результаты расчёта для трубы с покрытием Cr_3C_2-NiCr представлены в таблице 3. Нанесение покрытия толщиной 100 мкм приводит к незначительному изменению температурного состояния трубы и не оказывает существенного влияния на теплопередачу.

Таблица 2 – Результаты расчетов без покрытия

Показатели	Математические расчеты	Расчеты в программе Elcut
Температура $T_{w,1}$, ^oC	415,2	415,198
Температура $T_{w,2}$, ^oC	424,3	424,285

Нестационарный расчет проводился в программе Elcut. Исходными данными служили коэффициенты теплоотдачи от дымовых газов к стенке и от стенки к пару, определяющие температуры дымовых газов и пара, а также коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость и плотность стали 12Х1МФ и соответственно теплопроводность,удельная теплоемкость, плотность сплава Cr3C2-NiCr. В расчете не учитывалась зависимость этих параметров от температуры, т.к. по табличным данным примерно в диапазоне от 20-400 градусов параметры меняются незначительно.

Начальная температура для нестационарного расчета была принята за $T_0 = 25\ ^oC$.

На рисунке 5 показано температурное поле трубы с покрытием Cr_3C_2–NiCr. Видно, что наличие тонкого покрытия не приводит к существенному изменению температурного поля. Распределение температуры по толщине трубопровода представлено на рисунке 6.

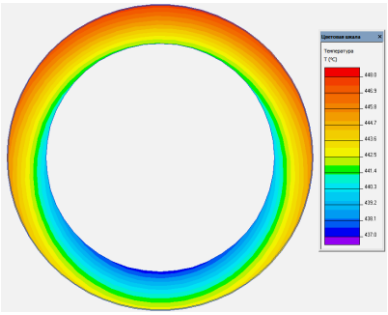


Рисунок 5 – Температурное поле в сечении спустя t=600 С

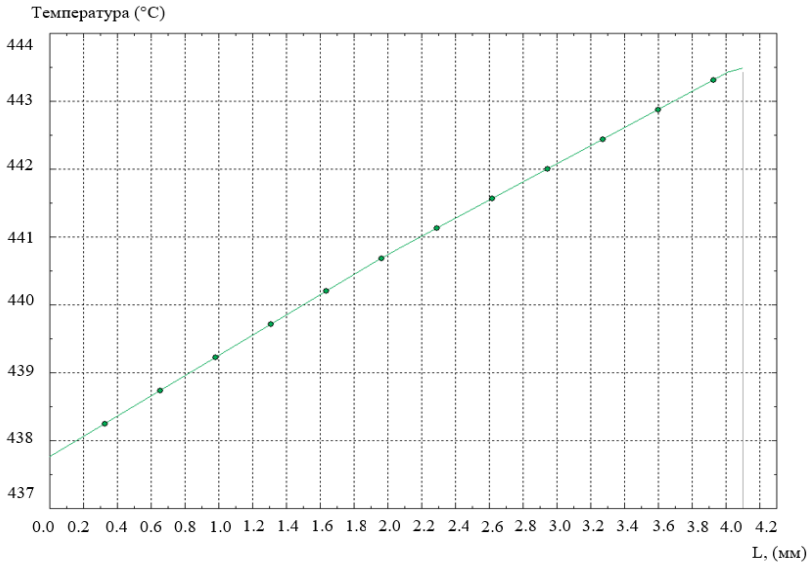


Рисунок 6 – Распределение температуры по толщине трубы после 600 секунд

На рисунке 6 представлено распределение температуры по толщине трубы с покрытием. По сравнению с трубой без покрытия изменение температуры наружной поверхности составляет менее 1°С.

Сравнение результатов аналитического расчёта и численного моделирования для трубы с покрытием также показывает высокую степень согласованности результатов. Расхождение между расчётными данными и результатами моделирования не превышает 0,1 %, что подтверждает достоверность используемой модели (табл. 3).

Таблица 3 – Результаты расчётов для трубы с покрытием Cr_3C_2-NiCr

Показатели	Математические расчеты	Расчеты в программе Elcut
Температура $T_{пкр1}$,°С	415,38	415,377
Температура $T_{пкр2}$, °С	424,66	424,647

Из данных таблицы 4 следует, что нанесение покрытия Cr_3C_2-NiCr толщиной 100 мкм практически не изменяет теплотехнические характеристики трубы. Изменение температуры наружной поверхности не превышает 1°C, а изменение линейной плотности теплового потока составляет менее 1%, что свидетельствует об отсутствии существенного влияния покрытия на эффективность теплообмена.

Таблица 4 – Сравнение теплотехнических параметров трубы без покрытия и с покрытием Cr_3C_2-NiCr

Параметр	Без покрытия	С покрытием Cr_3C_2-NiCr
Суммарное термическое сопротивление, (м·К)/Вт	0,2627	0,2617
Линейная плотность теплового потока, Вт/м	8738,3	8770,5
Температура внутренней поверхности, °C	415,2	415,4
Температура наружной поверхности, °C	424,3	424,7

Для оценки устойчивости полученных результатов был проведён анализ чувствительности расчётной модели к изменению толщины покрытия, коэффициента теплопроводности покрытия и температуры дымовых газов. Такой анализ необходим, поскольку в реальных условиях толщина газотермического покрытия может изменяться в зависимости от режима напыления, а теплофизические свойства покрытия зависят от пористости, фазового состава и степени окисления материала.

В качестве варьируемых параметров рассматривались: толщина покрытия Cr_3C_2-NiCr в диапазоне 50-300 мкм, коэффициент теплопроводности покрытия в диапазоне 10-30 Вт/(м·К), а также температура дымовых газов в диапазоне 1067-1177°C. Оценивалось влияние этих параметров на суммарное линейное термическое сопротивление, линейную плотность теплового потока и температуру наружной поверхности трубы.

Анализ показал, что увеличение толщины покрытия приводит к росту термического сопротивления многослойной стенки, однако при технологически применимой толщине 100 мкм вклад покрытия остаётся незначительным по сравнению с сопротивлением внешнего теплообмена со стороны дымовых газов. Следовательно, изменение теплового потока и температуры стенки трубы остаётся минимальным. Наиболее чувствительным параметром является не теплопроводность тонкого покрытия, а температура дымовых газов и суммарный коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности.

В рамках данной работы анализ чувствительности выполнен как параметрическая оценка влияния основных факторов на расчётную модель (табл. 5). Количественное уточнение зависимости Rl,pR_{l,p}Rl,p, qlq_lql и TsT_sTs от толщины покрытия планируется выполнить на следующем этапе исследования с использованием серии расчётов в ELCUT.

Таблица 5 – Параметры анализа чувствительности расчётной модели

Варьируемый параметр	Диапазон изменения	Оцениваемый результат
Толщина покрытия δ	50-300 мкм	$R_{l,p}$, q_l, T_s
Теплопроводность покрытия λ_p	10-30 Вт/(м·К)	изменение термического сопротивления покрытия
Температура дымовых газов T_g	1067-1177°C	изменение температуры наружной стенки и теплового потока

Проведённый анализ показал, что добавочное термическое сопротивление покрытия Cr_3C_2-NiCr толщиной 100 мкм составляет $4{,}126 \cdot 10^{-5}$ (м·К)/Вт, что значительно меньше сопротивления внешнего теплообмена со стороны дымовых газов. Поэтому влияние покрытия на суммарное термическое сопротивление, температуру стенки и линейную плотность теплового потока остаётся незначительным.

Полученный результат объясняется соотношением отдельных составляющих суммарного термического сопротивления. Несмотря на то что теплопроводность покрытия Cr_3C_2-NiCr ниже теплопроводности стали 12Х1МФ, его толщина составляет всего 100 мкм. Поэтому добавочное сопротивление слоя покрытия оказывается значительно меньше сопротивления внешнего теплообмена со стороны дымовых газов. Основной температурный

перепад формируется не в тонком покрытии, а в зоне внешнего теплообмена между дымовыми газами и наружной поверхностью трубы. Вследствие этого нанесение покрытия приводит лишь к незначительному изменению температурного поля и линейного теплового потока. Физически это означает, что покрытие выполняет преимущественно защитную функцию, повышая стойкость поверхности к коррозионно-эрозионному износу, но не создаёт существенного теплового барьера для передачи теплоты к пару.

Покрытие Cr_3C_2-NiCr, полученное методом HVOF, выполняет преимущественно защитную функцию в условиях высокотемпературного газового потока и коррозионно-эрозионного износа. Карбидная составляющая Cr_3C_2 обеспечивает высокую твёрдость и сопротивление воздействию золовых частиц, тогда как NiCr-связка способствует повышению жаростойкости и коррозионной стойкости за счёт формирования защитных оксидных слоёв на основе Cr_2O_3. С учётом результатов теплотехнического расчёта можно заключить, что такое покрытие повышает эксплуатационную стойкость поверхности нагрева, не создавая существенного дополнительного теплового сопротивления. [14].

Заключение

На основе критериальных зависимостей теплообмена (Re, Pr, Nu) установлено, что как во внутреннем потоке пара, так и во внешнем потоке дымовых газов реализуется развитый турбулентный режим, что обосновывает применение соответствующих корреляционных уравнений при расчёте коэффициентов теплоотдачи и теплового потока через стенку трубы.

С использованием программного комплекса ELCUT 6.6 создана конечно-элементная модель трубы диаметром ∅32×4 мм из стали 12Х1МФ первой ступени пароперегревателя котла БКЗ-320-140. Модель учитывает реальные эксплуатационные параметры: давление пара 14 МПа, температуру дымовых газов до 1177°C и теплофизические свойства защитного покрытия Cr_3C_2-NiCr.

Теплотехнический расчёт и моделирование показали, что для трубы без покрытия температура внутренней поверхности составляет 415,2°C (415,198°C по ELCUT), а внешней поверхности – 424,3°C (424,285°C по ELCUT), тогда как для трубы с покрытием Cr_3C_2-NiCr температура внутренней поверхности составляет 415,38°C (415,377°C по ELCUT), а внешней поверхности – 424,66°C (424,647°C по ELCUT). Установлено, что нанесение покрытия приводит к незначительному увеличению суммарного термического сопротивления системы вследствие добавления дополнительного слоя Cr_3C_2-NiCr с более низкой теплопроводностью по сравнению со сталью 12Х1МФ. Однако из-за малой толщины покрытия (100 мкм) увеличение термического сопротивления остаётся минимальным, вследствие чего изменение линейной плотности теплового потока не превышает 0,38%, а температурный режим трубы изменяется менее чем на 1°C.

Показано, что снижение теплопроводности покрытия не оказывает существенного влияния на теплотехническую эффективность пароперегревателя, поскольку основная доля общего термического сопротивления системы определяется конвективным теплообменом со стороны дымовых газов и пара. В связи с этим покрытие Cr_3C_2-NiCr может рассматриваться как эффективное защитное решение для поверхностей нагрева котлов.

Инженерный смысл полученного результата состоит в том, что покрытие Cr_3C_2-NiCr толщиной 100 мкм не является критическим тепловым барьером для труб ширмового пароперегревателя. При расчётных условиях котла БКЗ-320-140 изменение температуры стенки составляет менее 1°C, а изменение линейной плотности теплового потока не превышает 1%. Следовательно, применение такого покрытия может быть рекомендовано как способ повышения ресурса труб за счёт защиты от коррозионно-эрозионного износа без заметного снижения теплотехнической эффективности поверхности нагрева.

Список литературы

1. International Energy Agency. World Energy Outlook 2023. Paris: IEA, 2023. 524 p.
2. Министерство энергетики Республики Казахстан. Топливно-энергетический баланс Республики Казахстан. Астана, 2022. – 120 с.
3. Samruk-Energy JSC. Annual Report 2022. Astana, 2023. – 180 p.
4. Viswanathan R. Damage mechanisms and life assessment of high-temperature components. Materials Park: ASM International. – 1989. – 500 p. https://doi.org/10.31399/asm.tb.dmlahtc.9781627083409.

5. Stringer J. High temperature corrosion of metals / J. Stringer // Materials Science and Technology. – 1987. – Vol. 3. – P. 482-493. https://doi.org/10.1080/02670836.1987.11782259.
6. Ненашев А.А. Моделирование и исследование топочно-горелочных процессов энергетических паровых котлов: дис. ... канд. техн. наук. Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2023. – 150 с.
7. Oka Y. Erosion and corrosion behavior of boiler tubes / Y. Oka, Y. Mihara, M. Yamamoto // Wear. – 2005. – Vol. 258. – P. 177-185. https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.09.004.
8. Reed R.C. The Superalloys: Fundamentals and Applications / R.C. Reed // Cambridge: Cambridge University Press. – 2006. – 372 p. https://doi.org/10.1017/CBO9780511541285.
9. Герасимова Н.П. Золовой износ поверхностей нагрева котлоагрегатов / Н.П. Герасимова // iPolytech Journal. – 2020. – Т. 24, № 3(152). – С. 596-605. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-596-605.
10. Modest M.F. Radiative Heat Transfer / M.F. Modest // 3rd ed. Academic Press. – 2013. – 928 p.
11. Role of thermal spray processing method on the microstructure, residual stress and properties of coatings / S. Sampath et al // Surface and Coatings Technology. – 2003. – Vol. 201. – P. 1979-1989. https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.08.023.
12. Hydrophilic modification of expanded polytetrafluoroethylene (ePTFE) by atmospheric pressure glow discharge (APG) treatment / E. Njatawidjaja et al // Surface and Coatings Technology. – 2006. – Т. 201, № 3-4. – P. 699-706. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.12.017.
13. Myung H.S. A study on the synthesis and formation behavior of nanostructured TiN films by copper doping / H.S. Myung, J.G. Han, J.H. Boo // Surface and Coatings Technology. – 2004. – Vol. 177-178. – P. 404-408. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2003.09.016.
14. Jackson R.L. A multi-scale model for contact between rough surfaces / R.L. Jackson, J.L. Streator // Wear. – 2006. – Vol. 261. – No. 11-12. – P. 1337-1347. https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.03.015.
15. Singh S. A review on protection of boiler tube steels with thermal spray coatings from hot corrosion / S. Singh, K. Goyal, R. Bhatia // Materials Today: Proceedings. – 2022. – Vol. 56. – P. 379-383. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.219.
16. Thermal spray coatings on high-temperature oxidation and corrosion applications – A comprehensive review / V. Lakkannavar et al // Results in Surfaces and Interfaces. – 2024. – Vol. 16. – Article 100250. https://doi.org/10.1016/j.rsurfi.2024.100250.
17. High Temperature Corrosion Resistant and Anti-slagging Coatings for Boilers: A Review / K. Khantisopon et al // High Temperature Corrosion of Materials. – 2024. – Vol. 101, Suppl. 1. – P. 1-55. https://doi.org/10.1007/s11085-024-10251-0.

References

1. International Energy Agency. World Energy Outlook 2023. Paris: IEA, 2023. 524 p. (In English).
2. Ministerstvo ehnergetiki Respubliki Kazakhstan. Toplivno-ehnergeticheskii balans Respubliki Kazakhstan. Astana, 2022. – 120 s. (In Russian).
3. Samruk-Energy JSC. Annual Report 2022. Astana, 2023. – 180 p. (In English).
4. Viswanathan R. Damage mechanisms and life assessment of high-temperature components. Materials Park: ASM International. – 1989. – 500 p. https://doi.org/10.31399/asm.tb.dmlahtc.9781627083409. (In English).
5. Stringer J. High temperature corrosion of metals / J. Stringer // Materials Science and Technology. – 1987. – Vol. 3. – P. 482-493. https://doi.org/10.1080/02670836.1987.11782259. (In English).
6. Nenashev A.A. Modelirovanie i issledovanie topochno-gorelochnykh protsessov ehnergeticheskikh parovykh kotlov: dis. ... kand. tekhn. nauk. Krasnoyarsk : Sibirskii federal'nyi universitet, 2023. – 150 s. (In Russian).
7. Oka Y. Erosion and corrosion behavior of boiler tubes / Y. Oka, Y. Mihara, M. Yamamoto // Wear. – 2005. – Vol. 258. – P. 177-185. https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.09.004. (In English).
8. Reed R.C. The Superalloys: Fundamentals and Applications / R.C. Reed // Cambridge: Cambridge University Press. – 2006. – 372 p. https://doi.org/10.1017/CBO9780511541285. (In English).

9. Gerasimova N.P. Zolovoi iznos poverkhnostei nagreva kotloagregatov / N.P. Gerasimova // iPolytech Journal. – 2020. – T. 24, № 3(152). – S. 596-605. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-596-605. (In Russian).
10. Modest M.F. Radiative Heat Transfer / M.F. Modest // 3rd ed. Academic Press. – 2013. – 928 p. (In English).
11. Role of thermal spray processing method on the microstructure, residual stress and properties of coatings / S. Sampath et al // Surface and Coatings Technology. – 2003. – Vol. 201. – P. 1979-1989. https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.08.023. (In English).
12. Hydrophilic modification of expanded polytetrafluoroethylene (ePTFE) by atmospheric pressure glow discharge (APG) treatment / E. Njatawidjaja et al // Surface and Coatings Technology. – 2006. – T. 201, № 3-4. – R. 699-706. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.12.017. (In English).
13. Myung H.S. A study on the synthesis and formation behavior of nanostructured TiN films by copper doping / H.S. Myung, J.G. Han, J.H. Boo // Surface and Coatings Technology. – 2004. – Vol. 177-178. – P. 404-408. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2003.09.016. (In English).
14. Jackson R.L. A multi-scale model for contact between rough surfaces / R.L. Jackson, J.L. Streator // Wear. – 2006. – Vol. 261. – No. 11-12. – P. 1337-1347. https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.03.015. (In English).
15. Singh S. A review on protection of boiler tube steels with thermal spray coatings from hot corrosion / S. Singh, K. Goyal, R. Bhatia // Materials Today: Proceedings. – 2022. – Vol. 56. – P. 379-383. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.219. (In English).
16. Thermal spray coatings on high-temperature oxidation and corrosion applications – A comprehensive review / V. Lakkannavar et al // Results in Surfaces and Interfaces. – 2024. – Vol. 16. – Article 100250. https://doi.org/10.1016/j.rsurfi.2024.100250. (In English).
17. High Temperature Corrosion Resistant and Anti-slagging Coatings for Boilers: A Review / K. Khantisopon et al // High Temperature Corrosion of Materials. – 2024. – Vol. 101, Suppl. 1. – P. 1-55. https://doi.org/10.1007/s11085-024-10251-0. (In English).

Информация о финансировании:

Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP226683418).

М.К. Даутбеков[1], А.Б. Кеңесбеков[2], Т.Т. Төлеубаев[3], А. Мұра[*]
[1]ЖШС «PlasmaScience», 070002, Казақстан, Өскемен қ., Гоголь к., 7г
[2]ЖШС «Институт композиционных материалов»
070002, Казақстан, Өскемен қ., Шакарим, 157
[3]ЖШС «Өскемен ЖЭО», Казақстан ,Өскемен қ., Промышленная к., 2
*e-mail: aibolm02@gmail.com

BKZ-320-140 ҚАЗАНДЫҒЫНЫҢ ҚЫЗДЫРҒЫШ ТҮТІКТЕРІНІҢ ЖЫЛУ КЕДЕРГІСІ МЕН ТЕМПЕРАТУРАЛЫҚ КҮЙІНЕ ЖҰҚА HVOF ЖАБЫНЫНЫҢ CR_3C_2-NICR ӘСЕРІ

Бұл жұмыста HVOF әдісімен алынған Cr_3C_2-NiCr негізіндегі газотермиялық жабындардың БКЗ-320-140 қазан агрегатының экрандық бу қыздырғыш құбырларының жылуфизикалық сипаттамаларына әсері талданды. Қорғаныш жабынның жылуалмасу процестеріне, соның ішінде конвективті және сәулелік жылуалмасуға, сондай-ақ жоғары температуралы түтін газдары әсеріндегі металлдың температуралық күйіне ықпалы қарастырылды. Температуралық өріс ELCUT 6.6 бағдарламалық кешенінде соңғы элементтер әдісі арқылы бейстационарлық режимде есептелді. Модельдеу барысында бу қысымы мен температурасы, ағын жылдамдығы және материалдардың жылуфизикалық қасиеттері ескерілді. Нәтижелер көрсеткендей, жабынның болуы «құбыр қабырғасы – жабын» жүйесінің жалпы жылулық кедергісін аздап арттырады. Сонымен қатар жабынның температуралық режимге және жылу ағынының тығыздығына әсері мардымсыз. Cr_3C_2-NiCr жабындарын қолдану қыздыру беттерінің коррозиялық-эрозиялық төзімділігін арттырып, қазан агрегатының жылутехникалық тиімділігін төмендетпейтіні анықталды нақты өндірістік жағдайларда. Алынған нәтижелер жылу электр станцияларының энергетикалық жабдықтарын жобалау, жаңғырту және оңтайландыру кезінде Қазақстан өнеркәсіптік энергетикасында қолданылуы мүмкін.

Түйін сөздер: *жылу электр станциялары, жылыту беттері, қыздырғыш, жылулық бүрку, детонациялық бүрку, қорғаныс жабындары.*

M.K. Dautbekov[1], A.B. Kengesbekov[2], T.T. Toleubayev[3], A. Mural[*]
[1]PlasmaScience LLP, 070002, Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk, st. Gogol, 7g
[2]Institute of Composite Materials LLP,
070002, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, st. Shakarym Ave. 157
[3]LLP «Ust-Kamenogorsk CHP», Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk, Promyshlennaya St., 2
*e-mail: aibolm02@gmail.com

THE EFFECT OF A THIN CR_3C_2-NICR HVOF COATING ON THE THERMAL RESISTANCE AND TEMPERATURE DISTRIBUTION OF STEAM SUPERHEATER TUBES IN A BKZ-320-140 BOILER

This study analyzes the effect of HVOF-sprayed Cr_3C_2-NiCr coatings on the thermophysical characteristics of superheater tubes of the BKZ-320-140 boiler unit. The influence of the protective coating on heat transfer processes, including convective and radiative heat exchange, as well as on the temperature state of the tube material under high-temperature flue gas conditions, is investigated. The temperature field was calculated using the finite element method in the ELCUT 6.6 software under transient heat transfer conditions. The model incorporates real operating parameters, including steam pressure and temperature, flow velocities, and thermophysical properties of materials. The results show that the presence of the coating leads to a slight increase in the total thermal resistance of the "tube wall–coating" system. However, its effect on the temperature regime and heat flux density is negligible. It is demonstrated that Cr_3C_2-NiCr coatings improve the corrosion and erosion resistance of heating surfaces without significantly reducing the thermal efficiency of the boiler unit under real operating conditions. The obtained results can be applied in design, modernization and optimization of power equipment in industrial energy systems of Kazakhstan.

Key words: *thermal power plants, heating surfaces, steam superheater, gas thermal spraying, detonation spraying, protective coatings.*

Сведения об авторах

Мерхат Курметович Даутбеков – научный сотрудник ТОО «PlasmaScience», Усть-Каменогорск, Казахстан; e-mail: merkhatd@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0203-6050.

Айдар Бақытбекұлы Кеңесбеков – старший научный сотрудник ТОО «Институт композиционных материалов»; e-mail: kenesbekovaidar@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5630-9467.

Тұрар Тұрысбекұлы Төлеубаев – руководитель отдела подготовки ремонтов и перспективного развития ТОО «Усть-Каменогорская ТЭЦ», г. Усть-Каменогорск, Казахстан; e-mail: turar.t.t@mail.ru.

Айбол Мурал* – младший научный сотрудник ТОО «PlasmaScience», Усть-Каменогорск, Казахстан; e-mail: aibolm02@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-8026-1408.

Авторлар туралы мәліметтер

Меруерт Курметұлы Даутбеков – ЖШС «PlasmaScience» ғылыми қызметкері, Өскемен, Қазақстан; e-mail: merkhatd@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0203-6050.

Айдар Бақытбекұлы Кеңесбеков – «Композиттік материалдар институты» ЖШС аға ғылыми қызметкері; e-mail: kenesbekovaidar@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5630-9467.

Тұрар Тұрысбекұлы Төлеубаев – «Өскемен ЖЭО» ЖШС жөндеулерді дайындау және перспективалық даму бөлімінің басшысы, Өскемен, Қазақстан; e-mail: turar.t.t@mail.ru.

Айбол Мурал* – ЖШС «PlasmaScience» кіші ғылыми қызметкері, Өскемен, Қазақстан; e-mail: aibolm02@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-8026-1408.

Information about the authors

Merkhat Kurmetovich Dautbekov – Researcher, PlasmaScience LLP, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; e-mail: merkhatd@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0203-6050.

Aidar Bakytbrkuly Kenesbekov – Senior Researcher, LLP «Institute of Composite Materials»; e-mail: kenesbekovaidar@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5630-9467.

Turar Turysbekuly Toleubaev – Head of the Department of Repair Preparation and Prospective Development, LLP «Ust-Kamenogorsk Combined Heat and Power Plant», Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; e-mail: turar.t.t@mail.ru.

Aibol Mural* – Junior Researcher, PlasmaScience LLP, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; e-mail: aibolm02@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-8026-1408.

Поступила в редакцию 31.03.2026
Поступила после доработки 20.05.2026
Принята к публикации 03.06.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-64

IRSTI: 55.21.99

D.R. Baizhan[1,2], N.E. Berdimuratov[1], N.S. Raisov[1], G.T. Tleubergenova[1]*, N.T. Bimakhan[1]
[1]Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University
070002, Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk, st. Shakarima 148
[2]Shakarim University,
071412, Kazakhstan, Semey, st. Glinka, 20A
*e-mail: gulh77848@gmail.com

IMPROVEMENT OF WEAR RESISTANCE OF BEARING STEEL SHKH15 BY PLASMA HARDENING UNDER DIFFERENT PROCESSING CONDITIONS

Abstract: *This study investigates the effect of plasma hardening under different processing conditions on the microstructure and tribological properties of bearing steel ShKh15. It is shown that plasma treatment, based on localized high-speed heating followed by self-quenching, enables the formation of a hardened surface layer without the use of liquid cooling media. Experimental studies were carried out by varying the plasma arc current (120-140 A) and the flow rate of the plasma-forming gas (0.2-0.25 L/min).The results demonstrate that plasma hardening leads to the formation of a gradient microstructure consisting of martensite, retained austenite, and pearlite, with a smooth transition to the initial pearlitic structure. The maximum microhardness of the hardened layer reaches up to 700 HV with a depth of up to 250 μm. Tribological tests using a ball-on-disk configuration showed that after plasma treatment, the coefficient of friction increases, while the wear rate decreases by 3-3.5 times compared to the initial state. The obtained results indicate a significant improvement in the wear resistance of ShKh15 steel and confirm the effectiveness of plasma hardening as a surface strengthening method.*

Key words: *plasma hardening; ShKh15 steel; surface hardening; wear resistance; tribological properties.*

Introduction

The improvement of the performance characteristics of modern machines is largely determined by the condition of the surface layer of components, since it is in this layer that the main wear processes originate and develop. The problem of increasing the service life of components has both economic and resource-saving significance, as it is associated with the consumption of raw materials and energy resources. For practical application in industrial production, one of the most effective methods is plasma hardening, which is characterized by versatility, accessibility, and high economic efficiency. Plasma hardening is aimed at strengthening the surface layer of iron-carbon alloy components while preserving the initial properties of their internal structure. This process is based on localized high-speed heating of the surface by a plasma arc to temperatures above the critical point, followed by intensive cooling due to heat dissipation into the bulk of the material [1]. Plasma hardening is an effective method of surface strengthening that ensures an increase in wear resistance of components. According to literature data, plasma hardening leads to the formation of a martensitic structure and an increase in microhardness, which positively affects the wear resistance of the material [2]. The main technological parameters of the process are the arc current, the speed of the plasma torch movement, and the characteristics of the heat spot formed by the plasma flow [3]. In this regard, the selection of materials capable of operating effectively under high loads and friction conditions is of particular importance.

Modern mechanical engineering widely uses specialized structural materials, including bearing steels such as ShKh15, which exhibit high hardness and wear resistance [4]. A significant influence on the rolling contact fatigue of bearing steels is exerted by carbide heterogeneity, manifested in the form of carbide networks and stringer-type inclusions. According to studies, the elimination of this defect is achieved through a rational combination of plastic deformation and heat treatment. It has been shown in several works that the improvement of the performance characteristics of ShKh15 steel (analogous to 100Cr6) can be achieved not only through

©D.R. Baizhan, N.E. Berdimuratov, N.S. Raisov, G.T. Tleubergenova, N.T. Bimakhan, 2026

conventional heat treatment but also by modifying the surface layer [5-7]. In particular, the formation of a regular surface microgeometry (in the form of micro-dimples) reduces the coefficient of friction and increases wear resistance. Other studies [8] have shown that cold rolling of 100Cr6 steel rings leads to the formation of a gradient structure and texture, with the maximum degree of deformation observed near the inner diameter. According to literature data, during plasma treatment a dendritic-cellular structure is formed in the remelted zone, and the microhardness may reach up to 840 $HV_{0.1}$ depending on the treatment conditions. Optimization of processing parameters makes it possible to increase the microhardness up to 1400 HV. In a number of studies devoted to plasma nitrocarburizing of DIN 100Cr6 steel, it has been shown that the diffusion of nitrogen and carbon contributes to the formation of a hardened surface layer consisting of γ′-Fe_4N and ε-$Fe_{2-3}N$ phases, which leads to improved wear resistance. It has been established that the treatment temperature and the composition of the gas medium (in particular, CH_4 content) have a significant influence on the morphology of the compound layer and its properties. However, these studies are mainly focused on thermochemical saturation processes and do not consider the features of structure and property formation during plasma hardening based on localized high-speed heating and self-quenching. In particular, the influence of plasma hardening parameters on the formation of a gradient structure and its effect on the tribological properties of ShKh15 steel remains insufficiently studied [8]. Thus, the aim of this work is to investigate the effect of plasma hardening under different processing conditions on the structure, wear resistance, and properties of the surface layer of ShKh15 bearing steel.

Materials and methods

The object of the study was bearing steel ShKh15 (analogous to 100Cr6), the chemical composition of which is presented in Table 1. The preparation of metallographic specimens included sequential grinding with abrasive papers of various grit sizes followed by polishing to a mirror finish.

Table 1 – Chemical composition of ShKh15 steel according to GOST 801-2022 [9]

Steel Name	C	Cr	Mn	Si
Content (wt.%)	0.95-1.05	1.30-1.65	0.20-0.40	0.17-0.37

Plasma hardening was carried out using the UDGZ-200 installation, which provides local heating of the surface without the use of liquid cooling media. For each plasma hardening mode, three samples were studied to ensure the reliability and reproducibility of the experimental results. The samples were made from a 40 mm diameter ShKh15 steel rod, with the thickness of the test samples being 20 mm. Plasma hardening was carried out using a conical electrode and a ceramic nozzle with a diameter of 9 mm. The treatment was performed at a plasma arc current of 120-140 A, an argon plasma-forming gas flow rate of 0.2-0.25 L/min, an arc length of 18 mm, and a linear plasma torch travel speed of 35-45 mm/s. The movement of the plasma torch during processing was performed manually. The main plasma hardening parameters are presented in Table 2. Plasma hardening was carried out under the following conditions: arc current of 120-140 A and argon plasma gas flow rate of 0.2-0.25 l / min. It should be noted that in processing modes R1 and R2, the plasma arc current and argon flow rate were simultaneously varied to ensure stable plasma torch operation and process stability under increased energy conditions. Therefore, the obtained results reflect the combined influence of the processing parameters on the microstructure, microhardness, and wear resistance of the treated surface layer.

Table 2 – Plasma hardening parameters for ShKh15 steel processing modes

Processing mode	Plasma arc current, A	Argon flow rate, L/min	Arc length, mm	Plasma torch travel speed, mm/s	Nozzle diameter, mm	Depth of the hardened layer, μm
R1	120	0.20	15-20	35-45	9	370
R2	140	0.25	15-20	35-45	9	250

Metallographic examination of the ShKh15 bearing steel samples was carried out using a scanning electron microscope (SEM) SM3200 in backscattered electron (BSE) mode, which made it possible to obtain detailed information on the distribution of structural constituents before and after plasma treatment. The preparation of metallographic specimens included etching in a 4% nitric acid (HNO_3) solution in ethanol.

The phase composition of the investigated ShKh15 steel was determined by X-ray diffraction (XRD) using an X'Pert PRO diffractometer with CuKα radiation. The diffraction patterns were recorded under the following conditions: accelerating voltage – 40 kV, tube current – 30 mA, exposure time – 0.25 s, and scanning step – 0.02°. The diffraction data were processed using HighScore software and the PDF-2 database, ensuring reliable phase identification. Additionally, quantitative phase analysis was performed using PowderCell software.

Microhardness measurements were performed using the Vickers method under a load of 0.98 N (100 g) with a Metolab 502 microhardness tester. Measurements were carried out on the cross-section of the samples to determine the hardness distribution over the depth of the hardened layer.

Tribological tests were conducted using a ball-on-disk configuration in accordance with ASTM G99, employing a TRB3 tribometer under dry friction conditions. The test parameters were as follows: normal load – 6 N, sliding speed – 3 cm/s, sliding distance – 100 m, and wear track radius – 2 mm. During the experiments, the dependence of the coefficient of friction on the sliding distance was recorded, and the wear resistance of the material was evaluated. To ensure the reliability of the obtained experimental data, all measurements were performed at least three times, after which the average values of the results were calculated.

After the tribological tests, the wear track area was determined by contact profilometry in accordance with ISO 13565 using a TAYLOR HOBSON SURTRONIC S-100 SERIES profilometer. Based on the obtained experimental data, the wear rate of the investigated ShKh15 steel samples was calculated using the TRB3 tribometer software.

Results and discussion

The high microhardness values in the surface layer are associated with the formation of a martensitic structure after plasma hardening. The presence of retained austenite and pearlitic constituents in the transition zone leads to a gradual decrease in microhardness with increasing distance from the treated surface. Thus, the microhardness distribution is in good agreement with the nature of the structural transformations in the hardened layer. Figure 1 shows the microstructure of the cross-section of bearing steel ShKh15 (GOST 801-2022), formed under different plasma hardening conditions corresponding to regimes R1 and R2, which differ in plasma arc current (120 and 140 A) and plasma-forming gas flow rate (0.2 and 0.25 L/min). The initial microstructure of the steel (Fig. 1c) is represented by granular pearlite consisting of a ferritic matrix and globular cementite. It should be noted that such a pearlitic morphology provides higher strength characteristics compared to pearlite with a network distribution of cementite at the same chemical composition.

After plasma hardening under both processing conditions (R1 and R2), no clearly defined boundary between structural zones is observed. A gradient structure is formed, characterized by a gradual transition from the hardened surface layer, represented by martensite, to the initial pearlitic structure in the bulk of the material (Fig. 1a, b).

For regime R1 (I = 120 A; VAr = 0.2 L/min), the formation of a medium-acicular martensitic structure is typical. The transition zone is represented by a complex phase mixture including martensite, retained austenite, and pearlite, which is attributed to the incomplete phase transformations under conditions of high-speed heating and cooling. It is known that surface hardening processes are accompanied by a self-tempering effect, resulting in the formation of fine-grained tempered martensite. This effect is associated with high temperature gradients and specific heat dissipation conditions in the hardened layer.

With an increase in processing energy parameters (regime R2: I = 140 A; VAr = 0.25 L/min), an increase in the thickness of the so-called "white etching zones" is observed. Their formation is associated with local near-surface re-austenitization caused by high heating rates, which leads to the formation of fine-dispersed tempered martensite not revealed by conventional etching. The microstructure of the transition zone under regime R2 is characterized by a combination of martensite, pearlite, and retained austenite, indicating the complex nature of phase transformations and the formation of a gradient structure of the hardened layer.

Figure 2 shows the distribution of microhardness over the depth of the hardened layer of bearing steel ShKh15 after plasma hardening under different processing conditions (R1 and R2). The measurement error for the obtained microhardness and wear rate values did not exceed 5% of the average value, confirming the reliability and reproducibility of the experimental results.

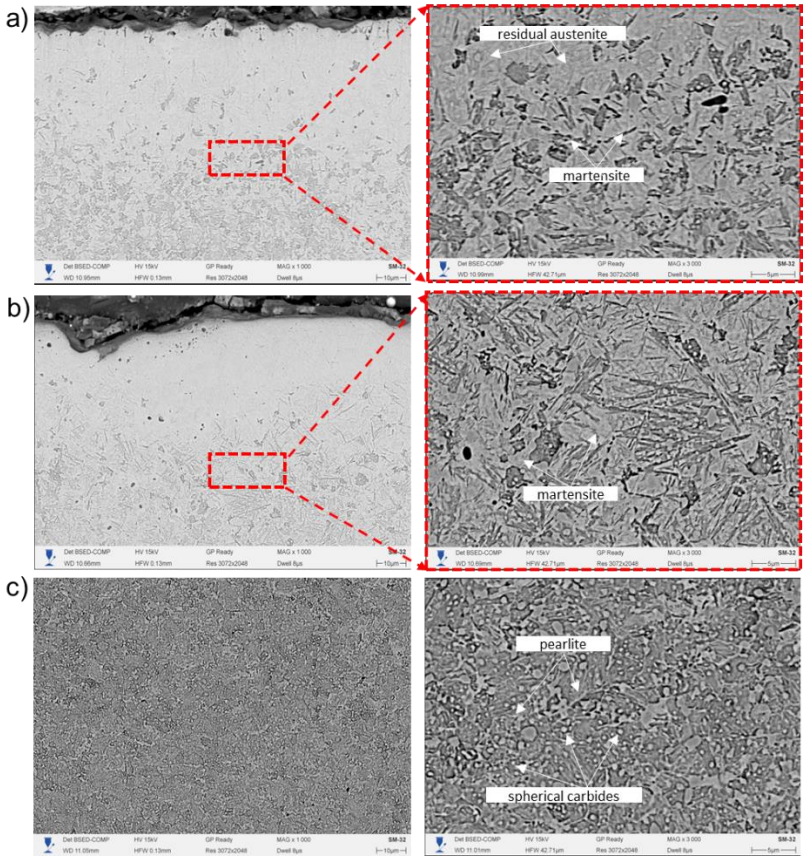


Figure 1 – Microstructure of the cross-section of ShKh15 steel in the initial state and after plasma hardening under different processing conditions:
a – regime R1 (I = 120 A; VAr = 0.2 L/min); b – regime R2 (I = 140 A; VAr = 0.25 L/min); c – initial microstructure

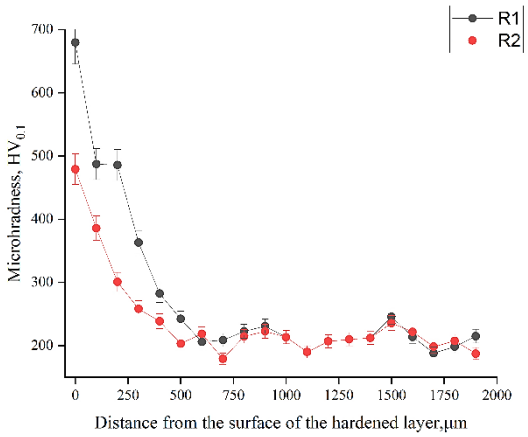


Figure 2 – Microhardness distribution over the depth of the hardened layer of ShKh15 steel after plasma hardening under different processing conditions (R1 and R2)

The obtained results demonstrate a good correlation between the variation of microhardness and the structural transformations occurring in the surface layer of the material. According to the data, for regime R1 (I = 120 A; VAr = 0.2 L/min), increased microhardness values reaching about 500 HV0.1 are maintained up to a depth of ~250 μm, indicating the formation of a hardened martensitic structure in the near-surface region. In the transition zone, located between the hardened layer and the heat-affected zone, a gradual decrease in microhardness from ~500 HV0.1 to values of about 200 HV0.1 corresponding to the initial state of ShKh15 steel is observed. This distribution indicates a gradient structural transformation and a gradual decrease in the martensite fraction with increasing depth. Relatively lower microhardness values in certain areas of the hardened layer may be attributed to insufficient heating temperature or low cooling intensity. Under underheating

conditions (insufficient hardening temperature or short holding time), incomplete dissolution of carbon in austenite occurs, leading to reduced hardness of the formed martensite. In addition, at insufficient cooling rates, pearlitic transformation products and retained austenite may form in the structure, both having lower hardness compared to martensite, which negatively affects the microhardness level of the hardened layer [10]. According to the results reported in [11], ShKh15 steel after conventional heat treatment can achieve high hardness, especially at cooling rates above 30°C/s. At a cooling rate of about 100 °C/s, the hardness reaches approximately 700 HV, which is associated with the formation of martensite and retained austenite.

The high microhardness values in the surface layer are associated with the formation of a martensitic structure after plasma hardening. In the transition zone, the presence of retained austenite and pearlitic constituents leads to a gradual decrease in microhardness with increasing distance from the treated surface. Figure 3 shows the diffraction patterns of ShKh15 steel in the initial state and after plasma hardening under different processing conditions (R1 and R2). Analysis of the diffraction spectra indicates that after hardening, the steel structure exhibits pronounced peaks corresponding to retained austenite (γ-Fe), as well as reflections of the martensitic phase (α′-Fe) [12]. This confirms the formation of a hardened layer consisting of martensite with a noticeable fraction of retained austenite. In the initial state, ShKh15 steel is characterized by a ferrite–pearlite structure. The obtained phase analysis results are in good agreement with the microstructural data, confirming the nature of structural transformations during plasma treatment.

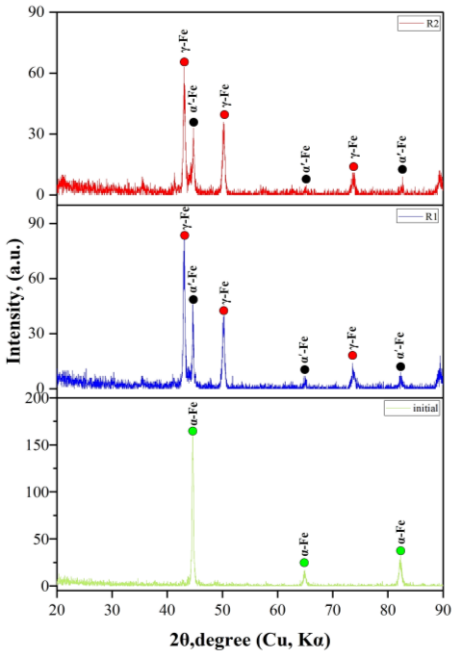


Figure 3 – Diffraction patterns of ShKh15 steel in the initial state and after plasma hardening under processing conditions R1 and R2

Quantitative XRD analysis results are presented in Table 3. The treated surface layers predominantly consist of γ-Fe (retained austenite) with a smaller fraction of α-Fe (martensitic/ferritic phase). For sample R1, the phase fractions were 92.4 wt.% γ-Fe and 7.6 wt.% α-Fe, whereas sample R2 contained 86.1 wt.% γ-Fe and 13.9 wt.% α-Fe. The refined lattice parameters were 3.5980-3.6046 Å for γ-Fe and 2.8612-2.8653 Å for α-Fe.

Table 3 – Quantitative phase composition and lattice parameters of the treated surface layers based on X-ray diffraction analysis

Sample	Detected phases	Phase content, wt.%	Lattice parameters, Å
R1	α-Fe (martensitic/ferritic phase)	7.6	a = 2.8653
	γ-Fe (retained austenite)	92.4	a = 3.5980
R2	α-Fe (martensitic/ferritic phase)	13.9	a = 2.8612
	γ-Fe (retained austenite)	86.1	a = 3.6046

Figure 4a shows the dependences of the coefficient of friction on the sliding distance, as well as the wear rate values of ShKh15 steel in the initial state and after plasma hardening under regimes R1 and R2. As can be seen from the graph, the coefficient of friction for the initial sample is characterized by pronounced instability at the initial stage of testing, followed by stabilization at a level of ~0.5-0.55. This behavior is associated with the formation of a contact layer and the gradual smoothing of the friction surfaces [13]. After plasma hardening, an increase in the coefficient of friction is observed: for regime R1, it stabilizes at ~0.70-0.75, while for regime R2 it is in the range of ~0.65-0.70. It should also be noted that the treated samples exhibit higher stability of the coefficient of friction compared to the initial state, indicating the formation of a more uniform and wear-resistant surface layer [14].

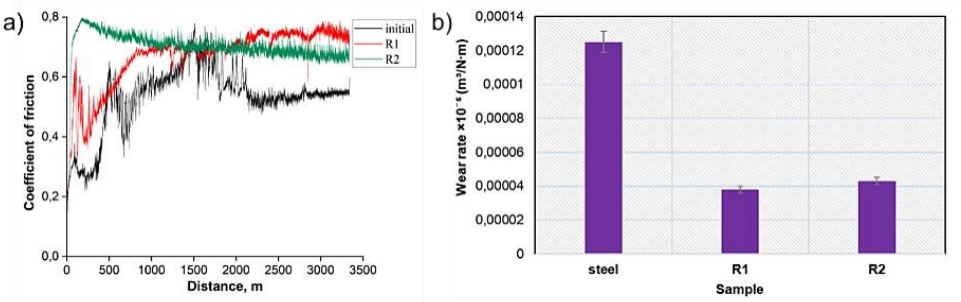


Figure 4 – Dependence of the coefficient of friction and wear rate of ShKh15 steel in the initial state and after plasma hardening: a) coefficient of friction vs. sliding distance; b) wear rate

As shown in Figure 4, the wear rate of the initial steel is about $(1.25 \pm 0.06) \times 10^{-4}$ mm³/(N·m). After plasma hardening, this value significantly decreases to $(3.7 \pm 0.2) \times 10^{-5}$ mm³/(N·m) for regime R1 and $(4.2 \pm 0.2) \times 10^{-5}$ mm³/(N·m) for regime R2. Thus, the wear rate is reduced by approximately 3.4 times for regime R1 and 3 times for regime R2 (Fig. 4b). The improvement in wear resistance is attributed to the formation of a hardened martensitic layer with high hardness and resistance to plastic deformation, which reduces the rate of material removal during friction. At the same time, according to literature data, the development of residual stresses and stress concentration near inclusions may promote microcrack formation and influence the wear mechanism [15]. The main results of plasma hardening of ShKh15 steel under different processing regimes are summarized in Table 4.

Table 4 – Summary of the main results of plasma hardening of ShKh15 steel

Processing mode	Hardened layer depth, μm	Maximum microhardness, HV0.1	Surface microhardness, HV0.1	Coefficient of friction	Wear rate, mm³/(N·m)
Initial state	-	~200	~200	0.50-0.55	$(1.25 \pm 0.06) \times 10^{-4}$
R1 (120 A; 0.20 L/min)	200-250	679.4 ± 34.0	281.4 ± 14.1	0.70-0.75	$(3.7 \pm 0.2) \times 10^{-5}$
R2 (140 A; 0.25 L/min)	200-250	479.1 ± 24.0	240.3 ± 12.0	0.65-0.70	$(4.2 \pm 0.2) \times 10^{-5}$

Conclusion

As a result of the conducted studies, it was established that plasma hardening has a significant effect on the microstructure, microhardness, and tribological properties of ShKh15 steel. The maximum microhardness of the hardened layer, reaching approximately 679.4 ± 34.0 HV, was observed under the R1 mode (I = 120 A, VAr = 0.20 L/min), which is associated with the formation of a martensitic structure in the hardened surface layer. At the same time, the minimum wear rate was recorded under the R1 mode (I = 120 A, VAr = 0.20 L/min), where the wear intensity decreased by approximately 3–3.5 times compared to the initial state. The obtained results confirm the effectiveness of plasma hardening as a method for improving the wear resistance and operational properties of ShKh15 steel.

Acknowledgment

The authors express their gratitude to Ph.D., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Standardization, Metrology and Certification of S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Alexander Alexandrovich Gulyarenko, for consultation and assistance in conducting this research.

References

1. Safonov E.N. Plasma hardening of machine parts / E.N. Safonov. – Moscow; Berlin: Direct-Media, 2014. – 165 p.
2. Modification of the surface of 40Kh steel by electrolytic plasma hardening / Z. Sagdoldina et al // Metals. – 2022. – Vol. 12, № 12. – P. 2071.
3. Kuznetsov V.P. Friction surface hardening of steels using a rotating tool / V.P. Kuznetsov, V.V. Voropaev, A.S. Skorobogatov. – Ekaterinburg: Ural University Press, 2022. – 110 p.
4. Estimation of the influence of heat treatment modes using negative temperatures on the mechanical properties of ShKh15 steel / S.A. Zemlyakov et al // Part I: The influence of heat treatment modes on hardness, strength and toughness // Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedenia. – 2024. – Vol. 21, № 1. – P. 82-90.
5. Brover G.I. Surface hardening by concentrated energy flows / G.I. Brover, A.V. Brover. – Rostov-on-Don: Don State Technical University, 2014.
6. Special steels / E.V. Bratkovsky et al. – Novotroitsk: NF NITU MISIS, 2013. – 87 p.
7. Bochnowski W. The influence of arc plasma treatment on the structure and microhardness of 100Cr6 bearing steel // Archives of Foundry Engineering. – 2010. – Vol. 10. – P. 19-22.
8. Tribological behaviour of microindented 100Cr6 steel surfaces in dry contact conditions / P. Guglielmi et al // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2024. – Vol. 133. – № 5. – P. 2381-2400.
9. ГОСТ 801-2022. Rolled products of bearing steel. Technical specifications. – Moscow: Russian Institute of Standardization, 2023. – 23 p.
10. Plasma immersion ion implantation of 100Cr6 ball bearing steel / C. Blawert et al // Surface and Coatings Technology. – 1996. – Vol. 83, № 1-3. – P. 228-234.
11. Barrow A.T.W. The ε→η→θ transition in 100Cr6 and its effect on mechanical properties / A.T.W. Barrow, J.-H. Kang, P.E.J. Rivera-Díaz-del-Castillo // Acta Materialia. – 2012. – Vol. 60, № 6-7. – P. 2805-2815.
12. Kang J.-H. Rolling contact fatigue in martensitic 100Cr6: Subsurface hardening and crack formation / J.-H. Kang, R.H. Vegter, P.E.J. Rivera-Díaz-del-Castillo // Materials Science and Engineering A. – 2014. – Vol. 607. – P. 328-333.
13. Rapidly quenched materials and coatings: Proceedings of the 20th International Scientific and Technical Conference, October 17-18, 2023, MAI. – Moscow: Probel-2000, 2023. – 372 p.
14. The analysis of structure change and tribomechanical properties of alloyed steel surfaces modified by diffusion electrolyte-plasma boriding method / L.G. Sulyubayeva et al // Bulletin of the Karaganda University. Physics Series. – 2025. – Vol. 1, № 117. – P. 68-76.
15. Application of electrolyte based on sodium carbonate for electrolyte-plasma surface hardening of Steel 45 / B. Rakhadilov et al // Bulletin of Shakarim University. Technical Sciences Series. – 2024. – Vol. 3, № 15. – P. 414-424.

Funding

This research was funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. BR24992876).

Д.Р. Байжан[1,2], Н.Е. Бердімуратов[1], Н.С. Райсов[1], Г.Т. Тлеубергенова[1]*, Н.Т. Бимахан[1]

[1]Сәрсен Аманжолов Шығыс Қазақстан ениверситеті,
070002, Қазақстан, Өскемен, Шәкәрім к-сі 148
[2]Шәкәрім университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинка көшесі, 20А
*e-mail: gulh77848@gmail.com

ӘРТҮРЛІ ӨҢДЕУ РЕЖИМДЕРІНДЕ ПЛАЗМАЛЫҚ ШЫНЫҚТЫРУ ӘДІСІ АРҚЫЛЫ ШХ15 МОЙЫНТІРЕКТІК БОЛАТЫНЫҢ ТОЗУҒА ТӨЗІМДІЛІГІН АРТТЫРУ

Бұл жұмыста әртүрлі өңдеу шарттарындағы плазмалық шынықтырудың ШХ15 мойынтіректік болатының микроқұрылымы мен трибологиялық қасиеттеріне әсері зерттелді. Жергілікті жоғары жылдамдықты қыздыруға және кейінгі өздігінен шынығуға негізделген плазмалық өңдеу сұйық салқындатқыш орталарды қолданбай-ақ беріктендірілген беткі қабаттың қалыптасуын қамтамасыз ететіні көрсетілді. Эксперименттік зерттеулер плазмалық доға тогын (120-140 А) және плазма түзуші газ шығынын (0,2-0,25 л/мин) өзгерту арқылы жүргізілді. Алынған нәтижелер плазмалық шынықтырудың мартенситтен, қалдық аустениттен және перлиттен тұратын градиентті микроқұрылымның қалыптасуына алып келетінін, сонымен қатар оның бастапқы перлиттік құрылымға біртіндеп ауысатынын көрсетті. Беріктендірілген қабаттың максималды микрокаттылығы 250 мкм тереңдікке дейін 700 HV мәніне жетеді. «Шар-диск» сұлбасы бойынша жүргізілген трибологиялық сынақтар плазмалық өңдеуден кейін үйкеліс коэффициентінің артатынын, ал тозу жылдамдығының бастапқы күймен салыстырғанда 3-3,5 есе төмендейтінін көрсетті. Алынған нәтижелер ШХ15 болатының тозуға төзімділігінің едәуір артқанын дәлелдейді және плазмалық шынықтырудың бетті беріктендіру әдісі ретінде тиімділігін растайды.

Түйін сөздер: *плазмалық шынықтыру; ШХ15 болаты; беттік беріктендіру; тозуға төзімділік; трибологиялық қасиеттер.*

Д.Р. Байжан[1,2], Н.Е. Бердімуратов[1], Н.С. Райсов[1], Г.Т. Тлеубергенова[1]*, Н.Т. Бимахан[1]

[1]Сарсен Аманжолов Восточно-Казахстанский Университет
070002, Казахстан, Усть-Каменогорск, ул. Шакарима, 148
[2]Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20А
*e-mail: gulh77848@gmail.com

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПОДШИПНИКОВОЙ СТАЛИ ШХ15 МЕТОДОМ ПЛАЗМЕННОЙ ЗАКАЛКИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ОБРАБОТКИ

В данной работе исследовано влияние плазменного упрочнения при различных условиях обработки на микроструктуру и трибологические свойства подшипниковой стали ШХ15. Показано, что плазменная обработка, основанная на локализованном высокоскоростном нагреве с последующей самозакалкой, обеспечивает формирование упрочнённого поверхностного слоя без применения жидких охлаждающих сред. Экспериментальные исследования проводились при варьировании тока плазменной дуги (120-140 А) и расхода плазмообразующего газа (0,2-0,25 л/мин). Полученные результаты показывают, что плазменная закалка приводит к формированию градиентной микроструктуры, состоящей из мартенсита, остаточного аустенита и перлита, с плавным переходом к исходной перлитной структуре. Максимальная микротвёрдость упрочнённого слоя достигает 700 HV при глубине до 250 мкм. Трибологические испытания по схеме «шарик-диск» показали, что после плазменной обработки коэффициент трения увеличивается, тогда как скорость износа снижается в 3-3,5 раза по сравнению с исходным состоянием. Полученные результаты свидетельствуют о значительном повышении износостойкости стали ШХ15 и подтверждают эффективность плазменного упрочнения как метода поверхностного упрочнения.

Ключевые слова: *плазменная закалка; сталь ШХ15; поверхностное упрочнение; износостойкость; трибологические свойства.*

Received 05.04.2026
Revised 15.05.2026
Accepted 03.06.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-65

IRSTI: 61.65.31

A.N. Dyuryagina[1], T.V. Shirina[1], Yu.S. Byzova[1]*, A.A. Lutsenko[2]
[1]Manash Kozybayev North Kazakhstan University
150000, Kazakhstan, Petropavlovsk, Pushkin str., 86
[2]Abay Myrzakhmetov Kokshetau University, Kokshetau
020000, Kazakhstan, Auezova str. 189a
*e-mail: yuliyabyzovva@gmail.com

MODIFICATION OF FILM-FORMING MATERIALS FOR WATER-BASED PAINT AND VARNISH COMPOSITES

Abstract: *Waterborne paint and coating composites are finding increasingly broad application in construction, industry, and everyday use. This shift is largely motivated by environmental goals – lowering organic solvent emissions – and by cost advantages, since water is both less expensive and more widely available than organic solvents.At the same time, the key task remains to increase the barrier and mechanical characteristics of water-based coatings while maintaining the processability of application and rapid curing.Two main approaches are employed to modify water-dispersible systems: chemical modification of polymer binders and polymer blending. It has been shown that targeted tailoring of the polyurethane soft/hard segment structure, as well as the incorporation of an acrylate component and functional additives (plasticizers, nanofillers), enables control over the degree of crosslinking and phase distribution, thereby improving coating adhesion, abrasion resistance, and barrier properties. Among modified waterborne systems, polyurethane and acrylic-polyurethane coatings are of particular interest, as discussed in this article, owing to their unique combination of properties. These systems provide high coating durability and a wide range of applications, including protective and decorative coatings for various substrates. Special attention is given to methods for their modification. The promise of polyurethane and acrylic-polyurethane waterborne coatings for anticorrosion protection is highlighted, along with the need to tailor formulations to specific service conditions.*

Key words: *waterborne paint, composites, modified waterborne systems, polyurethane, acrylic-polyurethane, polymer blending.*

1 Introduction

Delivering reliable corrosion protection for metal structures under aggressive conditions remains a critical scientific and engineering task, as it directly affects service-life extension and more efficient use of materials and resources. [1]. Corrosion-induced degradation of steel and other structural metals leads not only to direct economic losses associated with repair, replacement, and downtime, but also to broader technological and environmental consequences, including reduced operational reliability and increased material consumption over the entire life cycle of engineering systems [2, 3]. For this reason, the development of durable protective coatings is increasingly regarded not merely as a maintenance measure, but as a strategic approach to improving infrastructure sustainability and reducing the total cost of ownership of metallic assets [4]. The application of protective paint and coating systems continues to be the most widely used approach to anticorrosion protection of metals, exceeding in prevalence and versatility many alternative surface-protection methods (e.g., thermal spraying, electroplating, passivation) [1, 5]. This widespread use is explained by the relative processability of coating technologies**,** the possibility of applying coatings to structures of complex geometry, and the flexibility of tailoring coating formulations for specific service environments. In addition, paint and coating systems can simultaneously perform protective, decorative, and, in some cases, functional roles, which further increases their industrial relevance in construction, transport, machinery, and infrastructure sectors

©A.N. Dyuryagina, T.V. Shirina, Yu.S. Byzova, A.A. Lutsenko, 2026

[1, 6]. Such coatings primarily perform a barrier function by limiting contact between the metallic substrate and the corrosive medium [1, 5]. The effectiveness of this barrier depends on the continuity, density, adhesion, and physicochemical stability of the coating film, as even minor structural defects such as pores, microcracks, or interfacial heterogeneities may accelerate the ingress of water, oxygen, and aggressive ions to the metal surface. Accordingly, modern research in protective coatings is focused not only on the nominal chemical composition of the binder, but also on the mechanisms of film formation and the resulting microstructure of the cured coating [4, 6].

Current technology trends in metal protection are focused on upgrading these coating systems by shifting from solvent-borne composites to environmentally benign water-reducible (waterborne) coatings, driven by the need to reduce volatile organic compound (VOC) emissions and improve occupational and environmental safety [7, 8, 9]. This transition is also aligned with increasingly stringent environmental regulations and with the broader industrial agenda of developing safer and more sustainable materials technologies. Compared with conventional solvent-borne systems, waterborne coatings offer important practical advantages, including lower fire hazard, reduced toxicity during application, easier handling, and lower emissions of hazardous organic vapors into the workplace atmosphere. These features make waterborne technologies particularly attractive for large-scale industrial use, especially in contexts where environmental compliance and worker safety have become decisive criteria in material selection [10, 11, 12].

However, despite their undeniable environmental advantages, state-of-the-art waterborne paint and coating systems still underperform compared with solvent-borne counterparts in terms of anticorrosion efficiency, surface hardness, mechanical strength (tensile and impact), and coating drying time. This gap is commonly attributed to the comparatively limited film-forming ability of waterborne binders, which promotes defect-prone film microstructures and, consequently, weaker barrier (isolating) performance. [13, 14, 15]. The presence of residual hydrophilic groups, insufficient particle coalescence, and enhanced sensitivity of the forming film to drying conditions often result in coatings with higher permeability to moisture and corrosive species. As a result, the key challenge in the design of advanced waterborne anticorrosion materials is to reconcile environmental compatibility with the dense, defect-minimized film structure required for long-term protective performance [4, 16, 17].

Recent studies therefore place considerable emphasis on the modification of film-forming binders as a rational route to improving the performance of waterborne coating systems. Such modification may be achieved either by chemical approaches, involving the incorporation of reactive functional groups or the synthesis of hybrid macromolecular architectures, or by physical blending with other polymers and oligomers capable of altering intermolecular interactions, phase morphology, and film-packing density [18, 19, 20]. In both cases, the ultimate objective is to enhance the barrier properties, mechanical integrity, adhesion strength, and resistance of the coating to water and aggressive media without compromising the ecological advantages of waterborne formulations. Among the different classes of modified waterborne binders, polyurethane and acrylic–polyurethane systems are of particular interest because they combine good mechanical performance, elasticity, abrasion resistance, and the possibility of targeted structural tuning. At the same time, these systems remain highly relevant for corrosion-protection applications, since their properties can be adjusted through variation of segment composition, crosslink density, particle morphology, and interfacial interactions within the coating matrix [21, 22].

In this context, special attention has been given to acrylic–polyurethane hybrid materials and blends, which are capable of integrating the favorable attributes of both components: the hardness, weather resistance, and pigment compatibility of acrylics, together with the toughness, flexibility, and adhesion of polyurethanes. Such hybridization may contribute to the formation of more compact and structurally balanced coatings with improved resistance to crack formation, mechanical damage, and diffusion transport of corrosive agents. Therefore, the study of modified waterborne polyurethane and acrylic–polyurethane film-forming systems is an important and promising direction for the development of next-generation anticorrosion coatings for metal substrates operating under aggressive service conditions.

2 Approaches to modification of film-forming agents and focus on PU/acrylic-PU systems

Recent studies [13, 20, 23, 24] indicate that film-former modification is generally implemented either via chemical routes or by blending with other polymers (oligomers). Numerous investigations

[25-30] have reported the use of key functional agents – carboxyl and acetoacetyl groups, activated amines, acetals, polyalkoxysilanes and their derivatives, as well as isocyanate-containing compounds – for chemical modification of binders, resulting in enhanced film-forming capability.

In contrast to chemical modification, blending does not proceed through chemical pathways but rather through transformations governed at the level of intermolecular interactions; it leads to the formation of a new stable system that differs from the original constituents in spatial organization, rheological behavior, and structural-mechanical properties. The use of polymers to modify aqueous film formers is associated with the presence of heteroatom-containing polar moieties within their chains – urethane (–NH–C(O)–O–), ether (–O–), ester (–C(O)–O–), urea (–NH–C(O)–), and amide (–NH–C(O)–) groups-capable of associating into stable intermolecular structures through physical interactions (predominantly hydrogen bonding) [13, 27, 28-35].

Among the established development routes for water-dilutable (waterborne) coating materials is the modification of aqueous dispersions of polymers and copolymers to create multicomponent systems, including styrene-acrylate, acrylic, vinyl-acrylic, styrene-butadiene, vinyl acetate-ethylene (VAE), acrylic-polyurethane, methacrylate and styrene-acrylonitrile compositions [13, 36].

In recent years, polyurethane and acrylic–polyurethane (PU/acrylic) systems have become the most widely adopted within this family, largely because they combine high mechanical strength and elasticity with improved abrasion and chemical resistance, while enabling stable aqueous dispersions with low volatile organic compound (VOC) content [25, 35, 36]. In addition, their performance can be purposefully tuned by adjusting formulation variables and, critically, by engineering polymer-particle composition and morphology (e.g., core-shell vs. semi-IPN architectures) [2, 37, 38]. Nevertheless, due to the presence of hydrophilic carboxyl/carboxylate groups used for dispersion stabilization and the generally high surface energy of these binders, the materials remain prone to water uptake. Consequently, coatings based on (meth)acrylic resins may exhibit limited water and corrosion resistance, insufficient mechanical robustness and wear resistance, and a comparatively high minimum film-formation temperature (MFFT), among other shortcomings [39, 40].

In summary, the enhancement of the service performance of waterborne polyurethane and acrylic-polyurethane coatings is achieved through the incorporation of functional groups, the formation of hybrid networks, or the use of active nanoscale fillers. These modifications make it possible to purposefully tailor the adhesion strength and corrosion resistance of the resulting films. A summary of modification approaches and their effects on coating properties is presented below in Table 1.

Table 1 – Summary of modification methods for waterborne polyurethane and acrylic-polyurethane coatings and their impact on anticorrosion behavior and physicochemical characteristics

Modification type	Modification method	Effect on anticorrosion and physicochemical properties
Chemical (intrachain)	Incorporation of functional organosilicon compounds (silanes)	Increases coating hydrophobicity and enhances adhesion to the metallic substrate through the formation of Si-O-Metal bonds
Chemical (crosslinking)	External crosslinking with blocked isocyanates or carbodiimides	Promotes the formation of a dense three-dimensional network, thereby reducing the diffusion coefficient of water and aggressive ions (Cl^-, SO_4^{2-})
Hybrid synthesis	Formation of acrylic–polyurethane interpenetrating polymer networks (IPN)	Produces a synergistic effect by combining the chemical resistance of polyurethane with the weather resistance of acrylics, while suppressing microphase separation of the components
Nanocomposite	Modification with layered silicates (nanoclays) or graphene	Creates a “tortuous path” for water molecules, significantly improving the barrier properties of the coating
Active (pigment-based)	Incorporation of nanosized zinc phosphates or modified tripolyphosphates	Provides electrochemical protection and promotes passivation of the metal surface at coating defects
Inhibitor-based	Encapsulation of organic corrosion inhibitors within the polymer matrix	Enables controlled release of active species upon film damage, resulting in «self-healing» coating behavior

The analysis of the data presented in Table 1 confirms that achieving high service performance in waterborne polyurethane and acrylic–polyurethane systems is not possible without profound chemical or compositional modification. Of particular importance is the formation of hybrid acrylic-polyurethane structures, which exhibit a synergistic effect by combining the mechanical strength of polyurethane with the high hydrophobicity of acrylic polymers [41]. Chemical cross-linking remains one of the most effective tools for reducing the free volume of the polymer matrix, which is critical for blocking the diffusion of corrosion-active agents [42]. The incorporation of organosilicon fragments (silanes) makes it possible not only to strengthen the adhesive contact with the metallic substrate, but also to ensure the long-term stability of the phase boundary under high-humidity conditions [43]. The use of nanoscale fillers, such as graphene or modified silicates, creates a tortuous-path effect, significantly enhancing the barrier resistance of the coatings [44]. Modern studies also indicate the promise of corrosion-inhibitor encapsulation, which enables the implementation of the concept of “smart” self-healing coatings [45]. It should be noted that the effectiveness of active pigments in waterborne systems directly depends on their surface modification, which prevents premature coagulation of the dispersion [46]. The combination of physical and chemical modification methods makes it possible to obtain waterborne coating materials whose protective properties are comparable to those of conventional solvent-based systems [47]. At the same time, a critical factor remains the control of core-shell particle morphology, which determines the uniformity of film formation [48]. Further development of this field is associated with the design of biomimetic and environmentally safe modifiers capable of minimizing the content of volatile organic compounds [49, 50]. Thus, an integrated approach to the modification of polyurethane dispersions opens broad opportunities for the development of next-generation anticorrosion coatings with a targeted set of properties.

3 Design of anticorrosive coatings via polyurethanes, urethane acrylates, IPN networks, and blends

Polyurethanes are not a single “specific” polymer but a whole family of materials obtained by reacting isocyanate compounds (di- or polyisocyanates) with polyol components. Owing to the flexibility in selecting starting reagents and formulations, the term “polyurethanes” covers a wide variety of polymers with different structures and properties. What unites them is a common structural feature: the presence of urethane linkages (–NHCOO–) in the macromolecular chain, and, in the case of polyurethane-ureas, additional urea fragments (–NHCONH–). To obtain polyurethanes, a three-component set of precursors is typically employed: an isocyanate component (aromatic, aliphatic, or cycloaliphatic diisocyanates), a “soft” polyol block based on long-chain diols (polyether or polyester), and a low-molecular-weight chain extender – either a short-chain diol or a diamine. (Fig. 1) [51, 52].

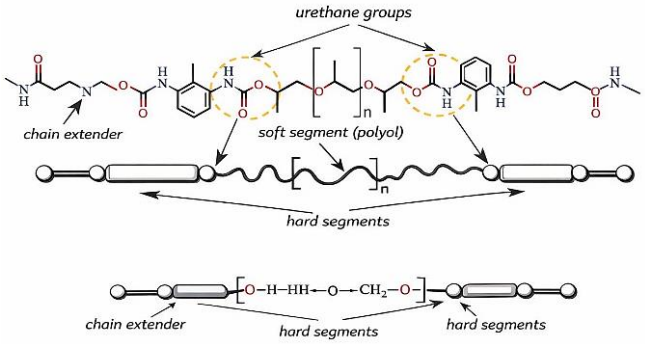


Figure 1 – Schematic of the chemical structure of polyurethane

Polyurethanes can be conveniently described as segmented copolymers: their macromolecular chains consist of alternating fragments, where the polyol component imparts elasticity, while the segments formed by the diisocyanate and chain extender provide rigidity. Polyol-rich regions typically exhibit a glass transition temperature below room temperature and are therefore referred to as «soft segments», whereas the urethane/urea domains based on the diisocyanate and chain extender form more ordered and rigid «hard segments». Polyurethane dispersions are stable colloidal systems in which water serves as the dispersion medium and polyurethane-urea particles

constitute the dispersed phase. The stability of these systems is ensured by hydrophilic moieties incorporated into the prepolymer structure during synthesis; these may include ionogenic groups (anionic or cationic) and/or nonionic hydrophilic blocks. [36, 51, 52].

Publications generally distinguish two main approaches to producing polyurethane dispersions: the prepolymer mixing route [53] and the acetone route [54]. In both cases, the process is essentially two-step. First, a polyurethane prepolymer is prepared by reacting polyisocyanates with polyols. Next, this prepolymer is dispersed in water and then chain-extended in the aqueous phase, typically using polyamines. A key limitation shared by both routes is the need to add a substantial amount of solvent during prepolymer preparation to lower viscosity and ensure processability. In the prepolymer method, high-boiling solvents such as N-methylpyrrolidone (NMP) [36] – sometimes up to 30 wt.% – are used and can remain in the finished dispersion. By contrast, the acetone method relies on low-boiling solvents, e.g., acetone [55] or methyl ethyl ketone [56], that are later stripped off by vacuum distillation. Although this enables dispersions with minimal residual organic solvent, the extra, energy-demanding distillation step and the requirements for solvent recovery make the acetone route noticeably more expensive.

The environmental profile of polyurethane dispersions can be improved by adjusting the formulation and the functional chemistry of the starting materials. If the components are selected so that the prepolymer viscosity is reduced already at the synthesis stage, dispersions can be produced via the simpler prepolymer route without adding organic solvents. Patent sources most often cite two solutions to this problem: replacing the isocyanate component with m-tetramethylxylylene diisocyanate (TMXDI) [57] or partially/fully using polyoxypropylene glycols (PPG) as the polyol component [58]. TMXDI is generally considered an option for specialized formulations where improved adhesion to plastic substrates is a key requirement [59]. At the same time, incorporating more affordable PPG into PUD formulations can also reduce overall material costs and partially offset high production expenses.

The elevated cost of polyurethane coatings, stemming from their complex synthesis and the utilization of expensive raw materials, has necessitated the development of modified polyurethane systems. These systems are designed to optimize economic performance without significantly compromising the service characteristics of the coatings. Polyurethane coatings are modified using various techniques, including: chemical modification via graft copolymerization with functional monomers [60]; incorporation of acrylate components into polyurethane systems [61]; development of hybrid latexes through emulsion polymerization [62].

One of the most promising research areas is the synthesis of acrylic-polyurethane hybrids, where a polyurethane matrix is integrated with acrylic components. These hybrids are produced through two primary methods: either by blending polyacrylate and polyurethane latexes or via a synthetic route involving the polymerization of acrylate comonomers within polyurethane latex particles or the emulsion copolymerization of a urethane prepolymer with acrylic comonomers [63]. Acrylate-urethane film-formers are defined as acrylate oligomeric compounds containing urethane-type ester groups within their oligomeric blocks (Fig. 2) [64].

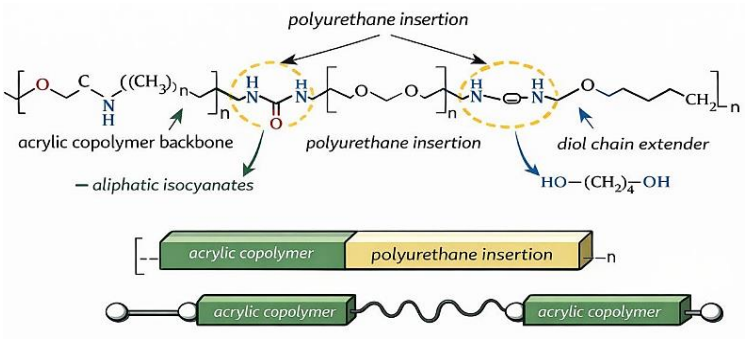


Figure 2 – Schematic of the chemical structure of acrylic-polyurethane

Acrylate-urethane oligomers are typically prepared from diisocyanates of either aliphatic or aromatic nature (for example, hexamethylene diisocyanate or 2,4-toluene diisocyanate) in combination with hydroxyl-containing reagents such as glycols, oligomeric diols, or multifunctional alcohols [65]. Recently, a widely adopted strategy has been the free-radical curing/polymerization of

oligomeric species that simultaneously carry urethane linkages and vinyl unsaturation within the same molecule. This approach has opened a practical route to crosslinked network polymers with tunable property profiles and has broadened polyurethane modification options via copolymerization with vinyl monomers and oligomers [66].

Unsaturated urethane-containing oligoesters with terminal acrylic-type double bonds can be obtained through two key synthetic schemes. The first relies on reacting diisocyanates with oligomeric diols followed by end-capping with hydroxyalkyl acrylates. The second involves oligocondensation routes based on glycol or bisphenol bischloroformates reacted with diamines and (alkyl/alkylaryl) acrylates bearing terminal chloroformate or amino functionalities [67].

From a structure-property standpoint, acrylate-urethane film formers are often associated with interpenetrating polymer network (IPN) architectures. In an IPN, two crosslinked polymer networks coexist in the same material volume while remaining largely ungrafted-i.e., without substantial covalent linking between the networks. Typically, one network is formed and crosslinked in the presence of the other; subsequently, the second component is polymerized and crosslinked via a different mechanism to achieve an optimized morphology [68]. Such mutual interpenetration suppresses macroscopic phase separation and provides synergistic performance effects, including improved adhesion, toughness/strain resistance, and barrier characteristics. Related variants include semi- or pseudo-IPNs, where a crosslinked network is combined with a linear polymer and the extent of interpenetration can vary [69].

IPN architectures provide a versatile platform for engineering polymer morphology, enabling targeted adjustment of coating properties through controlled network design. Moreover, interpenetrating systems can be built using hybrid synthesis strategies -combining, for example, grafting reactions with stepwise (sequential) polymerization to create multi-network structures with optimized performance. An example of this is the production of acrylate-modified urethane (via grafting) and urethane-modified acrylate (via sequential polymerization). The primary advantage of such networks lies in the enhancement of phase interaction between polymer chains [68, 69]. Currently, urethane acrylate is produced based on ethylene glycol monomethacrylate, 2,4-toluene diisocyanate and oligoxypropylene glycol [70].

Across the methods discussed, urethane linkages are commonly generated via isocyanate chemistry. Yet, isocyanate-driven urethane formation rarely proceeds “cleanly”: competing side reactions can introduce additional structures and functional groups (e.g., biuret and acylurea motifs) that show limited resistance to heat, thermo-oxidative aging, and mechanical stress, ultimately diminishing polyurethane performance. Moreover, diisocyanates are expensive and hazardous, and their high reactivity toward atmospheric moisture imposes strict processing requirements, which complicates manufacturing of polyurethane-based materials.

For these reasons, there is strong interest in non-isocyanate routes to polyurethane-type networks, where urethane bonds form during coating cure without involving isocyanates. A representative example is epoxy-polyurethane systems derived from cyclic carbonates and polyamines.

The resulting oligomers are typically clear (or only slightly tinted) liquids that dissolve well in most organic media and show a narrow molecular-weight distribution close to monodisperse behavior [51]. When the urethane fragment remains N–H (i.e., contains a mobile hydrogen capable of forming hydrogen bonds), the material tends to be noticeably more viscous than analogous systems in which the urethane nitrogen is substituted [71]. Acrylate-urethane oligomers may also be obtained by interfacial oligocondensation carried out in alkaline, two-phase water/organic solvent mixtures. Subsequent curing can be initiated either thermally with 2,2′-azobisisobutyronitrile (AIBN) or by applying radiation, including UV exposure [71].

Crosslinked acrylate-urethane networks that incorporate substituted urethane groups demonstrate enhanced resistance to hydrolysis, which is commonly attributed to phenyl-ring shielding of the urethane site that is otherwise most prone to hydrolytic attack [72]. Owing to the combined advantages of acrylates and urethanes, acrylate-urethane hybrids serve effectively as film-forming binders in coatings, offering strong pigment compatibility, favorable cost-to-performance, reduced reliance on organic solvents while maintaining fast cure, and good thermal stability, outstanding abrasion and impact resistance, improved chemical and solvent resistance, enhanced elasticity at low temperatures, and improved adhesion [73].

Acrylate-urethane hybrids combine the advantages of both polymer classes: those of acrylates (weather resistance, hardness, and good pigmentability) and those of urethanes (mechanical strength, abrasion resistance, and flexibility). They can be used either as standalone materials or in combination with urethane- or acrylate-based systems [64]. Acrylate-urethane hybrid materials are applied across many sectors: they are formulated as protective and decorative coatings for timber flooring, as finishes for mineral substrates such as concrete and brick, and as primers in automotive coating stacks. They are also used for plastic surfaces, serve as film-forming binders in printing-ink systems, and function as topcoats for textiles and leather. In addition, these hybrids underpin a variety of UV-curable coating technologies and find use in electronics-related coatings as well as in materials designed for optical signal transmission [64].

Blending (physical modification) involves the incorporation and homogeneous distribution of different polymers (oligomers) within the film-forming polymer matrix, thereby enabling an improvement in the material's processing and performance characteristics [52]. Blending of acrylic-polyurethane systems combines soft polyurethane segments with rigid acrylic domains, leading to the formation of a structured polymer matrix with enhanced chemical and mechanical resistance [74, 75]. By adjusting the ratio of urethane and acrylic segments, it is possible to optimize the crosslinking degree, phase distribution, and film density, which directly govern the coating's barrier and anticorrosion performance. Additional chemical modification of such blends using functional monomers, plasticizers, or nanofillers further improves metal adhesion, coating strength, and resistance to aggressive environments [76, 77]. Overall, acrylic-polyurethane blends enable the design of coatings with targeted, optimized chemical and service properties for effective corrosion protection of metallic substrates.

The combination of acrylic and polyurethane components determines the specific properties of acrylic-polyurethane systems. A comparative characterization of the main performance parameters of polyurethane and acrylic-polyurethane film-forming materials is presented in Table 2.

Table 2 – Comparison of the key performance characteristics of polyurethane and acrylic-polyurethane film-forming systems

Parameter	**Polyurethane film-forming materials**	**Acrylic-polyurethane film-forming materials**
Chemical structure	Polymers formed by the reaction of polyols with isocyanates	Acrylic copolymers modified with polyurethane fragments
UV resistance	Moderate	High due to the acrylic component
Weather resistance	High	Very high
Color and gloss retention	May decrease during prolonged service	Good color and gloss retention
Decorative properties of the coating	Limited; more commonly used as protective coatings	High decorative performance
Typical application areas	Industrial coatings, protective varnishes, floor coatings	Automotive, architectural, and decorative coatings

The analysis of the data presented in the table shows that the differences between polyurethane and acrylic–polyurethane film-forming materials are primarily determined by the features of their chemical structure [78-83]. Polyurethane systems are formed through the reaction of polyols with di- or polyisocyanates, resulting in macromolecules containing urethane groups, which account for the high strength and chemical resistance of the resulting coatings. Acrylic–polyurethane film-forming materials are modified systems in which the polyurethane matrix is combined with acrylic copolymers, making it possible to integrate the mechanical strength of polyurethanes with the high weather resistance of acrylic resins [19, 84].

Significant differences between these materials are also observed in their resistance to ultraviolet radiation. Polyurethane coatings, especially those based on aromatic isocyanates, generally exhibit comparatively lower light stability, which may lead to photochemical degradation of the polymer structure during prolonged UV exposure [85-87]. In contrast, acrylic–polyurethane systems show higher resistance to ultraviolet radiation owing to the presence of the acrylic component, which provides improved photostability of the coating [20,8]. These features are also reflected in the tendency of the coatings to yellow. In polyurethane materials, color changes may occur during prolonged service under the action of light and atmospheric oxygen [85, 86, 88].

Acrylic-polyurethane film-forming materials are characterized by a significantly lower tendency toward this phenomenon, which contributes to longer retention of the initial decorative properties of the coating [89-93].

In addition, acrylic-polyurethane systems demonstrate higher weather resistance and better color and gloss stability during outdoor service. Polyurethane coatings, in turn, are traditionally used in cases where high mechanical strength and protective performance are required [94-100]. Thus, the choice of film-forming material is determined by the required balance between the performance and decorative characteristics of the coating system.

Conclusion

Waterborne coating materials based on various polymer binders demonstrate substantial potential for the development of environmentally friendly and functional coatings. Their growing scientific and industrial relevance is associated not only with the reduction of volatile organic compound emissions, but also with the possibility of designing coating systems with a controlled balance of protective, mechanical, and technological properties. Among these, polyurethane and acrylic-polyurethane systems are of particular interest due to their enhanced service performance. These materials represent one of the most promising classes of modern film-forming systems for anticorrosion applications, since they allow the combination of ecological acceptability with high adaptability of formulation design.

Polyurethane and acrylic–polyurethane coatings exhibit distinct physicomechanical, chemical, and service-property profiles, which ultimately define their preferred roles in metal corrosion protection. Polyurethane systems are generally the better choice for harsh conditions that combine chemical attack with mechanical stresses, where maximum protective performance is critical. This is primarily due to their high adhesion strength, abrasion resistance, toughness, and resistance to chemically aggressive environments. Acrylic-polyurethane coating systems are applicable for the protection of metal surfaces operated under atmospheric exposure and solar radiation. The presence of an acrylic component influences film-formation processes and resistance to photochemical aging, as well as technological parameters related to coating application and curing. In addition, acrylic-containing systems generally provide improved color and gloss retention, enhanced weather resistance, and better long-term decorative stability under outdoor service conditions.

The analysis presented in this review also indicates that the performance limitations of waterborne coating systems can be effectively mitigated by directed chemical and compositional modification. The introduction of functional groups, the formation of hybrid or interpenetrating polymer networks, the use of crosslinking agents, and the incorporation of nanoscale functional fillers or corrosion inhibitors make it possible to regulate barrier properties, hydrophobicity, adhesion, resistance to aggressive media, and durability of the resulting films. Therefore, the development of high-performance waterborne anticorrosion coatings should be considered not only in terms of binder type, but also in terms of the relationship between chemical structure, dispersed-particle morphology, film-formation behavior, and final coating architecture.

The selection of a coating system should be based on service conditions, required protective and decorative properties, and the technological parameters of application and curing. The considerations outlined herein may be used to support the design and justification of coating systems for anticorrosion protection of metallic structures. In this regard, a rational choice between polyurethane and acrylic-polyurethane systems should be made on the basis of a comprehensive assessment of the operating environment, expected degradation factors, and the target lifetime of the protected structure. Future research should focus on formulation optimization, improving environmental safety, and extending coating service life under aggressive industrial exposure conditions. Particular attention should be paid to the development of multifunctional waterborne coatings capable of combining barrier protection with active anticorrosion action, self-healing ability, improved UV resistance, and reduced environmental impact. Such an approach will contribute to the creation of next-generation coating materials that satisfy both performance requirements and modern sustainability criteria.

References

1. Use of Protective Coatings and Surface Treatments for Long-term Protection / D.I. Njoku et al // Architectural Corrosion and Critical Infrastructure / R. Aslam et al // J. Aslam. – Royal Society of Chemistry. – 2025. – Ch. 13. – P. 299-341. https://doi.org/10.1039/9781837678259-00299.

2. Corrosion Protection and Sustainability: Why Are the Two Often Not Discussed Together? / T. Prošek et al // Corrosion and Materials Degradation. – 2025. – Vol. 6(3). – Art. 38. https://doi.org/10.3390/cmd6030038.
3. A review on life-cycle cost analysis of anticorrosion coating systems for marine and offshore infrastructure / T. Zhou et al // Anti-Corrosion Methods and Materials. – 2025. https://doi.org/10.1108/ACMM-05-2025-3252.
4. From Wet to Protective: Film Formation in Waterborne Coatings / A. Arjmandi et al // ACS Applied Materials & Interfaces. – 2024. – Vol. 16(43). – P. 58006-58028. https://doi.org/10.1021/acsami.4c09729.
5. Nazari M.H. Nanocomposite organic coatings for corrosion protection of metals: a review of recent advances / M.H. Nazari, S. Ramezanzadeh, B. Ramezanzadeh // Progress in Organic Coatings. – 2022. – Vol. 162. – Art. 106573. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2021.106573.
6. Bierwagen G.P. Reflections on corrosion control by organic coatings / G.P. Bierwagen // Progress in Organic Coatings. – 1996. – Vol. 28(1). – P. 43-48. https://doi.org/10.1016/0300-9440(95)00588-9.
7. Review of Recent Developments in the Formulation of Graphene-Based Coatings for the Corrosion Protection of Metals and Alloys / B. Healy et al // Corrosion and Materials Degradation. – 2020. – Vol. 1(3). – P. 296-327. https://doi.org/10.3390/cmd1030015.
8. Durability and Corrosion Properties of Waterborne Coating Systems on Mild Steel Dried under Atmospheric Conditions and by Infrared Radiation / I. Stojanović et al // Materials. – 2022. – Vol. 15(22). – Art. 8001. https://doi.org/10.3390/ma15228001.
9. Critical factors on corrosion protective waterborne coatings containing functionalized graphene oxide: A review / J. Cui et al // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2023. – Vol. 174. – Art. 107729. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2023.107729.
10. Pieters K. Progress in waterborne polymer dispersions for coating applications: commercialized systems and new trends / K. Pieters, T.H. Mekonnen // RSC Sustainability. – 2024. – Vol. 2. – P. 3704-3729. https://doi.org/10.1039/D4SU00267A.
11. Functional properties of coatings based on novel waterborne polyurethane dispersions with green cosolvents / L. Germán-Ayuso et al // Progress in Organic Coatings. – 2022. – Vol. 170. – Art. 106955. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2022.106955.
12. Facile synthesis and construction of renewable, waterborne and flame-retardant UV-curable coatings in wood surface / Y. Huang et al // Progress in Organic Coatings. – 2022. – Vol. 172. – Art. 107120. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2022.107120.
13. Chitosan-Grafted Graphene Oxide-Reinforced Bio-Based Waterborne Epoxy Nanocomposites for Antibacterial and Corrosion Resistance in Tropical Marine Environments: A Mini-Review / Y. Wu et al // Polymers. – 2025. – Vol. 17, № 21. – Art. 2964. https://doi.org/10.3390/polym17212964.
14. A new understanding of the failure of waterborne acrylic coatings / H. Wan et al // RSC Advances. – 2017. – Vol. 7, № 61. – P. 38135-38148. https://doi.org/10.1039/C7RA04878E.
15. Swartz N.A. Understanding the differences in film formation mechanisms of two comparable solvent based and water-borne coatings on bronze substrates by electrochemical impedance spectroscopy / N.A. Swartz, T.L. Clare // Electrochimica Acta. – 2012. – Vol. 62. – P. 199-206. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2011.12.015.
16. Water and corrosion resistance of epoxy-acrylic-amine waterborne coatings: effects of resin molecular weight, polar groups and hydrophobic segments / M. Liu et al // Corrosion Science. – 2013. – Vol. 75. – P. 106-113. https://doi.org/10.1016/j.corsci.2013.05.020.
17. Topçuoğlu Ö. Characterization of waterborne acrylic based paint films and measurement of their water vapor permeabilities / Ö. Topçuoğlu, S.A. Altinkaya, D. Balköse // Progress in Organic Coatings. – 2006. – Vol. 56, № 4. – P. 269-278. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2006.02.003.
18. Mehravar S. Polyurethane/Acrylic Hybrid Waterborne Dispersions: Synthesis, Properties, and Applications / S. Mehravar, N. Ballard, R. Tomovska, J.M. Asua // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2019. – Vol. 58(46). – P. 20902-20922. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b02324.
19. Barquero A. Synthesis of Waterborne Anticorrosive Coatings Based on the Incorporation of Phosphate Groups to Polyurethane-Acrylate Hybrids / A. Barquero, A. Llorente, J.M. Asua // Macromolecular Reaction Engineering. – 2023. – Vol. 17, № 4. – Art. 2300015. https://doi.org/10.1002/mren.202300015.

20. Waterborne polyurethane/acrylate: Comparison of hybrid and blend systems / P.J. Peruzzo et al // Progress in Organic Coatings. – 2011. – Vol. 72(3). – P. 429-437. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2011.05.016.
21. Waterborne polyurethane dispersions obtained with polycarbonate of hexanediol intended for use as coatings / V. García-Pacios et al // Progress in Organic Coatings. – 2011. – Vol. 71(2). – P. 136-146. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2011.01.006.
22. Improvement of Corrosion Resistance of Waterborne Polyurethane Coatings with the Synergistic Effect of Sulfonated Graphene/Zinc Phosphate / J.G. Wen et al // ACS Omega. – 2019. – Vol. 4(18). – P. 17306-17318. https://doi.org/10.1021/acsomega.9b02687.
23. Recent Advances in Combining Waterborne Acrylic Dispersions with Biopolymers / J. Solera-Sendra et al // Polymers. – 2025. – Vol. 17, № 8. – Art. 1027. https://doi.org/10.3390/polym17081027.
24. Advances in Waterborne Acrylic Resins: Synthesis Principle, Modification Strategies, and Their Applications / C. Jiao et al // ACS Omega. – 2021. – Vol. 6, № 4. – P. 2443-2449. https://doi.org/10.1021/acsomega.0c05593.
25. Tillet G. Chemical reactions of polymer crosslinking and post-crosslinking at room and medium temperature / G. Tillet, B. Boutevin, B. Ameduri // Progress in Polymer Science. – 2011. – Vol. 36, Issue 2. – P. 191-217. https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2010.08.003.
26. Kinetic study of crosslinking between acetoacetoxy and hexamethylene diamine functionalized waterborne latexes in two-pack systems / S. Tariq et al // Progress in Organic Coatings. – 2022. – Vol. 165. – Art. 106732. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2022.106732.
27. Synthesis and characterization of waterborne polyurethanes with alkoxy silane groups in the side chains for potential application in waterborne ink / L. Lei et al // Progress in Organic Coatings. – 2016. – Vol. 92. – P. 85-94. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2015.11.019.
28. Nabuurs T. Defect free coatings from two-pack isocyanate curable acrylic dispersions / T. Nabuurs, D. Pears, A. Overbeek // Progress in Organic Coatings. – 1999. – Vol. 35, Issues 1-4. – P. 129-140. https://doi.org/10.1016/S0300-9440(99)00015-6.
29. Polymeric aziridines as benign crosslinkers for water-based coating applications / A.J.P. Bückmann et al // Journal of Coatings Technology and Research. – 2022. – Vol. 19. – P. 1345-1355. https://doi.org/10.1007/s11998-022-00626-w.
30. Tariq S. Combined effect of acetoacetoxy – Amine interparticle crosslinking and different TG polymer phases to obtain high performance waterborne wood coatings / S. Tariq, N. Veling, M. Paulis // Progress in Organic Coatings. – 2024. – Vol. 187. – Art. 108134. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2023.108134.
31. State of the art and current trends on layered inorganic–polymer nanocomposite coatings for anticorrosion and multi-functional applications / R. Teijido et al // Progress in Organic Coatings. – 2022. – Vol. 163. – Art. 106684. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2021.106684.
32. Waterborne polyurethane coatings with excellent film formation at low temperature by using encapsulated blocked polyisocyanate crosslinker for 1K clearcoats / C. Yang et al // Progress in Organic Coatings. – 2023. – Vol. 177. – Art. 107408. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2023.107408/
33. Hesselmans L.C.J. Polycarbodiimide crosslinkers / L.C.J. Hesselmans, A.J. Derksen, J.A.M. van den Goorbergh // Progress in Organic Coatings. – 2006. – Vol. 55, Issue 2. – P. 142-148. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2005.08.011.
34. Yang Z. Rheology of Miscible Polymer Blends with Hydrogen Bonding / Z. Yang, C.D. Han // Macromolecules. – 2008. – Vol. 41, No. 6. – P. 2104-2118. https://doi.org/10.1021/ma7025385.
35. Poly(hydroxyurethane)–(meth)acrylic hybrids by miniemulsion polymerization / B. Bizet et al // ACS Applied Polymer Materials. – 2020. – Vol. 2, No. 10. – P. 4494-4504. https://doi.org/10.1021/acsapm.0c00657
36. Advances in Waterborne Polyurethane and Polyurethane-Urea Dispersions and Their Eco-Friendly Applications: A Review / A. Santamaria-Echart et al // Polymers. – 2021. – Vol. 13, № 3. – Art. 409. https://doi.org/10.3390/polym13030409.
37. Waterborne polyurethane/acrylic adhesive blends from sustainable seed oils / R. Mort et al // Sustainability. – 2022. – Vol. 14, № 14. – Art. 8657. – https://doi.org/10.3390/su14148657.

38. Coupled effect of water absorption and ion transport in hydrated latex anti-corrosion coatings / Y.R. Zhou et al // Journal of Coatings Technology and Research. – 2023. – Vol. 20. – P. 187-200. https://doi.org/10.1007/s11998-022-00676-0.
39. Film Formation of High Tg Latex Using Hydroplasticization: Explanations from NMR Relaxometry / B. Voogt et al // Langmuir. – 2019. – Vol. 35, № 38. – P. 12418-12427. https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.9b01353.
40. Water-Resistant Latex Coatings: Tuning of Properties by Polymerizable Surfactant, Covalent Crosslinking and Nanostructured ZnO Additive / J. Machotová et al // Coatings. – 2021. – Vol. 11, № 3. – Art. 347. https://doi.org/10.3390/coatings11030347.
41. Hybrid polymer latexes / A. Guyot et al // Progress in Polymer Science. – 2007. – Vol. 32(12). – P. 1439-1461. https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2007.07.003.
42. Delpech M.C. Waterborne anionic polyurethanes and poly(urethane-urea)s: influence of the chain extender on mechanical and adhesive properties / M.C. Delpech, F.M.B. Coutinho // Polymer Testing. – 2000. – Vol. 19(8). – P. 939-952. https://doi.org/10.1016/S0142-9418(99)00066-5.
43. Pathak S.S. Value addition to waterborne polyurethane resin by silicone modification for developing high performance coating on aluminum alloy / S.S. Pathak, A. Sharma, A.S. Khanna // Progress in Organic Coatings. – 2009. – Vol. 65(2). – P. 206-216. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2008.11.005.
44. Dhoke S.K. Effect of nano-ZnO particles on the corrosion behavior of alkyd-based waterborne coatings / S.K. Dhoke, A.S. Khanna, T.J.M. Sinha // Progress in Organic Coatings. – 2009. – Vol. 64(4). – P. 371-382. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2008.07.023.
45. Grigoriev D. Nanocontainers for Self-Healing Coatings / D. Grigoriev, E. Shchukina, D.G. Shchukin // Advanced Materials Interfaces. – 2017. – Vol. 4(1). – Art. 1600318. https://doi.org/10.1002/admi.201600318.
46. Anticorrosive coatings: a review / P.A. Sorensen et al // Journal of Coatings Technology and Research. – 2009. – Vol. 6(2). – P. 135-176. https://doi.org/10.1007/s11998-008-9144-2.
47. Organic Coatings: Science and Technology / Z.W. Wicks Jr. Et al // 4th ed. – Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2017. – 832 p. https://content.e-bookshelf.de/media/reading/L-10210632-f0b1a9b6b0.pdf.
48. Overbeek A. Polymer heterogeneity in waterborne coatings / A. Overbeek // Journal of Coatings Technology and Research. – 2010. – Vol. 7(1). – P. 1-21. https://doi.org/10.1007/s11998-009-9201-5.
49. A bio-based waterborne polyurethane with high toughness, superior wear resistance, and water resistance enabled by sorbitol monooleate / W. Xiong et al // Progress in Organic Coatings. – 2023. – Vol. 185. – Art. 107895. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2023.107895.
50. Polydopamine functionalized graphene oxide nanocomposites reinforced the corrosion protection and adhesion properties of waterborne polyurethane coatings / Z. Zhao et al // European Polymer Journal. – 2019. – Vol. 120. – Art. 109249. https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2019.109249.
51. Polyurethane types, synthesis and applications – a review / J.O. Akindoyo et al // RSC Advances. – 2016. – Vol. 6, No. 115. – P. 114453-114482. https://doi.org/10.1039/C6RA14525F.
52. Fuensanta M. Structure-Properties Relationship in Waterborne Poly(Urethane-Urea)s Synthesized with Dimethylolpropionic Acid (DMPA) Internal Emulsifier Added before, during and after Prepolymer Formation / M. Fuensanta, A. Khoshnood, J.M. Martín-Martínez // Polymers. – 2020. – Vol. 12, № 11. – Art. 2478. https://doi.org/10.3390/polym12112478.
53. Kim B.K. Aqueous polyurethane dispersions / B.K. Kim // Colloid and Polymer Science. – 1996. – Vol. 274. – P. 599-611. https://doi.org/10.1007/BF00653056.
54. Noble K.-L. Waterborne polyurethanes / K.-L. Noble // Progress in Organic Coatings. – 1997. – Vol. 32, Iss. 1-4. – P. 131-136. https://doi.org/10.1016/S0300-9440(97)00071-4.
55. Waterborne Polyurethane Dispersions Obtained by the Acetone Process: A Study of Colloidal Features / H. Sardon et al // Journal of Applied Polymer Science. – 2011. – Vol. 120, № 4. – P. 2054-2062. https://doi.org/10.1002/app.33308.
56. Effect of ionic content, solid content, degree of neutralization, and chain extension on aqueous polyurethane dispersions prepared by prepolymer method / A.K. Nanda et al // Journal of Applied Polymer Science. – 2005. – Vol. 98, № 6. – P. 2514-2520. https://doi.org/10.1002/app.22141.
57. EP 0746579 B1. Aqueous anionic polyurethane dispersions. – European Patent Office. – Publ. 1998-08-05. https://data.epo.org/publication-server/rest/v1.0/publication-dates/19980805/patents/EP0746579NWB1/document.html.

58. US 7,754,809 B2**.** Solvent free polyurethane dispersions for hard surface coatings – Publ. 2010-07-13. https://patents.justia.com/patent/7754809
59. Synthesis, Stability and Properties of Polyurethane/Acrylic Hybrids Using m-TMXDI-based Anionic Poly(urethane-urea) Dispersion / H.-T. Chiu et al // Polymer-Plastics Technology and Engineering. – 2012. – Vol. 51, № 9. – P. 945-953. https://doi.org/10.1080/03602559.2012.680561.
60. Wang H. Graft copolymers of polyurethane with various vinyl monomers via radiation-induced miniemulsion polymerization: Influential factors to grafting efficiency and particle morphology / H. Wang, M. Wang, X. Ge // Radiation Physics and Chemistry. – 2009. – Vol. 78, № 2. – P. 112-118. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2008.08.005.
61. Influence of ingredients in water-based polyurethane–acrylic hybrid latexes on latex properties / X. Zhu et al // Progress in Organic Coatings. – 2008. – Vol. 62, № 3. – P. 251-257. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2007.12.006.
62. Hybrid polymer latexes: acrylics–polyurethane from miniemulsion polymerization: Properties of hybrid latexes versus blends / C. Wang et al // Polymer. – 2005. – Vol. 46, № 4. – P. 1113-1124. https://doi.org/10.1016/j.polymer.2004.11.051.
63. High solid and low viscosity waterborne polyurethane acrylate with excellent anti-corrosion and anti-bacterial performances / B. Chen et al // Progress in Organic Coatings. – 2023. – Vol. 183. – Art. 107767. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2023.107767.
64. A Review on Acrylate-Terminated Urethane Oligomers and Polymers: Synthesis and Applications / S.D. Maurya et al // Polymer-Plastics Technology and Engineering. – 2018. – Vol. 57, № 7. – P. 625-656. https://doi.org/10.1080/03602559.2017.1332764.
65. UV-curable waterborne polyurethane coatings: A state-of-the-art and recent advances review / L. Dall Agnol et al // Progress in Organic Coatings. – 2021. – Vol. 154. – Art. 106156. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2021.106156.
66. Wang X. Investigation of non-isocyanate urethane dimethacrylate reactive diluents for UV-curable polyurethane coatings / X. Wang, M. D. Soucek // Progress in Organic Coatings. – 2013. – Vol. 76, Issues 7-8. – P. 1057-1067. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2013.03.001.
67. K.W. Swiderski. Synthesis and Properties of Urethane Acrylate Oligomers: Direct versus Reverse Addition / K.W. Swiderski, I.V. Khudyakov // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2004. – Vol. 43. – P. 6281-6284. https://doi.org/10.1021/ie040017g.
68. Michael S. Silverstein. Interpenetrating polymer networks: So happy together? / M.S. Silverstein // Polymer. – 2020. – Vol. 207. – Art. 122929. https://doi.org/10.1016/j.polymer.2020.122929.
69. Interpenetrating polymer networks for desalination and water remediation: a comprehensive review of research trends and prospects / S. Dutta et al // RSC Advances. – 2023. – Vol. 13, № 9. – P. 6087-6107. https://doi.org/10.1039/D2RA07843K.
70. Kunwong D. Curing behavior of a UV-curable coating based on urethane acrylate oligomer: the influence of reactive monomers / D. Kunwong, N. Sumanochitraporn, S. Kaewpirom // Songklanakarin Journal of Science and Technology. – 2011. – Vol. 33, № 2. – P. 201-207. https://sjst.psu.ac.th/index.php/article/1131/PaperPDFw-Links/download.
71. Morgan P.W. Interfacial Polymerization / P.W. Morgan // Encyclopedia of Polymer Science and Technology. – 2002. https://doi.org/10.1002/0471440264.pst168.
72. Ramirez-Huerta M. Phenyl carbamate end-capped oligoesters: a model for hydrolytic stability of ester-based urethanes / M. Ramirez-Huerta, I.J. Zvonkina // Journal of Coatings Technology and Research. – 2016. – Vol. 13, № 5. https://doi.org/10.1007/s11998-016-9798-0.
73. Research progress of UV-curable polyurethane acrylate-based hardening coatings: synthesis and applications / H. Fu et al // Progress in Organic Coatings. – 2019. – Vol. 131. – P. 82-99. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.05.016.
74. Definitions of Terms Related to Polymer Blends, Composites, and Multiphase Polymeric Materials (IUPAC Recommendations 2004) / W.J. Work et al // Pure and Applied Chemistry. – 2004. – Vol. 76, № 11. – P. 1985-2007. https://doi.org/10.1351/pac200476111985.
75. Comparing and contrasting the properties of urethane/acrylic hybrids with those of corresponding blends of urethane dispersions and acrylic emulsions / R.A. Brown et al // Progress in Organic Coatings. – 2005. – Vol. 52, No. 1. – P. 73-84. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2004.03.009.
76. Hybrid waterborne polyurethane coating behavior in saline solution / J.T. Corredor et al // Progress in Organic Coatings. – 2025. – Vol. 207. – Art. 109378. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2025.109378.

77. Peng Z. The novel preparation of waterborne acrylic polyurethane-silica organic–inorganic interpenetrating network coatings / Z. Peng, A. Zhu // Progress in Organic Coatings. – 2024. – Vol. 187. – Art. 108157. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2023.108157.
78. Chattopadhyay D.K. Structural engineering of polyurethane coatings for high performance applications / D.K. Chattopadhyay, K.V.S.N. Raju // Progress in Polymer Science. – 2007. – Vol. 32, No. 3. – P. 352-418. https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2006.05.003.
79. Polyurethanes for coatings and adhesives – chemistry and applications / F.E. Golling et al // Polymer International. – 2019. – Vol. 68, № 5. – P. 848-855. https://doi.org/10.1002/pi.5665.
80. Król P. Structures, properties and applications of the polyurethane ionomers / P. Król, B. Król // Journal of Materials Science. – 2020. – Vol. 55. – P. 73-87. https://doi.org/10.1007/s10853-019-03958-y.
81. Madbouly S.A. Waterborne Polyurethane Dispersions and Thin Films: Biodegradation and Antibacterial Behaviors / S.A. Madbouly, J.U. Otaigbe // Molecules. – 2021. – Vol. 26, № 4. – Art. 961. https://doi.org/10.3390/molecules26040961.
82. Preparation and performances of cationic waterborne polyurethanes modified with acrylic acid / G. Kuang et al // Journal of Coatings Technology and Research. – 2024. – Vol. 21. – P. 1049-1061. https://doi.org/10.1007/s11998-023-00857-5.
83. Waterborne polyurethane based on dual crosslinked structure with excellent mechanical properties, water and corrosion resistance / J. Zhang et al // Progress in Organic Coatings. – 2024. – Vol. 197. – Art. 108784. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2024.108784.
84. Hybrid waterborne polyurethane/acrylate dispersion synthesized with bisphenol A-glycidyl methacrylate grafting agent / G.A. Alvarez et al // Progress in Organic Coatings. – 2018. – Vol. 118. – P. 30-39. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2018.01.016.
85. Rosu D. IR-change and yellowing of polyurethane as a result of UV irradiation / D. Rosu, L. Rosu, C.N. Cascaval // Polymer Degradation and Stability. – 2009. – Vol. 94, № 4. – P. 591-596. https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2009.01.013.
86. Preparation of Yellowing-Resistant Waterborne Polyurethane-Based Pressure-Sensitive Adhesives / G. Li et al // Molecules. – 2024. – Vol. 29, № 9. – Art. 2099. https://doi.org/10.3390/molecules29092099.
87. Aizpurua J. Recyclable, remendable and healing polyurethane/acrylic coatings from UV curable waterborne dispersions containing Diels–Alder moieties / J. Aizpurua, M. Paulis, L. Irusta // Progress in Organic Coatings. – 2020. – Vol. 139. – Art. 105460. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.105460.
88. Stability of acrylic polyurethane coatings under accelerated aging tests and natural outdoor exposure: The critical role of the used photo-stabilizers / T.V. Nguyen et al // Progress in Organic Coatings. – 2018. – Vol. 124. – P. 137-146. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2018.08.013.
89. Ageing behavior of acrylic polyurethane varnish coating in artificial weathering environments / J. Hu et al // Progress in Organic Coatings. – 2009. – Vol. 65, № 4. – P. 504-509. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2009.05.002.
90. Photostabilizing Efficiency of Acrylic-based Bamboo Exterior Coatings Combining Benzotriazole and Zinc Oxide Nanoparticles / F. Rao et al // Coatings. – 2019. – Vol. 9, № 9. – Art. 533. https://doi.org/10.3390/coatings9090533.
91. Preparation and characterization of weather resistant silicone/acrylic resin coatings / H.S. Park et al // Journal of Coatings Technology. – 2003. – Vol. 75, № 936. – P. 55-64. https://doi.org/10.1007/BF02697923.
92. Acrylic polyurethane coatings durability under outdoor weathering in an industrial atmosphere / M. Białomazur et al // Polimery. – 2021. – Vol. 66, № 10. – P. 643-650. https://doi.org/10.14314/polimery.2021.10.1.
93. Decker C. UV-Radiation curing of waterborne acrylate coatings / C. Decker, K. Moussa // Journal of Coatings Technology and Research. – 2004. – Vol. 1. – P. 127-136. https://doi.org/10.1007/s11998-004-0027-x.
94. Preparation and Properties of Novel Modified Waterborne Polyurethane Acrylate / Q. Luo et al // Coatings. – 2022. – Vol. 12, № 8. – Art. 1135. https://doi.org/10.3390/coatings12081135.
95. Review progress of bio-based coatings in waterborne system / Y.W. Chek et al // Progress in Organic Coatings. – 2024. – Vol. 186. – Art. 108066. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2023.108066.

96. Preparation and Properties of Hydrophobic Polyurethane Modified with Vinyl Tris(β-Methoxyethoxy) Silane / Y. Ma et al // Polymers. – 2023. – Vol. 15, № 7. – Art. 1759. https://doi.org/10.3390/polym15071759.
97. Organic/inorganic hybrid waterborne polyurethane coatings with self-healing properties for anticorrosion application / J. Xu et al // Progress in Organic Coatings. – 2023. – Vol. 174. – Art. 107244. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2022.107244.
98. Polyurethane/acrylic hybrid dispersions containing phosphorus reactive flame retardants as transparent coatings for wood / M. Puyadena et al // Progress in Organic Coatings. – 2022. – Vol. 170. – Art. 107005. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2022.107005.
99. Liu X. Continuous Production of Water-Borne Polyurethanes: A Review / X. Liu, W. Hong, X. Chen // Polymers. – 2020. – Vol. 12, № 12. – Art. 2875. https://doi.org/10.3390/polym12122875.
100. Qu S. The effect of various cyclic Wet-Dry exposure cycles on the Failure Process of Organic Coatings / S. Qu, X. Zhao, Y. Tang // International Journal of Electrochemical Science. – 2019. – Vol. 14, № 12. – P. 10754-10762. https://doi.org/10.20964/2019.12.52.

А.Н. Дюрягина[1], Т.В. Ширина[1], Ю.С. Бызова[1*], А.А. Луценко[2]
[1]Северо-Казахстанский университет им. Манаша Козыбаева
150000, Республика Казахстан, г. Петропавловск, ул. Пушкина, 86
[2]Кокшетауский университет имени Абая Мырзахметова
020000, Республика Казахстан, г. Кокшетау, ул. Ауэзова, 189а
*e-mail: yuliyabyzovva@gmail.com

МОДИФИЦИРОВАНИЕ ПЛЕНКООБРАЗУЮЩИХ ДЛЯ ЛАКОКРАСОЧНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ВОДНОЙ ОСНОВЕ

Лакокрасочные композиты на водной основе находят все большее применение в строительстве, промышленности и быту. Это обусловлено прежде всего экологическими (снижение эмиссии органических растворителей) и экономическими (вода дешевле и доступнее, чем органические растворители) причинами. Вместе с тем ключевой задачей остаётся повышение барьерных и механических характеристик водных покрытий при сохранении технологичности нанесения и быстрого отверждения. Применяются два основных подхода к модификации водоразбавляемых систем – химическая модификация полимерных связующих и блендирование полимеров. Показано, что целенаправленное варьирование структуры мягких/жёстких сегментов полиуретана, а также введение акрилатной компоненты и функциональных добавок (пластификаторов, нанонаполнителей) позволяет управлять степенью сшивки и фазовым распределением, тем самым повышая адгезию, износостойкость и барьерные свойства покрытий. Среди модифицированных водоразбавляемых систем особый интерес представляют полиуретановые и акрил-полиуретановые покрытия, которые были рассмотрены в статье благодаря уникальному сочетанию их свойств. Эти системы обеспечивают высокую долговечность покрытий и широкую сферу применения, включая защитные и декоративные покрытия для различных материалов. Особое внимание уделено способам их модификации. Отмечена перспективность полиуретановых и акрил-полиуретановых водоразбавляемых покрытий для антикоррозионной защиты и необходимость подбора составов с учётом условий эксплуатации.

***Ключевые слова**: водорастворимые лакокрасочные материалы, композиты, модифицированные водорастворимые системы, полиуретан, акрил-полиуретан, блендирование полимеров.*

А.Н. Дюрягина[1], Т.В. Ширина[1], Ю.С. Бызова[1*], А.А. Луценко[2]
[1]Манаш Қозыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университеті
150000, Қазақстан Республикасы, Петропавл қ., Пушкин к-сі, 86
[2]Абай Мырзахметов атындағы Көкшетау университеті
020000, Қазақстан Республикасы, Көкшетау қ., Ауэзов к-сі, 189а
*e-mail: yuliyabyzovva@gmail.com

СУ НЕГІЗІНДЕГІ ЛАК-БОЯУ КОМПОЗИТТЕРІ ҮШІН ПЛЕНКА ТҮЗЕТІН МОДИФИКАЦИЯ

Су негізіндегі лак-бояу композиттері құрылыста, өнеркәсіпте және тұрмыста кеңінен қолданылып келеді. Бұл, ең алдымен, экологиялық (органикалық еріткіштердің эмиссиясын төмендету) және экономикалық (судың органикалық еріткіштерге қарағанда арзандығы әрі қолжетімділігі) факторларымен түсіндіріледі. Сонымен қатар, жағу технологиялылығын және тез

қатаюын сақтай отырып, су негізіндегі жабындардың тосқауылдық және механикалық қасиеттерін арттыру негізгі міндет болып қала береді. Сумен сұйылтылатын жүйелерді модификациялаудың екі негізгі тәсілі қолданылады: полимерлі байланыстырғыштарды химиялық модификациялау және полимерлерді блендтеу. Полиуретанның жұмсақ/қатты сегменттерінің құрылымын мақсатты түрде түрлендіру, сондай-ақ акрилат компонентін және функционалдық қоспаларды (пластификаторлар, нанотолтырғыштар) енгізу айқас байланысу дәрежесі мен фазалардың таралуын басқаруға мүмкіндік беріп, соның нәтижесінде жабындардың адгезиясын, тозуға төзімділігін және тосқауылдық қасиеттерін арттыратыны көрсетілді.Модификацияланған су негізіндегі жүйелердің ішінде полиуретанды және акрил-полиуретанды жабындар қасиеттерінің бірегей үйлесімі арқасында ерекше қызығушылық тудырады және мақалада осы жүйелерге басым назар аударылған. Аталған жүйелер әртүрлі материалдарға арналған қорғаныш және сәндік жабындарды қоса алғанда, жабындардың жоғары беріктігін және қолданылу аясының кеңдігін қамтамасыз етеді. Оларды модификациялау тәсілдеріне ерекше назар аударылады. Коррозияға қарсы қорғауда полиуретанды және акрил-полиуретанды су негізіндегі жабындардың перспективалылығы, сондай-ақ пайдалану жағдайларын ескере отырып, құрамдарды мақсатты түрде таңдаудың қажеттілігі атап өтіледі.

Түйін сөздер: *су негізіндегі лак-бояу материалдары, композиттер, модификацияланған су негізіндегі жүйелер, полиуретан, акрил-полиуретан, полимерлерді араластыру.*

Information about the authors

Antonina Dyuryagina – candidate of chemical sciences, professor of the department «Chemistry and Chemical Technologies», M. Kozybayev North Kazakhstan University, Petropavl, Republic of Kazakhstan; e-mail: adyuryagina@inbox.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9109-8159.

Tatyana Shirina – doctoral student of the department «Chemistry and Chemical Technologies», M. Kozybayev North Kazakhstan University, Petropavl, Republic of Kazakhstan; e-mail: tshirina@internet.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1639-0045.

Yuliya Byzova* – PhD, associate professor of the department «Chemistry and Chemical Technologies», M. Kozybayev North Kazakhstan University, Petropavl, Republic of Kazakhstan; e-mail: yuliyabyzovva@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2072-0238.

Aida Lutsenko – PhD, director of the commercialization department, A. Myrzakhmetov Kokshetau University, Kokshetau, Republic of Kazakhstan; e-mail: l-a.13@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8047-5916.

Сведения об авторах

Антонина Николаевна Дюрягина – кандидат химических наук., профессор кафедры «Химия и химические технологии», Северо-Казахстанский университет им. М.Козыбаева, г. Петропавловск, Республика Казахстан; e-mail: adyuryagina@inbox.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9109-8159.

Татьяна Валерьевна Ширина – докторант кафедры «Химия и химические технологии», Северо-Казахстанский университет им. М. Козыбаева, г. Петропавловск, Республика Казахстан; e-mail: tshirina@internet.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1639-0045.

Юлия Сергеевна Бызова* – PhD, ассоциированный профессор кафедры «Химия и химические технологии», Северо-Казахстанский университет им. М. Козыбаева, г. Петропавловск, Республика Казахстан; e-mail: yuliyabyzovva@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2072-0238.

Аида Александровна Луценко – PhD, директор отдела коммерциализации Кокшетауского университета им. А. Мырзахметова, г. Кокшетау, Республика Казахстан; e-mail: l-a.13@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8047-5916.

Авторлар туралы мәліметтер

Антонина Николаевна Дюрягина – химия ғылымдарының кандидаты, «Химия және химиялық технологиялар» кафедрасының профессоры, М. Қозыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университеті, Петропавл қ., Қазақстан; e-mail: adyuryagina@inbox.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9109-8159.

Татьяна Валерьевна Ширина – «Химия және химиялық технологиялар» кафедрасының докторанты, М. Қозыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университеті, Петропавл қ., Қазақстан; e-mail: tshirina@internet.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1639-0045.

Юлия Сергеевна Бызова* – PhD, «Химия және химиялық технологиялар» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, М. Қозыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университеті, Петропавл қ., Қазақстан; e-mail: yuliyabyzovva@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2072-0238.

Аида Александровна Луценко – PhD, А. Мырзахметов атындағы Көкшетау университеті Коммерцияландыру бөлімінің директоры, Көкшетау қ., Қазақстан, e-mail: l-a.13@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8047-5916.

Received 03.02.2026
Revised 12.03.2026
Accepted 17.03.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-66

BY 4.0
Check for updates

МРНТИ: 31.27.21

Г.А. Жумаханова[1]*, С.А. Росс[2], Дж.А. Алдана-Мехия[2]
[1]Казахский национальный университет имени аль-Фараби,
050040, Республика Казахстан, г. Алматы, проспект аль-Фараби, 71
[2]Университет Миссисипи,
MS 38677, США
*e-mail: zjumahanova-96@mail.ru

ВЫДЕЛЕНИЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ FRIEDELAN-3-ONE ИЗ ДИКОРАСТУЩЕГО РАСТЕНИЯ RUMEX RECHINGERIANUS LOSINSK

Аннотация: *В статье представлены результаты исследования, посвящённого выделению и структурной идентификации тритерпеноидного соединения friedelan-3-one из дикорастущего растения Rumex rechingerianus Losinsk.*

Объектом исследования являлась надземная часть растения, собранная в период вегетации в предгорьях Заилийского Алатау (Алматинская область, Казахстан) в октябре 2022 г., ботаническая идентификация проведена совместно со специалистом РГП «Институт ботаники и фитоинтродукции» КН МОН РК. Актуальность работы обусловлена недостаточной изученностью химического состава данного эндемичного вида и необходимостью расширения сведений о тритерпеноидных соединениях природного происхождения, представляющих интерес для фитохимии и фармакогнозии.

Экстракцию биологически активных веществ проводили методом мацерации с использованием 70% этанола. Полученный экстракт концентрировали под вакуумом и подвергали фракционированию методом вакуумной жидкостной хроматографии с применением градиентной системы растворителей дихлорметан-метанол.

Дополнительное разделение целевых фракций осуществляли методом колоночной хроматографии на силикагеле, при этом контроль чистоты выделенных соединений выполняли методом тонкослойной хроматографии.

Структурную идентификацию выделенного соединения проводили с использованием ЯМР-спектроскопии (^{1}H, ^{13}C, DEPT) и газовой хроматографии с масс-спектрометрическим детектированием. Анализ совокупности спектральных данных подтвердил принадлежность соединения к тритерпеноидному ряду и позволил однозначно идентифицировать его как friedelan-3-one. Полученные результаты дополняют сведения о химическом составе Rumex rechingerianus Losinsk. и могут быть использованы при дальнейшем фитохимическом и фармакологическом изучении данного растения.

Ключевые слова: *Rumex rechingerianus, friedelan-3-one, тритерпеноиды, этанольная экстракция, VLC, колоночная хроматография.*

Введение

Растения рода Rumex (семейство Polygonaceae) являются богатым источником биологически активных соединений, включая тритерпеноиды, флавоноиды, фенольные кислоты и антрахиноны [1-3]. Тритерпеноиды проявляют широкий спектр биологической активности, включая антиоксидантное, противовоспалительное, противоопухолевое и гепатопротекторное действие [4, 5]. В последние годы растёт интерес к малоизученным эндемичным видам рода Rumex, поскольку они могут быть источником новых природных соединений с потенциальной фармакологической активностью [6, 7].

Особое внимание привлекают тритерпеноиды фриделанового ряда, включая friedelan-3-one, которые известны в ряде растений и характеризуются разнообразной биологической активностью [8, 9]. Однако в доступной научной литературе отсутствуют данные о присутствии friedelan-3-one в Rumex rechingerianus.

Таким образом, актуальным является выделение и структурная идентификация тритерпеноидов из Rumex rechingerianus, что позволит расширить знания о химическом составе эндемичного вида и оценить его потенциальную фармакологическую значимость.

©Г.А. Жумаханова, С.А. Росс, Дж.А. Алдана-Мехия, 2026

Целью настоящего исследования является выделение и структурная идентификация тритерпеноидного соединения friedelan-3-one из надземной части Rumex rechingerianus. Структура соединения была установлена на основании данных ЯМР-спектроскопии и ГХ-МС анализа.

Методы исследования

Объектом исследования являлась надземная часть дикорастущего растения Rumex rechingerianus Losinsk. Растение было собрано 8-9 октября 2022 г. собранная в период вегетации в предгорьях Заилийского Алатау (окрестности села Бескайнар, Талгарский район, Алматинская область, Казахстан). Ботаническую идентификацию проводила Шормакова К.Н., РГП «Институт ботаники и фитоинтродукции» КН МОН РК. В качестве исходного сырья использовали 100 г высушенного и измельчённого растительного материала.

Экстракцию биологически активных веществ проводили методом мацерации. Растительное сырьё экстрагировали 70% этанолом трёхкратно при комнатной температуре, продолжительность каждой экстракции составляла 24 часа. Полученные экстракты объединяли, фильтровали через воронку Бюхнера и концентрировали под вакуумом с использованием роторного испарителя. В результате было получено 8 г сухого этанольного экстракта [4, 5].

Тонкослойная хроматография (TLC)

Первичную оценку состава и чистоты экстракта проводили методом тонкослойной хроматографии на силикагелевых пластинах. В качестве подвижной фазы использовали систему растворителей дихлорметан:метанол (DCM:MeOH, 90:10). Визуализацию зон осуществляли в ультрафиолетовом свете при длинах волн 254 и 366 нм, а также с применением ванилинового реактива [6].

Вакуумная жидкостная хроматография (VLC)

Для дальнейшего разделения экстракта применяли вакуумную жидкостную хроматографию. Сухой экстракт (8 г) наносили на 200 г силикагеля. Элюирование проводили градиентом растворителей дихлорметан-метанол (DCM:MeOH) в диапазоне соотношений от 100:0 до 0:100. В результате разделения было получено 9 фракций объёмом от 200 до 400 мл каждая [7, 8].

Колоночная хроматография

Фракции 1 и 2, отобранные на основании TLC-анализа, подвергали дальнейшему разделению методом колоночной хроматографии. Для этого использовали силикагель, загрузка образца составляла 2 г. Элюирование проводили системой растворителей DCM:MeOH с изменением соотношения от 100:0 до 80:20. В результате было получено 25-31 подфракций [9, 10].

Структурная идентификация

Подфракции 25-31 были объединены и направлены на структурную идентификацию методами ЯМР-спектроскопии (^{1}H, ^{13}C, DEPT), газовой хроматографии с масс-спектрометрическим детектированием (GC-MS) и масс-спектрометрии высокой точности (HR-MS).

Измерения ЯМР проводили на Ascend 400 (BRUKER) с использованием CD_3OD (Methanol-D4). Частоты: ^{1}H – 400 МГц, ^{13}C – 100 МГц. DEPT-спектры позволили различить метильные, метиленовые и метиновые углероды.

Анализ GC-MS выполняли на Agilent 7890A с автосэмплером Agilent 7693 и масс-детектором Agilent 5975C. Капиллярная колонка: 60 м × 0,25 мм i.d., 0,25 μm, 5% фенилметилполисилоксана (HP-5MS). Газ-носитель: гелий, 1 мл/мин. Программа печи: 50°C удерживали 0,5 мин, затем 8°C/мин до 190°C, далее 4°C/мин до 280°C, удерживали 10 мин. Входной порт: 280°C, split 50:1, объём инъекции 1 μL. Mac-детектор: энергия электронов 70 eV, температуры источника, квадруполя и линии переноса – 230°C, 150°C и 280°C. Диапазон регистрации: 45-450 m/z после 8-минутной паузы растворителя. Идентификация соединений – база NIST 2.3.

Анализ совокупности данных (^{1}H, ^{13}C, DEPT, GC-MS) подтвердил принадлежность соединения к фриделановому ряду и однозначно идентифицировал его как friedelan-3-one [12, 13].

Результаты исследования

Контроль чистоты полученного соединения осуществляли методом тонкослойной хроматографии подфракций 25-31, полученных после колоночной хроматографии фракций 1

и 2 вакуумной жидкостной хроматографии. Анализ проводили в системе растворителей дихлорметан:метанол (DCM:MeOH, 90:10). На хроматограммах подфракций 25-31 наблюдалась одна основная зона, что указывает на высокую степень однородности выделенного соединения (рис. 1).

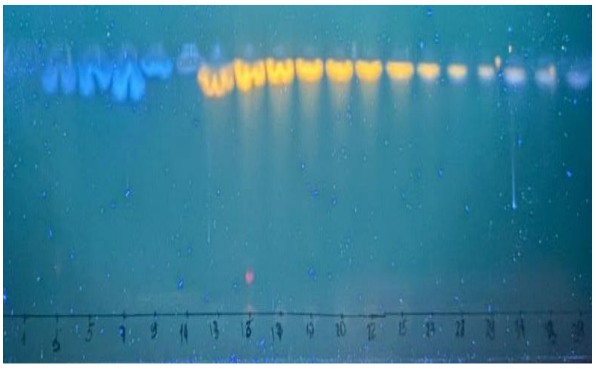


Рисунок 1 – TLC-хроматограмма подфракций 25-31
(DCM:MeOH = 90:10; визуализация в УФ-свете)

Вакуумная жидкостная хроматография этанольного экстракта позволила получить девять фракций. На основании данных TLC фракции 1 и 2 были отобраны для дальнейшего разделения методом колоночной хроматографии. В результате дополнительного разделения были получены подфракции 25-31, которые были объединены и направлены на дальнейшие спектроскопические исследования. После объединения указанных подфракций было выделено 87,7 мг индивидуального соединения friedelan-3-one, что соответсвует выходу 0,0877% от массы исходного растительного сырья.

Структурную характеристику изолированного соединения проводили методом одномерной ЯМР-спектроскопии (^{1}H, ^{13}C, DEPT). В ^{1}H ЯМР-спектре зарегистрированы характерные сигналы метильных групп в области δ 0,7-1,2 м.д. В ^{13}C ЯМР-спектре наблюдался сигнал карбонильного атома углерода в области δ ≈ 213 м.д. (рис. 2-4).

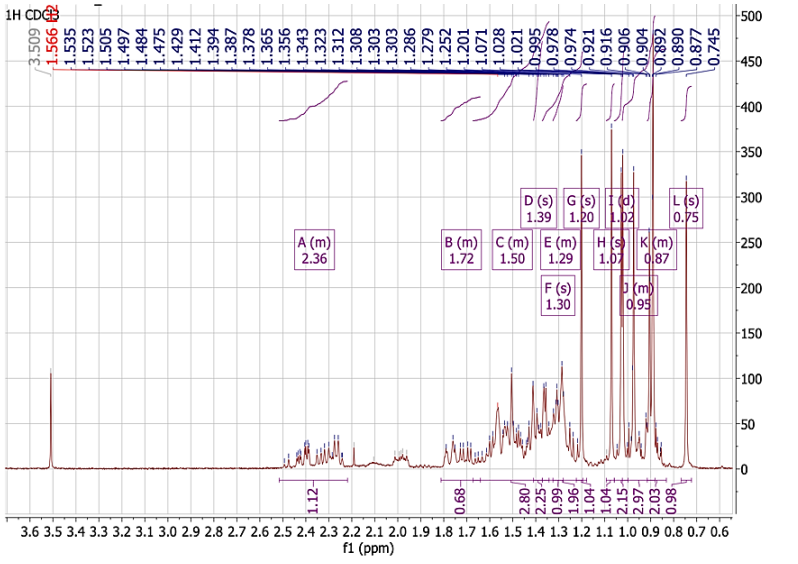


Рисунок 2 – ^{1}H ЯМР-спектр соединения friedelan-3-one, выделенного из подфракций 25-31 Rumex rechingerianus Losinsk

Данные газовой хроматографии с масс-спектрометрическим детектированием подтвердили структурную идентификацию выделенного соединения как friedelan-3-one. На ГХ-МС хроматограмме выделенного соединения наблюдался основной пик, что свидетельствует о степени его чистоты (рис. 5).

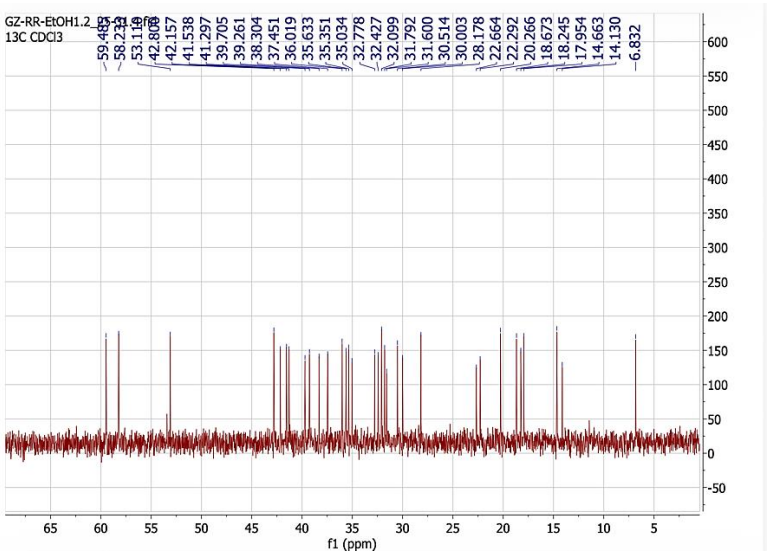


Рисунок 3 – ^{13}C ЯМР-спектр соединения friedelan-3-one, выделенного из подфракций 25-31 Rumex rechingerianus Losinsk

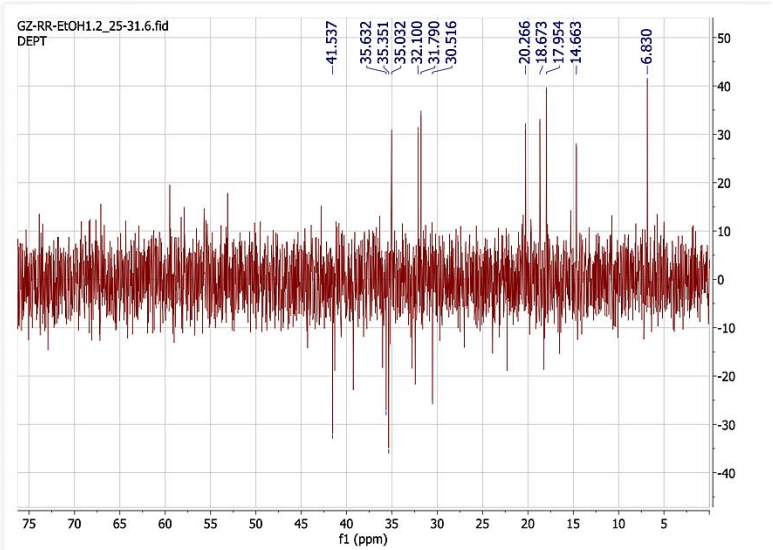


Рисунок 4 – DEPT ЯМР-спектр соединения friedelan-3-one, выделенного из подфракций 25-31 Rumex rechingerianus Losinsk

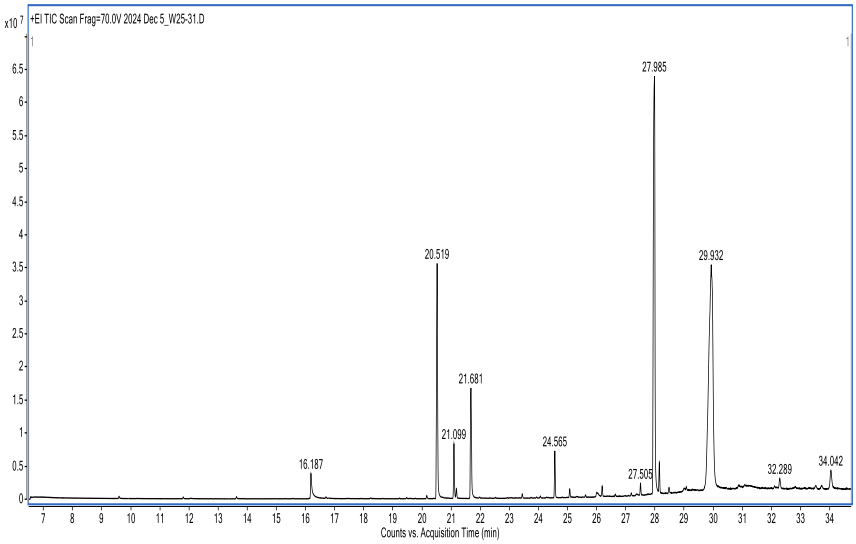


Рисунок 5 – ГХ-МС хроматограмма выделенного соединения friedelan-3-one

Масс-спектр данного пика характеризовался наличием характерных фрагментных ионов, типичных для тритерпеноидов фриделанового ряда. Полученные масс-спектрометрические данные согласуются с литературными данными для friedelan-3-one и подтверждают результаты ЯМР-спектроскопического анализа (рис. 6).

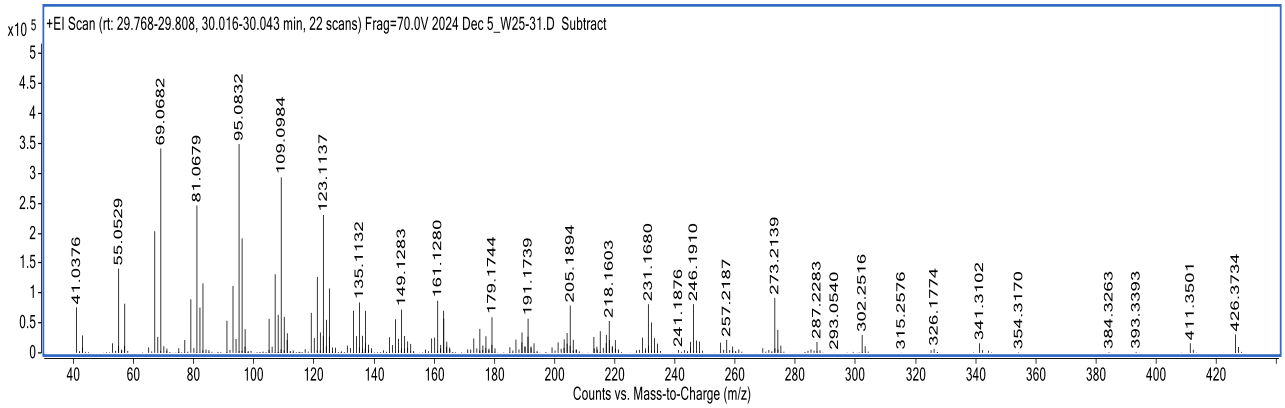


Рисунок 6 – Масс-спектр исследуемого соединения friedelan-3-one

Обсуждение научных результатов

Выделение и идентификация friedelan-3-one продемонстрировали эффективность комбинации методов TLC, VLC, колоночной хроматографии, ГХ-МС и ЯМР-спектроскопии. Чистота выделенного соединения подтверждена наличием основного пика на хроматограмме и характерными масс-спектральными фрагментами, согласующимися с литературными данными [8, 9].

Результаты ЯМР-спектроскопии (^{1}H, ^{13}C, DEPT) подтвердили структурные особенности фриделанового скелета, включая метильные группы и карбонильную функцию, что соответствует описанным для соединений фриделанового ряда [8, 9]. Отсутствие дополнительных сигналов указывает на высокую степень очистки и правильность применённой методики выделения.

Обнаружение friedelan-3-one в Rumex rechingerianus является первым подтверждением присутствия данного тритерпеноидного соединения в этом эндемичном виде, что расширяет представления о химическом составе рода Rumex [8, 10]. Подобные соединения ранее идентифицированы в других видах рода Rumex и обладают разнообразной биологической активностью, включая антиоксидантное, противовоспалительное и гепатопротекторное действие [4, 5, 9].

Полученные результаты демонстрируют, что Rumex rechingerianus способен синтезировать тритерпеноиды фриделанового ряда, аналогично другим представителям рода, что имеет значение для дальнейших хемотаксономических и фармакологических исследований [8, 11].

Заключение

Проведённое исследование позволило выделить и идентифицировать тритерпеноидное соединение friedelan-3-one из надземной части Rumex rechingerianus Losinsk. Из 100 г высушенного растительного сырья было получено 87,7 мг соединения, что соответствует выходу 0,0877 %.

Структура соединения подтверждена одномерной ЯМР-спектроскопией (^{1}H, ^{13}C, DEPT) и ГХ-МС анализом, что соответствует литературным данным для тритерпенов фриделанового ряда [8,9]. Полученные результаты расширяют сведения о фитохимическом составе вида, подтверждают способность представителей рода Rumex синтезировать тритерпеноиды фриделанового ряда и создают основу для дальнейших фитохимических, хемотаксономических и фармакологических исследований.

Список литературы

1. Rodrigues E. Pharmacovigilance of Herbal Medicines: The Potential Contributions of Ethnobotanical and Ethnopharmacological Studies / E. Rodrigues, J. Barnes // Drug Saf. – 2013. – № 36. – P. 1-12. https://doi.org/10.1007/s40264-012-0005-7.

2. Elshafie HS. A Comprehensive Review on the Biological, Agricultural and Pharmaceutical Properties of Secondary Metabolites Based-Plant Origin / HS. Elshafie, I. Camele, AA. Mohamed // Int J Mol Sci. – 2023. – № 24. – P. 3266. https://doi.org/10.3390/ijms24043266.
3. Ekor M. The Growing Use of Herbal Medicines: Issues Relating to Adverse Reactions and Challenges in Monitoring Safety / M. Ekor // Front Pharmacol. – 2014. – № 4. – P. 177. https://doi.org/10.3389/fphar.2013.00177.
4. Newman D.J. Natural Products as Sources of New Drugs over the Nearly Four Decades from 01/1981 to 09/2019 / D.J. Newman, G.M. Cragg // J. Nat. Prod. – 2020. – № 83. – P. 770-803. https://doi.org/10.1021/acs.jnatprod.9b01285.
5. Balunas M.J. Drug Discovery from Medicinal Plants / M.J. Balunas, A.D. Kinghorn // Life Sci. – 2005. – № 78. – P. 431-441.
6. Intraspecific Directed Deterrence by the Mustard Oil Bomb in a Desert Plant / M. Samuni-Blank et al // Curr. Biol. – 2012. – № 22. – P. 1218-1220.
7. Savithramma N. Screening of Medicinal Plants for Secondary Metabolites / N. Savithramma, M.L. Rao, D. Suhrulatha // Middle-East J. Sci. Res. – 2011. – № 8. – P. 579-584.
8. The Genus Rumex (Polygonaceae): An Ethnobotanical, Phytochemical and Pharmacological Review / J.J. Li et al // Nat. Prod. Bioprospect. – 2022. – № 12. – P. 21. https://doi.org/10.1007/s13659-022-00346-z.
9. Characterization, Antioxidant and Protective Effects of Edible Rumex roseus on Erythrocyte Oxidative Damage Induced by Methomyl / M. Chelly et al // Food Meas. Charact. – 2020. – № 14. – P. 229-243.
10. Rumex dentatus L. Phenolics Ameliorate Hyperglycemia by Modulating Hepatic Key Enzymes of Carbohydrate Metabolism, Oxidative Stress and PPARγ in Diabetic Rats / R.H. Elsayed et al // Food Chem. Toxicol. – 2020. – № 138. – P. 111202.
11. Investigating the Antiangiogenic Potential of Rumex vesicarius (Humeidh), Anticancer Activity in Cancer Cell Lines and Assessment of Developmental Toxicity in Zebrafish Embryos / M. Farooq et al // Saudi J. Biol. Sci. – 2020. – № 27. – P. 611-622.
12. α-Glucosidase and Glycation Inhibitory Activities of Rumex lunaria Leaf Extract: A Promising Plant against Hyperglycaemia-Related Damage / F. Guglielmina et al // Nat. Prod. Res. – 2020. – № 34. – P. 3418-3422.
13. Chapin F.S. The ecology and economics of storage in plants / F.S. Chapin, E.D. Schulze, H.A. Mooney, // Annu. Rev. Ecol. Syst. – 1990. – № 21. – P. 423-447.

Г.А. Жумаханова[1]*, С.А. Росс[2], Дж.А. Алдана-Мехия[2]
[1]Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,
050040, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Әл-Фараби даңғылы, 71
[2]Миссисипи университеті,
MS 38677, АҚШ
*e-mail: zjumahanova-96@mail.ru

RUMEX RECHINGERIANUS LOSINSK ЖАБАЙЫ ӨСІМДІГІНЕН FRIEDELAN-3-ONE ҚОСЫЛЫСЫН БӨЛУ ЖӘНЕ ИДЕНТИФИКАЦИЯЛАУ

Мақалада жабайы өсетін Rumex rechingerianus Losinsk. өсімдігінен friedelan-3-one тритерпеноидты қосылысын бөліп алу және оның құрылымын сәйкестендіру нәтижелері ұсынылған.

Зерттеу нысаны 2022 жылдың қазан айында Іле Алатауы (Алматы облысы, Қазақстан) бөктерінде вегетациялық кезеңде жиналған өсімдіктің жер үсті бөлігі болды, ботаникалық сәйкестендіру ҚР БҒМ ҒК «Ботаника және фитоинтродукция институты» РМК маманымен бірлесіп жүргізілді.

Жұмыстың өзектілігі осы эндемикалық түрдің химиялық құрамының жеткіліксіз зерттелуіне және Фитохимия мен фармакогнозияға қызығушылық тудыратын табиғи тектес тритерпеноидты қосылыстар туралы ақпаратты кеңейту қажеттілігіне байланысты.

Биологиялық белсенді заттарды экстракциялау 70% этанолды қолдану арқылы мацерация әдісімен жүргізілді. Алынған экстракт вакуум жағдайында қоюландырылып, дихлорметан-метанол еріткіштер жүйесінің градиентін пайдалана отырып вакуумдық сұйықтық хроматографиясы әдісімен фракцияланды.

Мақсатты фракцияларды қосымша бөлу силикагельде бағаналық хроматография әдісімен жүзеге асырылды, ал бөлінген қосылыстардың тазалығы жұқа қабатты хроматография әдісімен бақыланды.

Бөлініп алынған қосылыстың құрылымын сәйкестендіру ^{1}H, ^{13}C және DEPT ЯМР-спектроскопиясы, сондай-ақ масс-спектрометриялық детектормен жабдықталған газдық хроматография әдістерін қолдану арқылы жүргізілді. Спектрлік деректердің жиынтық талдауы алынған қосылыстың тритерпеноидтар қатарына жататынын растады және оның friedelan-3-one екендігін бірмәнді түрде анықтауға мүмкіндік берді.

Алынған нәтижелер Rumex rechingerianus Losinsk. өсімдігінің химиялық құрамы туралы мәліметтерді толықтырады және оны әрі қарай фитохимиялық және фармакологиялық тұрғыда зерттеуге негіз бола алады.

Түйін сөздер: *Rumex rechingerianus, friedelan-3-one, тритерпеноидтар, этанолдық экстракция, VLC, колонкалық хроматография.*

Г.А. Жумаханова[1]*, S.A. Ross[2], J.A. Aldana-Mejia[2]
[1]Al-Farabi Kazakh National University,
050040, Republic of Kazakhstan, Almaty, 71 Al-Farabi Avenue
[2]University of Mississippi,
MS 38677, USA
*e-mail: zjumahanova-96@mail.ru

ISOLATION AND IDENTIFICATION OF FRIEDELAN-3-ONE FROM THE WILD PLANT RUMEX RECHINGERIANUS LOSINSK

The article presents the results of a study focused on the isolation and structural identification of the triterpenoid compound friedelan-3-one from the wild-growing plant Rumex rechingerianus Losinsk.

The object of the study was the aboveground part of the plant, collected during the growing season in the foothills of the Trans-Ili Alatau (Almaty region, Kazakhstan) in October 2022. The botanical identification was carried out jointly with a specialist from the RSE "Institute of Botany and Phytointroduction" of the National Research University of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan. The relevance of the work is due to the insufficient knowledge of the chemical composition of this endemic species and the need to expand information on triterpenoid compounds of natural origin, which are of interest to phytochemistry and pharmacognosy.

Extraction of biologically active substances was carried out by maceration using 70% ethanol. The obtained extract was concentrated under reduced pressure and subjected to fractionation by vacuum liquid chromatography using a gradient system of dichloromethane-methanol.

Further separation of the target fractions was performed by column chromatography on silica gel, while the purity of the isolated compounds was monitored by thin-layer chromatography.

Structural identification of the isolated compound was carried out using NMR spectroscopy (^{1}H, ^{13}C, DEPT) and gas chromatography-mass spectrometry. Analysis of the combined spectral data confirmed that the isolated compound belongs to the triterpenoid class and allowed its unambiguous identification as friedelan-3-one. The obtained results supplement existing data on the chemical composition of Rumex rechingerianus Losinsk and provide a basis for further phytochemical and pharmacological studies of this species.

Key words: *Rumex rechingerianus, friedelan-3-one, triterpenoids, ethanol extraction, VLC, column chromatography.*

Авторлар туралы мәліметтер

Гульнур Адильжановна Жумаханова* – PhD докторант, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті; e-mail: zjumahanova-96@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-7139-2478.

Дженнифер А. Алдана-Мехиа – PhD, зерттеу биологы, биомолекулалық ғылымдар бөлімі, Миссисипи университеті, Фармация мектебі, Тед Кокран зерттеу орталығы, MS 3877-1848, АҚШ; e-mail: jaaldana@olemiss.edu. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0736-1899.

Самир Анис Росс – PhD, Миссисипи университетінің Фармация мектебінде фармакогнозия бойынша профессоры, С.Ж. Асфендияров атындағы Қазақ ұлттық медицина университетінің құрметті профессоры, Асьют университетінің Фармация мектебінде фармакогнозия бойынша профессоры; e-mail: sross@olemiss.edu. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3807-1299.

Information about the authors

Gulnur Adilzhanovna Zhumakhanova* – PhD candidate, Al-Farabi Kazakh National University; e-mail: zjumahanova-96@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-7139-2478.

Jennifer A. Aldana-Mejia – PhD, Research Biologist, Department of Biomolecular Sciences, School of Pharmacy, University of Mississippi, Ted Cochran Research Center, MS 3877-1848, USA; e-mail: jaaldana@olemiss.edu. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0736-1899.

Samir Anis Ross – PhD, Professor of Pharmacognosy in the School of Pharmacy at the University of Mississippi, Distinguished Professor, S.Zh. Asfendiyarova, Professor of Pharmacognosy at the School of Pharmacy, Assiut University; e-mail: sross@olemiss.edu; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3807-1299.

Сведения об авторах

Гульнур Адильжановна Жумаханова* – докторант PhD, Казахский национальный университет имени аль-Фараби; e-mail: zjumahanova-96@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-7139-2478.

Дженифер А. Алдана-Мехия – PhD, биолог-исследователь кафедры биомолекулярных наук, фармацевтический факультет, университет Миссисипи, Исследовательский центр Тэда Кокрана, MS 3877-1848, США; e-mail: jaaldana@olemiss.edu. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0736-1899.

Самир Анис Росс – PhD, профессор по фармакогнозии в Школе фармации университета Миссисипи, почетный профессор Казахского национального медицинского университета имени С.Ж. Асфендиярова, профессор по фармакогнозии в Школе фармации Асьютского университета; e-mail: sross@olemiss.edu. ORCID: https ://orcid.org/0000-0002-3807-1299.

Поступила в редакцию 30.01.2026
Поступила после доработки 13.03.2026
Принята к публикации 16.03.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-67

МРНТИ: 61.31.41; 61.31.51

CC BY 4.0
Check for updates

Г.М. Сейтмагзимова[1], Ж.С. Серікбаева[1]*, Е.А. Полтанова[2], Л.А. Сейтмагзимова[3], Р.Р. Якубова[1]

[1]Южно-Казахстанский университет имени М. Ауэзова,
160012, Республика Казахстан, г. Шымкент, пр. Тауке хана, 5
[2]ТФ ТОО «Казфосфат» «Минеральные удобрения»,
Республика Казахстан, г. Тараз, ул. Ниеткалиева,128
[3]Алматинский технологический университет,
Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Толе би,100
*e-mail: Zhursinay.Serikbaeva@mail.ru

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ КРИСТАЛЛОВ И ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОСФОГИПСА В ДИГИДРАТНОМ И ПОЛУГИДРАТНОМ СПОСОБАХ ПОЛУЧЕНИЯ ЭКСТРАКЦИОННОЙ ФОСФОРНОЙ КИСЛОТЫ

Аннотация: *Проблема утилизации и хранения фосфогипса, образующегося в производстве экстракционной фосфорной кислоты (ЭФК), является чрезвычайно актуальной, так как связана с экологическими проблемами загрязнения водоемов, земель и атмосферы. Накопление фосфогипса в огромных масштабах требует разработки эффективных методов его переработки. Основным требованием для химической переработки фосфогипса является его гранулометрический состав, прежде всего - размер и форма кристаллов. В работе изучено влияние режима получения ЭФК и соотношения жидкой и твёрдой фаз (Ж:Т) на химический состав, размер и габитус кристаллов и фильтрующие свойства фосфогипса. Получение фосфогипса осуществляли дигидратным и полугидратным способами при Ж:Т=2,5:1 и 3:1 в лабораторных условиях и в условиях технологического процесса в Таразском филиале «Минеральные удобрения» компании «Казфосфат». Состав и морфология образцов изучены рентген-флуоресцентным и рентгенофазовым методами и электронной микроскопией. Рентген-дифракционным анализом идентифицировано наличие мелкодисперсного ангидрита, вызывающего снижение фильтруемости осадка фосфогипса, полученного в производственных условиях при температурах*

©Г.М. Сейтмагзимова, Ж.С. Серікбаева, Е.А. Полтанова, Л.А. Сейтмагзимова, Р.Р. Якубова, 2026

90-95ºС. Установлено, что проведение экстракции в дигидратном режиме при Ж:Т=3:1 способствует образованию более крупных однородных, изометричных кристаллов гипса и обеспечивает максимальную производительность фильтрования. Результаты исследования могут быть использованы для оптимизации производства ЭФК.

Ключевые слова: *фосфогипс; экстракционная фосфорная кислота; дигидратный и полугидратный методы; фильтрование; размер кристаллов.*

Введение. В XXI веке стремительное расширение современных аграрных технологий и промышленного производства обусловило интенсивное развитие фосфорной химической промышленности, что, в свою очередь, спровоцировало беспрецедентное увеличение масштабов образования фосфогипса (ФГ) как твердого побочного продукта [1]. Образующийся дигидрат или полугидрат сульфата кальция является многотоннажным и весьма обременительным отходом производства удобрений. Мировая промышленность фосфорных удобрений производит более 230 миллионов тонн фосфогипса в год, и ожидается, что это количество увеличится в ответ на растущий спрос на продукты питания. В настоящее время ФГ накоплен в количествах, превышающих 6 миллиардов тонн, что создает серьезные экологические и экономические проблемы [2].

В условиях интенсивного развития химической промышленности Казахстана особое значение приобретает проблема образования и накопления фосфогипса. Основным источником его образования является производство аммофоса в Таразском филиале ТОО «Казфосфат» «Минеральные удобрения», где при производстве около 500 тыс. тонн аммофоса ежегодно образуется порядка 1,3 млн тонн ФГ. Согласно проектным данным, при достижении полной мощности предприятия, составляющей около 1 млн тонн удобрений в год, потенциальный объем побочного продукта возрастает приблизительно до 2,7 млн тонн в год, что демонстрирует масштабность проблемы накопления этого техногенного сырья [3]. До настоящего времени в отвалах, расположенных в зоне промышленного узла Тараза, накоплено более 17 млн тонн фосфогипса (рис. 1, 2), что подтверждается региональными экологическими службами и органами местного самоуправления [4].

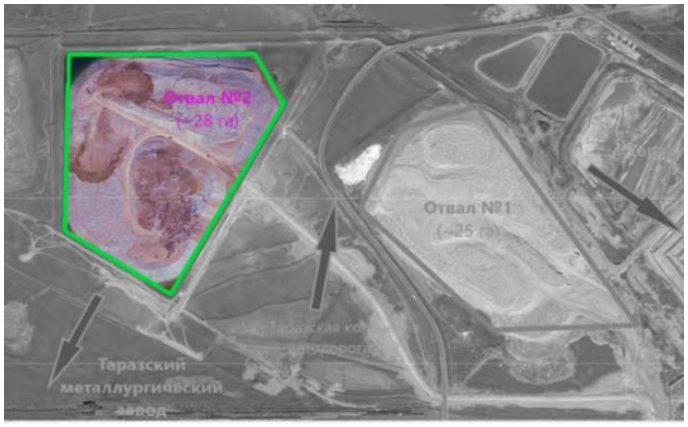


Рисунок 1 – Схема накопленных отвалов ФГ (отвал № 1 – ~25 га; отвал № 2 – ~28 га), расположенные на территории промышленного узла г. Тараз [4].



Рисунок 2 – Фото отвала ФГ №1 на территории промышленного узла г. Тараз, 14 января 2026 г.

В то же время это обусловливает значительную нагрузку на территорию, степень переработки остается небольшой, примерно около 9% годового образования. Фосфогипс не находит широкого применения, что требует разработки новых технологий его переработки в качестве вторичного минерального ресурса и образования устойчивого рынка его потребления. К основным факторам, ограничивающим применение ФГ, относятся высокая гигроскопичность и содержащиеся в его составе примеси, усложняющие его транспортировку, поскольку находятся в тесной взаимосвязи с условиями окружающей среды – относительной влажностью и температурой воздуха [5].

Экстракционная фосфорная кислота (ЭФК) является важным продуктом химической промышленности. Основная реакция получения ЭФК описывается уравнением:

$$Ca_5F(PO_4)_3+5H_2SO_4+5nH_2O=3H_3PO_4+5CaSO_4\cdot nH_2O+HF \quad (1)$$

для n=2 или 0,5

Сульфат кальция может кристаллизоваться в виде дигидрата $CaSO_4\cdot 2H_2O$, полугидрата $CaSO_4\cdot 0{,}5H_2O$ или безводного ангидрита. В зависимости от этого процесс можно вести дигидратным, полугидратным или ангидритным способами при разных температурах с получением фосфорной кислоты разной концентрации. Ангидритный метод практически не используется ввиду образования мелких нефильтруемых кристаллов и сильной коррозии оборудования при высокой температуре. Объём воды определяется преимущественно требованиями экстракции фосфорной кислоты из сырья и необходимостью обеспечения заданной текучести пульпы и концентрации кислоты, а не только степенью гидратации образующегося сульфата кальция [6, 7].

Для оптимизации процесса сернокислотной экстракции часто применяется разделение стадий разложения фосфатного сырья и кристаллизации сульфата кальция, что способствует существенному повышению степени извлечения P_2O_5 в раствор. В этом случае процесс протекает последовательно через стадии:

$$Ca_5F(PO_4)_3+10H_3PO_4=5Ca(H_2PO_4)_2+3H_3PO_4+HF \quad (2)$$

$$Ca(H_2PO_4)_2+H_2SO_4+nH_2O=CaSO_4\cdot nH_2O+2H_3PO_4 \quad (3)$$

Основная доля производимой фосфорной кислоты приходится на дигидратный метод [8-10], позволяющий получать в зависимости от качества перерабатываемого сырья кислоту с содержанием 22-32% P_2O_5. Также реализуются смешанные режимы дигидратно-полугидратный или полугидратно-дигидратный, предусматривающие последовательное образование одной гидратной формы и её дальнейшую трансформацию в другую с целью оптимизации производительности и улучшения фильтруемости гипса [11, 12].

Экстракция фосфорной кислоты и её отделение от сульфата кальция представляют собой взаимозависимые стадии единой технологической системы, где нарушение одного процесса негативно влияет на другой. Ухудшение кристаллообразования сульфата кальция в экстракторе снижает степень отмывки кислоты из осадка и изменяет концентрацию получаемых фильтратов [6]. Размер и морфология кристаллов ФГ критически влияют на фильтрацию. Образование мелкодисперсных кристаллов ухудшает фильтруемость за счет забивания пор фильтровальной ткани [13]. Существуют различные подходы к контролю размерных и морфологических характеристик частиц ФГ [14, 15].

Фосфогипс, в основном состоящий из дигидрата сульфата кальция ($CaSO_4\cdot 2H_2O$), содержит более 10% нерастворимого остатка в виде кварцита, а также солей алюминия, железа, фтора, тяжелых металлов, радиоактивных веществ и других примесей, которые могут непредсказуемо влиять на качество продуктов, получаемых утилизацией ФГ [16, 17]. К кристаллическим продуктам, получаемым в промышленных условиях, предъявляются определенные требования, прежде всего по размеру и форме кристаллов и чистоте. Крупные кристаллы легче отфильтровываются, промываются и высушиваются и удерживают меньше влаги [18]. Таким образом, перед использованием ФГ в качестве сырья для получения других продуктов необходимо подробно изучить фильтрующие свойства путем сравнительного анализа морфологии кристаллов гипса и полугидрата сульфата кальция, что и является целью данной работы. Новизной исследования является определение оптимальных условий сернокислотного разложения фосфоритов месторождения Кистас, обеспечивающих высокую производительность фильтрования и образование крупнодисперсного фосфогипса с

минимальным содержанием примесей для возможности использования его при получении других неорганических продуктов.

Материалы и методы исследований

В качестве исходного сырья использована фосфоритная мука месторождения Кистас, предоставленная заводом «Минеральные удобрения». Состав фосфорита, определенный электронной микроскопией и рентген-флуоресцентным методом, демонстрирует практически одинаковые значения. Фосфорит содержит 26,77% P_2O_5, 44,03% CaO, 15,53% SiO_2, 1,51% Al_2O_3, 0,98% Fe_2O_3 и 2,07% MgO; согласно данного состава фосфатное сырье относится к богатым фосфоритам. Объектами исследования являлись образцы фосфогипса, полученные разложением фосфоритной муки дигидратным и полугидратным способами в лабораторных условиях, а также промышленная пульпа, отобранная в реакторах разложения и дозревания.

Экспериментальная часть

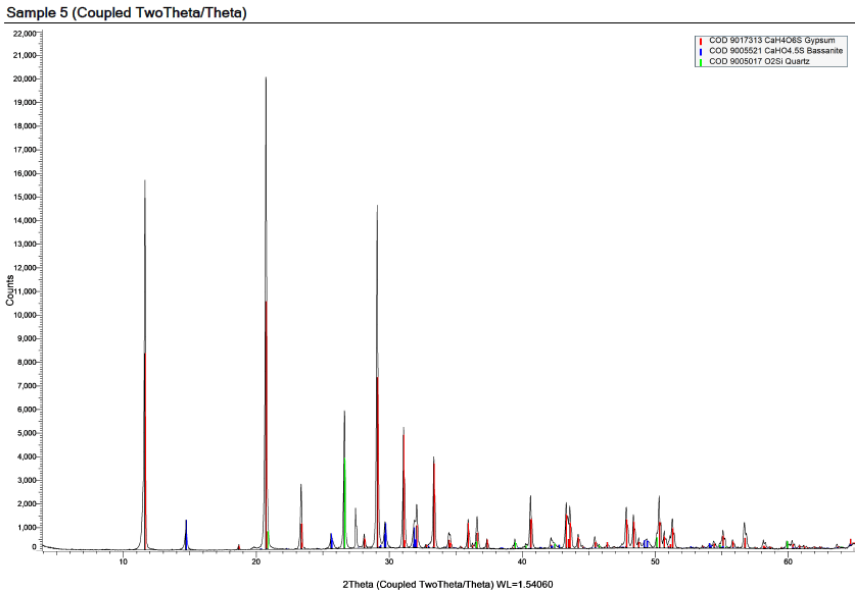
Экспериментальные исследования проводили в соответствии с методикой получения экстракционной фосфорной кислоты, основанной на двухстадийном сернокислотном разложении фосфатного сырья в соответствии с уравнениями реакций (2) и (3) и расходными коэффициентами по сырью сырью [19]. Дигидратный режим поддерживали при температуре 70°C, характерной для данного режима, полугидратный режим - при температуре 90°C, что обеспечивало образование полугидратной формы сульфата кальция. Для обеспечения подвижности экстракционной пульпы и формирования хорошо фильтрующих кристаллов ФГ соотношение жидкой и твердой фаз (Ж:Т) поддерживали в диапазоне 2,5:1-3:1 с использованием раствора разбавления.

Процесс включает стадию предварительного взаимодействия фосфатного сырья с раствором разбавления в течение 30 минут с последующим вводом концентрированной серной кислоты в раствор монокальцийфосфата с образованием фосфорной кислоты и кристаллогидрата сульфата кальция (фосфогипса). Экстракцию осуществляли в течение 3 часов для завершения роста кристаллов ФГ в термостатированном реакторе объемом 500 мл, оснащённом механической мешалкой.

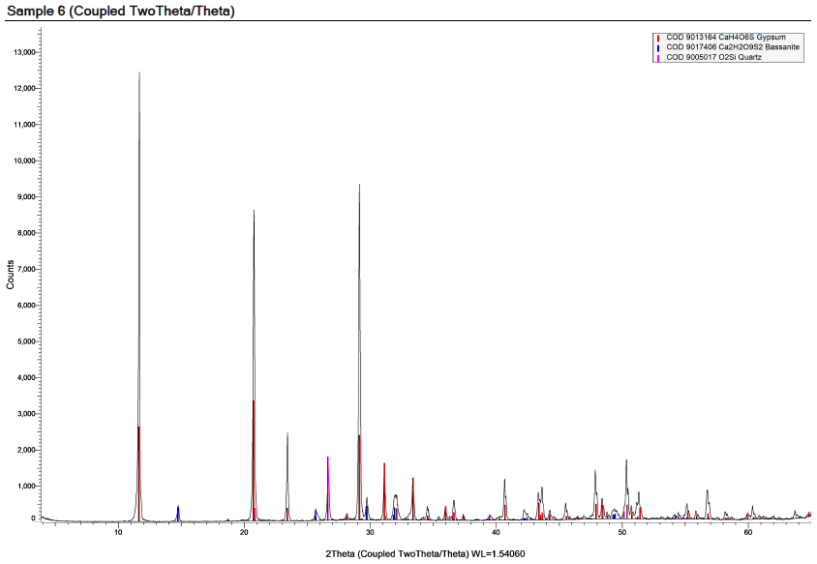
Полученную суспензию разделяли на ЭФК и осадок ФГ на вакуум-фильтровальной установке под вакуумом 0,06 МПа. Твердый побочный продукт отмывали горячей водой от кислоты. Аналогично осуществляли фильтрование промышленных пульп, отобранных в реакторах разложения и дозревания. По результатам фильтрования определяли производительность фильтрования фосфорно-кислотной суспензии по влажному неотмытому осадку и по фильтрату. В процессе исследования получили ряд образцов фосфогипса, состав и структура которых идентифицирована методами рентген-флуоресцентного, рентген-дифракционного, ИК-спектроскопического анализа и сканирующей электронной микроскопии. Достоверность полученных результатов подтверждается применением для анализа дифрактометра XRF Bruker S8 Tiger, XRF PANalytical Axios max и XRD Bruker D8 Endeavor (Германия) с обработкой полученных данных дифрактограмм и расчетом межплоскостных расстояний с помощью программного обеспечения EVA, а также Растрового электронного микроскопа JEOL JSM-6490LV (Япония), ИК-Фурье спектрометра Shimadzu IR-Prestige (Япония), а также рентгено-флуоресцентного спектрометра S8 Tiger и PANalytical Axios (Германия).

Результаты и обсуждение

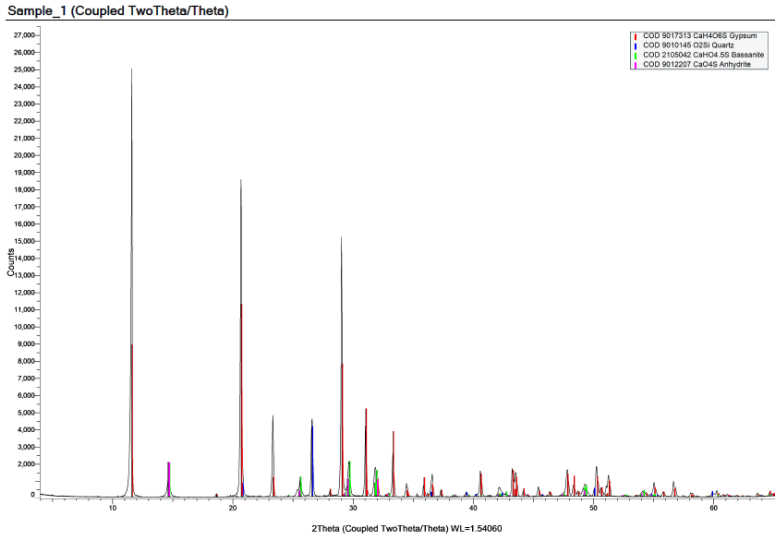
На рисунке 3 представлены дифрактограммы образцов ФГ, сформированных в различных технологических режимах. Рентгенофазовый анализ показал, что все четыре образца фосфогипса имеют близкий минеральный состав. Однако в составе проб, полученных в лабораторных условиях дигидратным и полугидратным методами, присутствуют только минералы гипс (преимущественно) в виде сульфата кальция в дигидратной форме, бассанит (полугидрат) и кварц (рис. 3a, 3b), тогда как в образцах ФГ, полученного фильтрованием пульпы из реакторов разложения и дозревания, присутствует преимущественно минерал ангидрит (рис. 3c, 3d). Наличие данного минерала свидетельствует о высокотемпературном режиме кристаллизации и, как следствие, об образовании мелкодисперных кристаллов безводного сульфата кальция, которые приводят к забиванию пор фильтроткани и снижению фильтруемости осадка.


Sample 5 (Coupled TwoTheta/Theta)
COD 9017313 CaH4O6S Gypsum
COD 9005521 CaHO4.5S Bassanite
COD 9005017 O2Si Quartz
Counts
2Theta (Coupled TwoTheta/Theta) WL=1.54060

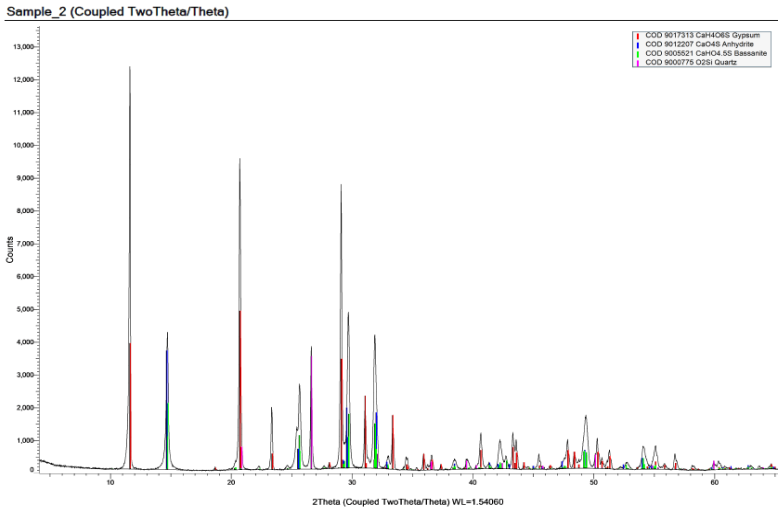
a


Sample 6 (Coupled TwoTheta/Theta)
COD 9013184 CaH4O6S Gypsum
COD 9017406 Ca2H2O9S2 Bassanite
COD 9005017 O2Si Quartz
Counts
2Theta (Coupled TwoTheta/Theta) WL=1.54060

b


Sample_1 (Coupled TwoTheta/Theta)
COD 9017313 CaH4O6S Gypsum
COD 9010145 O2Si Quartz
COD 2105042 CaHO4.5S Bassanite
COD 9012207 CaO4S Anhydrite
Counts
2Theta (Coupled TwoTheta/Theta) WL=1.54060

c



d

Рисунок 3 – Дифрактограммы образцов фосфогипса, полученного:
a – в дигидратном режиме, b – в полугидратном режиме, c – из реактора разложения,
d – из реактора дозревания

В условиях производства процесс получения ЭФК при температурах 90-95°С протекает практически в полугидратном режиме, хотя в документации цеха он классифицируется как дигидратный. Расхождение между фактическими и регламентированными параметрами связано с фазовыми превращениями в процессе кристаллизации ФГ и снижением его фильтруемости. Известно [18], что при проведении экстракции в температурном интервале 90-95ºС в слабых фосфорно-кислотных растворах происходит фазовое превращение метастабильного полугидрата сульфата кальция в стабильный мелкодисперсный ангидрит, что и вызывает забивание пор фильтровальной ткани и ухудшение фильтрующих свойств осадка.

Рентген-флуоресцентный анализ образцов ФГ, полученных с реакторов, показал, что содержание основных компонентов находится в интервале 38,9-40,9 % CaO и 43,6-48,2 % SO_3, тогда как для фосфогипса, полученного в лабораторных условиях, эти значения отличаются и составляют 42,4-43,1% CaO и 35,3-33,1 % SO_3 (табл. 1). Такое соотношение связано с проведением разложения в производственных условиях в сульфатном режиме. Низкое содержание P_2O_5 (0,74-0,85 %) во всех образцах указывает на эффективную отмывку ЭФК и минимальный переход фосфора в твёрдую фазу. Нерастворимые примеси SiO_2 (11,0-14,6%), Al_2O_3 (0,22-0,37%) и Fe_2O_3 (0,26-0,20%) обусловлены минеральной составляющей исходной фосфоритной муки. Оксиды MgO, Na_2O и K_2O присутствуют в малых количествах и не оказывают существенного влияния на фазовый состав продукта. Содержание тяжёлых металлов (PbO, ZnO, CuO, NiO) находится на уровне ≤0,01 %, что свидетельствует об их незначительном накоплении в фосфогипсе.

Таблица 1 – Результаты рентген-флуоресцентного анализа образцов фосфогипса

Содержание компонента, %	Фосфоритная мука	Фосфогипс с разложения	Фосфогипс с дозревания	Фосфогипс, полученный в дигидратном режиме (Ж:Т=3:1)	Фосфогипс, полученный в полугидратном режиме (Ж:Т=3:1)
P_2O_5	26,766	0,854	0,742	0,830	0,678
SiO_2	15,526	13,156	11,015	13,967	14,601
Al_2O_3	1,511	0,373	0,220	0,769	0,948
Fe_2O_3	0,982	0,263	0,195	0,355	0,348
CaO	44,025	40,886	38,957	42,427	43,106
MgO	2,074	0,005	-0,009	0,065	0,085
SO_3	0,769	43,550	48,159	35,274	33,089
Na_2O	0,623	0,056	0,071	0,174	0,190
K_2O	0,648	0,310	0,271	0,513	0,438
TiO_2	0,205	0,353	0,232	0,514	0,286
Mn_3O_4	0,116	0,015	0,014	0,040	0,031

Химический состав образцов фосфогипса подтверждается элементным анализом, определенным на растровом электронном микроскопе (табл. 2). Так, содержание фосфора в пересчете на P_2O_5 также находится в интервале 0,4-0,8%, что свидетельствует о высоком коэффициенте извлечения фосфора в раствор и эффективности отмывки ФГ от кислоты.

Таблица 2 – Элементный анализ образцов фосфогипса

Элемент, %	Ж:Т = 2,5:1		Ж:Т = 3:1		Фосфогипс с разложения	Фосфогипс с дозревания
	дигидратный режим	полугидратный режим	дигидратный режим	полугидратный режим		
C	6,17	2,00	5,13	4,60	5,14	5,49
O	51,87	48,57	52,37	52,93	50,70	48,44
Na	0,11	0	0	0	0,12	0,13
Mg	0,07	0,15	0,07	0	0	0
Al	0,25	0,26	0,39	0,33	0,24	0,11
Si	2,50	3,15	3,37	4,07	3,82	2,88
P	0,37	0,22	0,22	0,82	0,17	0,16
S	16,58	19,85	16,63	15,27	17,04	18,60
K	0,10	0,09	0,17	0,18	0,12	0
Ca	22,00	25,49	21,46	21,55	23,55	24,30
Fe	0	0,23	0,20	0,24	0,15	0

С помощью сканирующего электронного микроскопа изучена структура и морфология полученных образцов фосфогипса (рис. 4). Результаты показывают, что морфология и размеры кристаллов ФГ существенно зависят от режима получения ЭФК и соотношения жидкой и твердой фаз пульпы. В зависимости от режима экстракции формировались различные кристаллогидратные формы сульфата кальция.

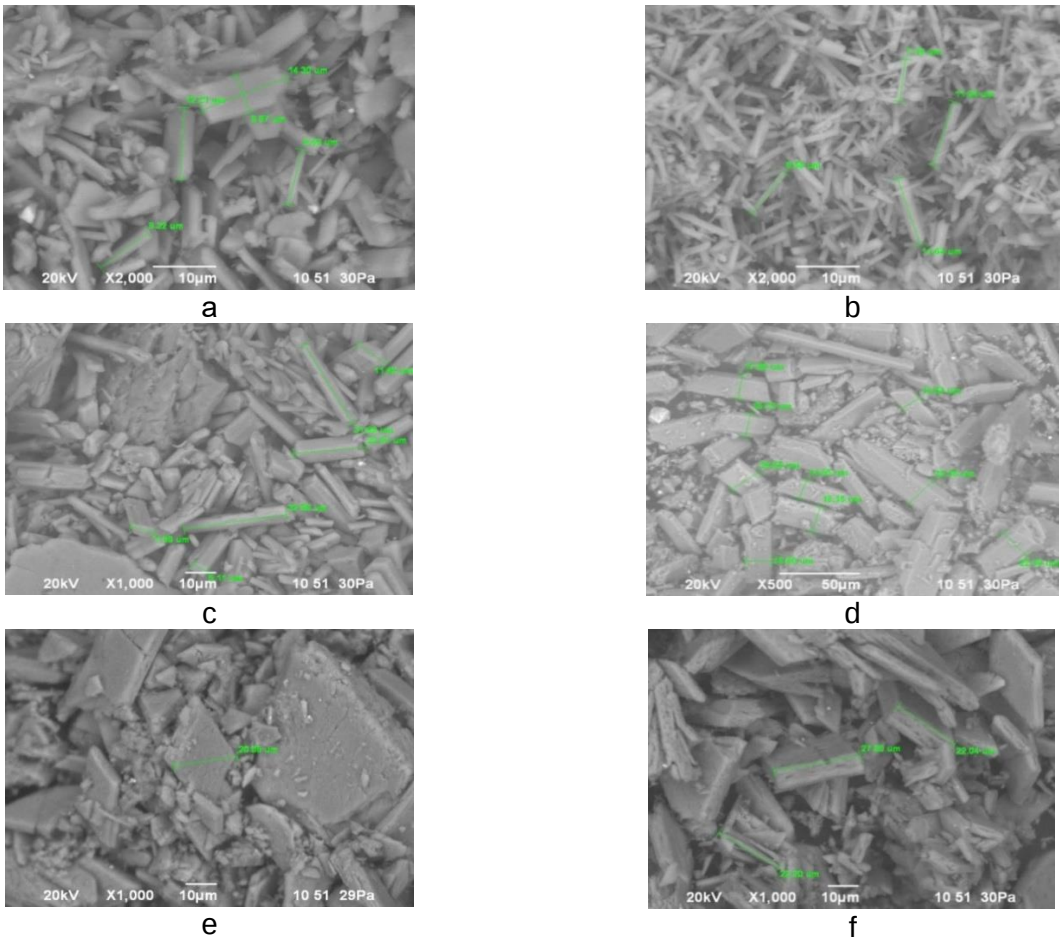


Рисунок 4 – Микрофотографии кристаллов фосфогипса:
a – дигидратный режим, Ж:Т = 2,5:1, b – полугидратный режим, Ж:Т = 2,5:1, c – дигидратный режим, Ж:Т = 3:1, d – полугидратный режим, Ж:Т= 3:1, e – ФГ из реактора разложения, f – ФГ из реактора дозревания

Для всех исследованных образцов характерно формирование иглообразных и призматических кристаллов сульфата кальция, однако степень их развития и однородность существенно различаются. В дигидратном режиме получения ФГ формируется кристаллическая структура, представленная преимущественно призматическими (пластинчатыми) кристаллами более крупного размера (рис. 4a, c). Кристаллы отличаются хорошей сформированностью и относительной однородностью морфологии. В полугидратном режиме ФГ характеризуется формированием мелких иглообразных кристаллов со средним размером 9,65 мкм при Ж:Т-2,5:1 (табл. 3), более узких по ширине и преимущественно мелкодисперсных, что указывает на иную кинетику кристаллообразования при повышенной температуре процесса. При Ж:Т=2,5:1 наблюдается увеличение доли мелкодисперсных кристаллов, что вызывает ухудшение фильтрующих свойств осадка (Рисунки 6b, d). Повышение Ж:Т до 3:1 способствует направленному росту кристаллов и снижению количества мелкой фракции. Наиболее однородные, крупные и хорошо сформированные призматические кристаллы со средним размером 21,23 мкм получены для фосфогипса, синтезированного дигидратным методом при Ж:Т=3:1, что указывает на более благоприятные условия кристаллизации и лучшие фильтрующие характеристики данного образца (табл. 3). В производственных образцах также сформированы крупные кристаллы размером 20-23 мкм за счет большего времени роста кристаллов (рис. 4e и 4f).

Таблица 3 – Влияние режима разложения фосфорита на фильтрующие свойства фосфогипса

Режим экстракции	Средний размер кристаллов, μм	Производительность фильтрования по влажному неотмытому осадку ($П_ф$), $\frac{кг}{м^2 \cdot ч}$	Производительность фильтрования по фильтрату ($П_ф$), $\frac{кг}{м^2 \cdot ч}$
Дигидратный, Ж:Т = 2,5:1	11,37	278,77	33,15
Полугидратный, Ж:Т = 2,5:1	9,65	205,525	131,74
Дигидратный, Ж:Т =3:1	21,23	294,42	411,55
Полугидратный, Ж:Т = 3:1	17,55	185,5	341,9
Полугидратный, из реактора разложения	20,06	81,176	120,08
Полугидратный, из реактора дозревания	23,98	186,75	125,26

Анализ производительности фильтрования ($П_ф$) демонстрирует (Таблица 3) выраженную зависимость производительности фильтрования фосфогипса от режима экстракции и соотношения Ж:Т. Максимальное значение $П_ф$ по влажному неотмытому осадку ($294{,}42\frac{кг}{м^2 \cdot ч}$) и по фильтрату ($411{,}55\frac{кг}{м^2 \cdot ч}$) соответственно зафиксировано для ФГ, полученного дигидратным методом при Ж:Т = 3:1, что коррелирует с формированием наиболее крупных и хорошо оформленных кристаллов. Снижение производительности фильтрования для полугидратных образцов связано с формированием мелкодисперсных кристаллов, ухудшающих проницаемость фильтровального слоя.

Заключение

В работе изучено влияние режима получения ЭФК и соотношения жидкой и твёрдой фаз (Ж:Т) на химический состав, размер и габитус кристаллов и фильтрующие свойства фосфогипса. В результате проведенных исследований сернокислотного разложения фосфорита месторождения Кистас установлено, что для получения крупных, хорошо фильтрующих кристаллов нерастворимого осадка ФГ оптимальным является дигидратный режим с соотношением Ж:Т=3:1. Установлено, что проведение процесса в полугидратном режиме при температурах 90-95ºС, в том числе в производственных условиях, приводит к формированию мелкодисперсного ангидрита, вызывающего снижение фильтруемости осадка фосфогипса, что подтверждается идентификацией образцов ФГ рентген-флуоресцентным и рентген-дифракционным анализом.

Сравнительный анализ показал выраженную зависимость производительности фильтрования фосфогипса от режима экстракции и соотношения Ж:Т. С помощью рентген-дифракционного метода идентифицированы кристаллические фазы и компоненты ФГ и получен однородный, крупнокристаллический продукт, который может быть использован в процессах дальнейшей переработки фосфогипса.

Список литературы

1. The Impurity Removal and Comprehensive Utilization of Phosphogypsum: A Review / Q. Guan et al // Materials (Basel). – 2024. – № 17(9). – P. 2067. https://doi.org/10.3390/ma17092067.
2. UNECE. From Waste to Opportunity: UNRMS and the Road to 100% Phosphogypsum Utilization [Электрон. ресурс]. – 2025. – URL: https://unece.org/circular-economy/news/waste-opportunity-unrms-and-road-100-phosphogypsum-utilization (дата обращения: 09.05.2025).
3. Ecoportal.kz. Расширение отвала фосфогипса №2 завода минеральных удобрений ТОО «Казфосфат» в г. Тараз,. – 2024. – URL:https://share.google/JNAe7YVwPoP6Moyok (дата обращения: 20.05.2024).
4. Сулейманова А., Бапаев Б., Байдилда Э. Отходы фосфогипса в Таразе впервые начали вывозить за город [Электрон. ресурс]. – 2024. – URL: https://24.kz/ru/news/social/674816-otkhody-fosfogipsa-v-taraze-vpervye-nachali-vyvozit-za-gorod (дата обращения: 09.10.2024).
5. Современные направления переработки фосфогипса / В.В. Головнева и др. // Успехи в химии и химической технологии. ТОМ XXXIV. – 2020. – № 4. – С. 65-67.
6. Копылев Б.А. Технология экстракционной фосфорной кислоты / Б.А. Копылев. – Л.: Химия, 1981. – 67с.
7. Кислотные методы переработки фосфатного сырья / Е.Л. Яхонтова и др. – М.: Химия, 1988. – 288 с.
8. Soboleva I.V., Lyashenko S.E. Studying the Dihydrate Stage of the Process of Preparation of Extractive Phosphoric Acid by the Dihydrate-Hemihydrate Method from Low-Grade Phosphorites I.V. Soboleva, S.E. Lyashenko // Theor Found Chem Eng. – 2023. – № 57. – P. 633-637. https://doi.org/10.1134/S0040579523040267.
9. Soboleva I.V. Investigation of reaction kinetics for industrial dihydrate method of P2O5 production / I.V. Soboleva, E. Koltsova // International Congress of Chemical and Process Engineering. – 2006. – № 17.
10. Staged purification of phosphogypsum using pH-dependent separation process / H. Chanouri et al // Environ. Sci. Pollut. Res. – 2024. № 31(7). – P. 9920-9934.
11. Математическое моделирование полугидратной стадии дигидратно-полугидратного процесса получения экстракционной фосфорной кислоты из фосфоритов / А.С. Егоркин и др. // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 6. – С. 33-37.
12. Becker P. Phosphates and phosphoric acid-raw materials, Technology, and economics of the wet process. – New York: MARCEL DEKKER, INC. 1983.
13. Study on the Properties of Waste Apatite Phosphogypsum as a Raw Material of Prospective Applications / K. Grabas et al // Waste Biomass Valor. – 2019. – № 10. – P. 3143-3155 https://doi.org/10.1007/s12649-018-0316-8.
14. Li X. Effect of Molecular Structure of Organic Acids on the Crystal Habit of α-CaSO4·0.5H2O from Phosphogypsum / X. Li, Q. Zhang // Crystals. – 2020. – № 10(1). – P. 24. https://doi.org/10.3390/cryst10010024.
15. Resource utilization and development of phosphogypsum-based materials in civil engineering / X. Qin et al // J. Clean. Prod. – 2023. – № 387. – P. 135858. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.135858
16. Production Waste Management: Qualitative and Quantitative Characteristics and the Calculation of the Hazard Class of Phosphogypsum / N. Seraya et al // Processes – 2023. – № 11(10). – P. 3033. https://doi.org/10.3390/pr11103033.
17. Better filterability and reduced radioactivity of phosphogypsum during phosphoric acid production in Morocco using a fly ash waste and pure silica additive / F.E. Arhouni et al // J Radioanal Nucl Chem. –2022. – № 331. – P. 1609-1617. https://doi.org/10.1007/s10967-022-08235-y.
18. Позин М.Е. Физико-химические основы неорганической технологии / М.Е. Позин, Р.Ю. Зинюк. – Л.: Химия, 1985. – 384 с.

19. Методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Химическая технология неорганических веществ» / Ш.М. Молдабеков и др. // ЮКГУ им. М. Ауэзова. – Шымкент, 2006. – С. 105.

References

1. The Impurity Removal and Comprehensive Utilization of Phosphogypsum: A Review / Q. Guan et al // Materials (Basel). – 2024. – № 17(9). – R. 2067. https://doi.org/10.3390/ma17092067. (In English).
2. UNECE. From Waste to Opportunity: UNRMS and the Road to 100% Phosphogypsum Utilization [Ehlektron. resurs]. – 2025. – URL: https://unece.org/circular-economy/news/waste-opportunity-unrms-and-road-100-phosphogypsum-utilization (data obrashcheniya: 09.05.2025). (In English).
3. Ecoportal.kz. Rasshirenie otvala fosfogipsa №2 zavoda mineral'nykh udobrenii TOO «Kazfosfat» v g. Taraz,. – 2024. – URL:https://share.google/JNAe7YVwPoP6Moyok (data obrashcheniya: 20.05.2024). (In Russian).
4. Suleimanova A., Bapaev B., Baidilda Eh. Otkhody fosfogipsa v Taraze vpervye nachali vyvozit' za gorod [Ehlektron. resurs]. – 2024. – URL: https://24.kz/ru/news/social/674816-otkhody-fosfogipsa-v-taraze-vpervye-nachali-vyvozit-za-gorod (data obrashcheniya: 09.10.2024). (In Russian).
5. Sovremennye napravleniya pererabotki fosfogipsa / V.V. Golovneva i dr. // Uspekhi v khimii i khimicheskoi tekhnologii. TOM XXXIV. – 2020. – № 4. – S. 65-67. (In Russian).
6. Kopylev B.A. Tekhnologiya ehkstraktsionnoi fosfornoi kisloty / B.A. Kopylev. – L.: Khimiya, 1981. – 67s. (In Russian).
7. Kislotnye metody pererabotki fosfatnogo syr'ya / E.L. Yakhontova i dr. – M.: Khimiya, 1988. – 288 s. (In Russian).
8. Soboleva I.V., Lyashenko S.E. Studying the Dihydrate Stage of the Process of Preparation of Extractive Phosphoric Acid by the Dihydrate-Hemihydrate Method from Low-Grade Phosphorites I.V. Soboleva, S.E. Lyashenko // Theor Found Chem Eng. – 2023. – № 57. – R. 633-637. https://doi.org/10.1134/S0040579523040267. (In English).
9. Soboleva I.V. Investigation of reaction kinetics for industrial dihydrate method of P2O5 production / I.V. Soboleva, E. Koltsova // International Congress of Chemical and Process Engineering. – 2006. – № 17. (In English).
10. Staged purification of phosphogypsum using pH-dependent separation process / H. Chanouri et al // Environ. Sci. Pollut. Res. – 2024. № 31(7). – R. 9920-9934. (In English).
11. Matematicheskoe modelirovanie polugidratnoi stadii digidratno-polugidratnogo protsessa polucheniya ehkstraktsionnoi fosfornoi kisloty iz fosforitov / A.S. Egorkin i dr. // Fundamental'nye issledovaniya. – 2013. – № 6. – S. 33-37. (In Russian).
12. Becker P. Phosphates and phosphoric acid—raw materials, Technology, and economics of the wet process. – New York: MARCEL DEKKER, INC. 1983. (In English).
13. Study on the Properties of Waste Apatite Phosphogypsum as a Raw Material of Prospective Applications / K. Grabas et al // Waste Biomass Valor. – 2019. – № 10. – R. 3143-3155 https://doi.org/10.1007/s12649-018-0316-8. (In English).
14. Li X. Effect of Molecular Structure of Organic Acids on the Crystal Habit of α-CaSO4·0.5H2O from Phosphogypsum / X. Li, Q. Zhang // Crystals. – 2020. – № 10(1). – R. 24. https://doi.org/10.3390/cryst10010024. (In English).
15. Resource utilization and development of phosphogypsum-based materials in civil engineering / X. Qin et al // J. Clean. Prod. – 2023. – № 387. – R. 135858. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.135858 (In English).
16. Production Waste Management: Qualitative and Quantitative Characteristics and the Calculation of the Hazard Class of Phosphogypsum / N. Seraya et al // Processes – 2023. – № 11(10). – R. 3033. https://doi.org/10.3390/pr11103033. (In English).
17. Better filterability and reduced radioactivity of phosphogypsum during phosphoric acid production in Morocco using a fly ash waste and pure silica additive / F.E. Arhouni et al // J Radioanal Nucl Chem. –2022. – № 331. – R. 1609-1617. https://doi.org/10.1007/s10967-022-08235-y. (In English).

18. Pozin M.E. Fiziko-khimicheskie osnovy neorganicheskoi tekhnologii / M.E. Pozin, R.Yu. Zinyuk. – L.: Khimiya, 1985. – 384 s. (In Russian).
19. Metodicheskie ukazaniya k vypolneniyu laboratornykh rabot po distsipline «Khimicheskaya tekhnologiya neorganicheskikh veshchestv» / Sh.M. Moldabekov i dr. // YUKGU im. M. Auehzova. – Shymkent, 2006. – C. 105. (In Russian).

Г.М. Сейтмагзимова[1], Ж.С. Серікбаева[1]*, Е.А. Полтанова [2], Л.А. Сейтмагзимова[3], Р.Р. Якубова[1]
[1]М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті,
160012, Қазақстан Республикасы, Шымкент қ., Тауке-хан даңғылы, 5
[2]«Қазфосфат» ЖШС, «Минералды тыңайтқыштар»,
Қазақстан Республикасы, Тараз қаласы, Ниетқалиев көшесі, 128
[3]Алматы технологиялық университеті,
Қазақстан Республикасы, Алматы қаласы, Төле би көшесі, 100
*e-mail: Zhursinay.Serikbaeva@mail.ru

ЭКСТРАКЦИЯЛЫҚ ФОСФОР ҚЫШҚЫЛЫН АЛУДЫҢ ДИГИДРАТТЫ ЖӘНЕ ЖАРТЫЛАЙГИДРАТТЫ ӘДІСТЕРІ КЕЗІНДЕГІ ФОСФОГИПС КРИСТАЛДАРЫНЫҢ ҚҰРЫЛЫМЫНЫҢ ҚАЛЫПТАСУЫ ЖӘНЕ СҮЗУ СИПАТТАМАЛАРЫ

Экстракциялық фосфор қышқылы (ЭФҚ) өндірісінде түзілетін фосфогипсті кәдеге жарату және сақтау проблемасы өте өзекті болып табылады, өйткені ол су объектілерінің, жердің және атмосфераның ластануының экологиялық проблемаларымен байланысты. Фосфогипстің үлкен көлемде жиналуы оны қайта өңдеудің тиімді әдістерін әзірлеуді қажет етеді. Фосфогипсті химиялық өңдеудің негізгі талаптарының бірі – оның гранулометриялық құрамы, ең алдымен кристалдардың өлшемі мен пішіні. Жұмыста ЭФҚ алу режимінің және сұйық пен қатты фазалардың арақатынасының (С:Қ) фосфогипстің химиялық құрамына, кристалдардың өлшемі мен габитусына, сондай-ақ оның сүзгілеу қасиеттеріне әсері зерттелді. Фосфогипсті алу дигидратты және жартылай гидратты әдістермен С:Қ = 2,5:1 және 3:1 жағдайында зертханалық ортада, сондай-ақ «Қазфосфат» компаниясының «Минералды тыңайтқыштар» Тараз филиалындағы технологиялық процесс жағдайында жүргізілді. Үлгілердің құрамы мен морфологиясы рентген-флуоресценттi және рентгендік фазалық әдістермен және электронды микроскопиямен көмегімен зерттелді. Рентген-дифракциялық талдау арқылы 90-95°С температурада өндірістік жағдайларда алынған фосфогипс тұнбасының сүзілу қабілетінің төмендеуін тудыратын ұсақ дисперсті ангидриттің болуы анықталды. Экстракцияны дигидратты режимде С:Қ = 3:1 қатынасында жүргізу гипстің ірі, біртекті, изометриялық кристалдарының түзілуіне ықпал ететіні және сүзгілеудің ең жоғары өнімділігін қамтамасыз ететіні анықталды. Зерттеу нәтижелері ЭФҚ өндірісін оңтайландыруда пайдаланылуы мүмкін.

***Түйін сөздер**: фосфогипс; экстракциялық фосфор қышқылы; дигидратты және жартылайгидратты әдістер; сүзгілеу; кристалдар өлшемі.*

G. Seitmagzimova[1], Zh. Serikbayeva[1]*, E. Poltanova[2], L. Seitmagzimova[3]. R.R. Yakubova[1]
[1]M. Auezov South Kazakhstan University,
5 Tauke Khan Avenue, Shymkent, 160012, Republic of Kazakhstan
[2]Kazphosphate LLP, Mineral Fertilizers,
128 Nietkaliyev Street, Taraz, Republic of Kazakhstan
[3]Almaty Technological University,
100 Tole Bi Street, Almaty, Republic of Kazakhstan
*e-mail: Zhursinay.Serikbaeva@mail.ru

FORMATION OF CRYSTAL STRUCTURE AND FILTRATION CHARACTERISTICS OF PHOSPHOGYPSUM IN DIHYDRATE AND HEMIHYDRATE METHODS OF WET-PROCESS PHOSPHORIC ACID PRODUCTION

The problem of utilization and storage of phosphogypsum generated during the production of wet-process phosphoric acid (WPA) is extremely relevant due to environmental issues associated with the pollution of water bodies, land, and the atmosphere. The large-scale accumulation of phosphogypsum requires the development of effective methods for its processing. A key requirement for the chemical processing of phosphogypsum is its particle-size distribution, primarily the size and shape of crystals. This study investigates the influence of the WPA production mode and the liquid-to-solid ratio (L:S) on the chemical composition, crystal size and habit, and filtration properties of phosphogypsum. Phosphogypsum was produced by dihydrate and hemihydrate methods at L:S ratios of 2.5:1 and 3:1 under laboratory conditions and under industrial

process conditions at the Taraz branch «Mineral Fertilizers» of Kazphosphate. The composition and morphology of the samples were examined using X-ray fluorescence and X-ray diffraction methods, as well as electron microscopy. X-ray diffraction analysis identified the presence of finely dispersed anhydrite, which reduces the filterability of phosphogypsum precipitate obtained under industrial conditions at temperatures of 90-95°C. It was established that extraction in the dihydrate mode at L:S ratio of 3:1 promotes to formation of larger, uniform-size, isometric crystals of gypsum and ensures the maximum filtration productivity. The research results can be used to optimize WPA production.

Key words: *phosphogypsum; wet-process phosphoric acid; dihydrate and hemihydrate methods; filtration; crystal size.*

Сведения об авторах

Галина Мануиловна Сейтмагзимова – кандидат технических наук, профессор кафедры «Технология неорганических и нефтехимических производств», Южно-Казахстанский университет имени М. Ауэзова, г. Шымкент, Республика Казахстан; e-mail: galinaseit@mail.ru. ORCID:https://orcid.org/0000-0002-2357-626X.

Жүрсінай Садуехасқызы Серікбаева* – докторант кафедры «Технология неорганических и нефтехимических производств», Южно-Казахстанский университет имени М. Ауэзова, г. Шымкент, Республика Казахстан; e-mail: Zhursinay.Serikbaeva@mail.ru. ORCID:https://orcid.org/0009-0007-8153-8206.

Екатерина Андреевна Полтанова – главный технолог ТФ ТОО «Казфосфат» «Минеральные удобрения», г. Тараз, Республика Казахстан; e-mail: Poltanova.Ye@kpp.kz.

Лаззат Адебовна Сейтмагзимова – кандидат технических наук, ассистент-профессор кафедры «Технология химического и фармацевтического производства»;. Алматинский технологический университет, г. Алматы, Республика Казахстан; e-mail:lseytmag@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-5693-2714.

Раиса Ривкатовна Якубова – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология неорганических и нефтехимических производств», Южно-Казахстанский университет имени М. Ауэзова, г. Шымкент, Республика Казахстан; e-mail: yarr-57@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1813-1933.

Авторлар туралы мәліметтер

Галина Мануиловна Сейтмагзимова – техника ғылымдарының кандидаты, «Бейорганикалық және мұнай-химия өндірістерінің технологиясы» кафедрасының профессоры, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент қаласы, Қазақстан Республикасы; e-mail: galinaseit@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2357-626X.

Жүрсінай Садуехасқызы Серікбаева* – «Бейорганикалық және мұнай-химия өндірістерінің технологиясы» кафедрасының докторанты; М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент қаласы, Қазақстан Республикасы; e-mail: Zhursinay.Serikbaeva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-8153-8206.

Екатерина Андреевна Полтанова – «Казфосфат» ЖШС Тараз филиалы «Минералды тыңайтқыштар» бас технологы, Тараз қаласы, Қазақстан Республикасы; e-mail: Poltanova.Ye@kpp.kz.

Лаззат Адебовна Сейтмагзимова – техника ғылымдарының кандидаты, «Химиялық және фармацевтикалық өндіріс технологиясы» кафедрасының ассистент-профессоры; Алматы технологиялық университеті, Алматы қаласы, Қазақстан Республикасы; e-mail:lseytmag@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-5693-2714.

Раиса Ривкатовна Якубова – техника ғылымдарының кандидаты, «Бейорганикалық және мұнай-химия өндірістерінің технологиясы» кафедрасының доценті, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент қаласы, Қазақстан Республикасы; e-mail: yarr-57@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1813-1933.

Information about the authors

Galina Seitmagzimova – Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of Technology of Inorganic and Petrochemical Productions; M. Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Republic of Kazakhstan; e-mail: galinaseit@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2357-626X.

Zhursinay Serikbayeva* – PhD student of the Department of Technology of Inorganic and Petrochemical Productions, M. Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Republic of Kazakhstan; e-mail: Zhursinay.Serikbaeva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-8153-8206.

Ekaterina Poltanova – Chief Technologist, Taraz Branch, Kazphosphate LLP, Mineral Fertilizers, Taraz, Republic of Kazakhstan; e-mail: Poltanova.Ye@kpp.kz.

Lazzat Seitmagzimova – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor of the Department of Chemical and Pharmaceutical Production Technology, Almaty Technological University, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: lseytmag@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-5693-2714.
Raisa Yakubova – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technology of Inorganic and Petrochemical Productions, M. Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Republic of Kazakhstan; e-mail: yarr-57@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1813-1933.

Поступила в редакцию 22.01.2026
Поступила после доработки 10.03.2026
Принята к публикации 11.03.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-68

ҒТАХР: 61.59.37

Д.Н. Аширалиева[1], Ж. Тоқтарбай[1], М.С. Кунарбекова[1], Б.У. Рахимова[2], К.К. Құдайбергенов[1]*
[1]Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті,
050000, Қазақстан Республикасы, Алматы қаласы, Сәтбаев көшесі, 22
[2]Қазақ ұлттық қыздар педагогикалық университеті,
050000, Қазақстан Республикасы, Алматы қаласы, Гоголь көшесі, 114/8
*e-mail: k.kudaibergenov@satbayev.university

ФУНКЦИОНАЛДАНҒАН НАНОЦЕЛЛЮЛОЗА НЕГІЗІНДЕГІ АДСОРБЕНТТЕР: СУДЫ ОРГАНИКАЛЫҚ ЖӘНЕ БЕЙОРГАНИКАЛЫҚ ЛАСТАУШЫЛАРДАН ТАЗАРТУ

Аңдатпа: *Өнеркәсіп секторларының қарқынды дамуымен бірге су ресурстарының ластануы жаһандық экологиялық мәселеге айналды. Осы шолу мақаласында функционалданған наноцеллюлоза негізіндегі адсорбенттердің судағы органикалық (синтетикалық бояғыштар, фенолдар, антибиотиктер, пестицидтер) және бейорганикалық (Pb^{2+}, Cd^{2+}, Hg^{2+}, Cr(VI), Cu^{2+}, As) ластаушыларды жоюдағы тиімділігі жүйелі талданды. Негізгі нәтижелер бойынша, ең жоғары сорбциялық сыйымдылыққа TEMPO- тотыққан наноцеллюлоза мен амин-функционализацияланған композиттер қол жеткізеді: метилен көгі үшін 2500 мг/г-ге дейін, қорғасын иондары үшін 2270 мг/г-ге дейін. Наноцеллюлоза негізіндегі молекулалық таңбаланған полимерлер (МТП) бәсекелес қосылыстар болған жағдайда фенолдарды 97% тиімділікпен селективті адсорбциялайды. Адсорбенттердің басым бөлігі 20 циклге дейін регенерацияланғанда 80–90% сыйымдылықты сақтайды. Мақалада наноцеллюлозаның үш негізгі түрі (ЦНК, НФЦ, БНЦ), олардың алу әдістері (қышқылдық гидролиз, TEMPO-тотығуы, механикалық және ферменттік өңдеу) және беттік функционалдандыру стратегиялары (изоцианаттық, амин- және тиол-функционализация) қарастырылды. Ауылшаруашылық қалдықтарынан (күріш қауызы, соя қабығы) наноцеллюлоза өндіру тұрақты даму қағидаттарына сәйкес келетіндігі атап өтіледі. Сондай-ақ масштабтау, реальды ағынды суларда тұрақтылық пен экономикалық тиімділік сияқты шешілмеген мәселелер мен болашақ зерттеу бағыттары айқындалды.*

Түйін сөздер: *наноцеллюлоза, функционализация, адсорбция, ауыр металдар, органикалық ластаушылар, молекулалық таңбаланған полимерлер, су тазарту, нанокомпозиттер.*

Кіріспе

Өнеркәсіп секторларының жоғары қарқынмен дамуы зиянды қосылыстардың көп мөлшерде қоршаған ортаға таралуына тікелей әсер етеді [1, 2]. Қауіпті шығарындылардың ағын суларға енуі және су қорларының ластануы қазіргі таңда жер бетіндегі күрделі мәселелердің бірі - ауыз су тапшылығына алып келуде [3]. Дүниежүзілік денсаулық сақтау ұйымының соңғы жылдары жиналған статистикалық мәліметтері бойынша, жыл сайын 267,5 млрд м³ ағын су көлемі тұрмыстық және өнеркәсіптік қалдықтармен ластанады. Бұл көлемнің тек 63% (168,8 млрд м³) ғана тазартылу мақсатында жинақталады, бірақ іс жүзінде нақты тазартылуға 146,3 млрд м³ ұшырайды [4].

©Д.Н. Аширалиева, Ж. Тоқтарбай, М.С. Кунарбекова, Б.У. Рахимова, К.К. Құдайбергенов, 2026

Ағын су құрамындағы негізгі экологиялық қауіп туындататын қосылыстарға бензол, нафталин негізіндегі органикалық бояғыштар және атомдық массасы 63,5-200,6, салыстырмалы тығыздығы шамамен 4,5 г/см³ болатын ауыр металл иондары жатады. Бұл қосылыстардың молекулалық құрылымы тұрақты, биоыдырауы қиын, тірі организмдер үшін 1,0-10,0 мг/л төмен концентрацияларда да уытты және канцерогенді болып келеді [5-7]. Мұндай ластаушы заттардың су жүйелеріне тұрақты түсуі тиімді тазарту шешімдерін жедел іздеуді қажет етеді.

Осы мәселелерді шешу мақсатында жетілдірілген және тұрақты тазарту әдістерін енгізу маңызды болып табылады, өйткені коагуляция, флокуляция, электрохимиялық, мембраналық, фотокаталитикалық және биологиялық өңдеу сияқты дәстүрлі технологиялар белгілі бір ластаушы затты жоюмен шектеледі, қымбат жабдықты және жоғары энергия шығындарын талап етеді [5, 11]. Сондықтан зерттеушілер жаңа, экологиялық таза, тиімді және үнемді адсорбенттерді әзірлеуге көбірек назар аударуда.

Ең перспективалы бағыттардың бірі – жаңартылатын табиғи шикізаттан алынған биополимерлік материалдарды пайдалану. Олардың ішінде ерекше қызығушылық тудыратыны - жоғары меншікті беткі ауданы, дамыған кеуекті құрылым және бетінде көптеген реактивті функционалдық топтардың болуы сияқты бірегей физика-химиялық қасиеттерге ие наноцеллюлоза.

Целлюлоза – биоыдырайтын, жоғары механикалық беріктігімен және химиялық тұрақтылығымен сипатталатын, Жер бетіндегі жаңартылатын органикалық полимерлердің ең кең таралған көздерінің бірі [12]. Целлюлозадан алынатын наноцеллюлоза биополимерлік наноматериал ретінде жоғары механикалық беріктігімен, жоғары меншікті беткі ауданымен және төмен тығыздығымен сипатталады [13].

Изоцианаттар, атап айтқанда ТД-изо-Ц, ДФМД-изо-Ц және ГМД-изо-Ц, наноцеллюлозаны функционалдандыруда кеңінен қолданылады [16-18].

Наноцеллюлозаны күріш қауызы, соя қабығы сияқты ауылшаруашылық және өнеркәсіптік қалдықтардан өндіруге болады, бұл технологияның тұрақтылығы мен ресурстық тиімділігін арттырады [19]. Осылайша, наноцеллюлоза тек сорбент қана емес, сонымен қатар ауылшаруашылық қалдықтарын бағалау және қоршаған ортаға түсетін ауыртпалықты азайту стратегиясының элементіне айналады [19, 21].

Осы шолу мақаласының мақсаты – функционалданған наноцеллюлоза негізіндегі адсорбенттердің түрлерін, алу мен функционалдандыру әдістерін, судағы органикалық және бейорганикалық ластаушыларды жоюдағы тиімділігін жүйелі талдау, сондай-ақ осы бағыттың болашақ даму перспективаларын айқындау болып табылады.

Наноцеллюоза: түрлері мен алу әдістері

Наноцеллюоза түрлері

Наноцеллюлоза – өсімдік биомассасынан алынатын биополимерлік наноматериал; ол жоғары механикалық беріктігімен, жоғары меншікті беттік ауданымен және төмен тығыздығымен сипатталады [13]. Өндіріс әдісіне, морфологиясына және құрылымына байланысты наноцеллюлоза материалдарының бірнеше негізгі түрлері белгілі; олардың ішіндегі ең кең таралғандары - целлюлоза нанокристалдары (ЦНК), нанофибриллалы целлюлоза (НФЦ), бактериялық наноцеллюлоза (БНЦ) және микрокристалды целлюлоза (МКЦ) [3, 20, 22]. Бұл материалдар шығу тегі, құрылымы, кристалдану дәрежесі, механикалық қасиеттері және қолданылуы бойынша ерекшеленеді, бірақ барлығы целлюлозаның негізгі қасиеттерін - биоүйлесімділігін, биоыдырауын және химиялық түрлендіру мүмкіндігін – сақтайды [3, 20, 22].

Осы түрлердің негізгі сипаттамалары 1-кестеде келтірілген.

Целлюлоза нанокристалдары (ЦНК).

ЦНК қышқылдық гидролиз арқылы алынады: аморфты аймақтар ыдырайды, ал кристалды аймақтар сақталады [28]. Нәтижесінде жоғары кристалдылықтағы қатты таяқша тәрізді бөлшектер пайда болады; H_2SO_4 гидролизі кезінде (60°C, 60 мин) олардың ұзындығы 30-100 нм аралығын құрайды [28]. ЦНК-тің жоғары кристалдылығы оның механикалық беріктігі мен тұрақтылығын қамтамасыз етеді.

Кесте 1 – Наноцеллюлоза түрлері мен негізгі қасиеттері

Наноцеллюлоза түрі	Балама атаулары	Типтік өлшемдері	Негізгі қасиеттері мен құрылымы	Табиғи көздер	Сілтеме
Нанокристалды целлюлоза (ЦНК)	Наноцеллюлоза мұрттары	Диаметрі: 3-70 нм, ұзындығы: 100-2000 нм	Жоғары кристалдылық (>70%), қатты шыбық тәрізді құрылым, жоғары созылу беріктігі	Ағаш, мақта, зығыр, ауылшаруашылық қалдықтары	[23-25]
Нанофибриллалы целлюлоза (НФЦ)	Микрофибрилляцияланған целлюлоза (МФЦ)	Диаметрі: 2-100 нм, ұзындығы: бірнеше мкм	Аморфты және кристалды аймақтарды қамтитын ұзын, икемді талшықтар, жоғары тұтқырлық және су ұстау қабілеті	Ағаш целлюлозасы, өсімдік талшықтары (қант қамысы, қарасора)	[23, 25, 26]
Бактериялық наноцеллюлоза (БНЦ)	Биоцеллюлоза, микробтық целлюлоза	Диаметрі: 20-100 нм	Ерекше тазалық (лигнин немесе гемицеллюлоза жоқ), жоғары кеуектілік, полимерленудің жоғары дәрежесі және 3D желілік құрылым	Бактериялармен синтезделген (мысалы, Acetobacter xylinum)	[23, 25, 27]
Микрокристалды целлюлоза (МКЦ)	-	Диаметрі: 10-300 мкм (микрондық шкала)	Ұнтақ түрі, жоғары химиялық тазалық, толтырғыш және тұрақтандырғыш ретінде қолданылады	Ағаш, мақта	[23, 25]

Нанофибриллалы целлюлоза (НФЦ)

НФЦ негізінен «үстіңгіден төменге» механикалық дефибрилляция әдістері арқылы алынады [29]. Типтік тәсіл – рафинерлеу мен жоғары қысымды гомогенизациядан тұратын екі сатылы механикалық өңдеу [29]. Бұл кезде диаметрі ~10-100 нм және ұзындығы мен диаметрі қатынасы 50-100-ден асатын ұзын икемді нанофибриллалар түзіледі [30]. Фибриллалардың дисперсиясын жеңілдету үшін TEMPO-тотығуы алдын ала жүргізіледі: бұл әдіс фибрилла бетіне карбоксилатты топтарды енгізіп, фибриллааралық байланыстарды әлсіретеді және нанофибриллалардың жекеленуін жақсартады [29].

Бактериялық наноцеллюлоза (БНЦ)

БНЦ кейбір микроорганизмдермен, негізінен Komagataeibacter туысының ацетобактерияларымен синтезделеді [31]. Бактериялық целлюлоза – ерекше таза материал: оның құрамында лигнин де, гемицеллюлоза да болмайды; фибриллалары өте жіңішке (100 нм-ден аз) және жоғары кристалды (≈84-89%) [32]. БНЦ үш өлшемді нанофибриллалы желі түзеді, жоғары кеуектілікке және су ұстау қабілетіне ие, сондықтан медицинада - жараларды жазуда белсенді қолданылады [31, 32].

Наноцеллюлоза алу әдістері

Наноцеллюлоза алу әдістері химиялық, механикалық және биологиялық тәсілдерге жіктеледі; олардың артықшылықтары мен кемшіліктері 2-кестеде салыстырылған.

Қышқыл гидролизі

Қышқыл гидролизі ЦНК алудың ең кең таралған әдісі [28]. Шикізат концентрлі қышқылдармен (H_2SO_4, HCl) өңделеді; қышқыл целлюлозаның аморфты учаскелерін гидролиздеп, жоғары кристалдылықтағы және тұрақтылықтағы таяқша тәрізді нанобөлшектерді бөліп шығарады [28]. H_2SO_4 гидролизінде ЦНК бетінде сульфат эфирлері (-OSO_3H) түзіледі, олар бетке теріс заряд беріп, суспензияны тұрақтандырады.

Сілтілік өңдеу

Сілтілік өңдеу әдетте лигнин мен гемицеллюлозаны алдын ала жою сатысы ретінде қолданылады [36]. NaOH концентрлі ерітіндісімен қайнату целлюлозалық шикізаттың құрылымын жұмсартып, кейінгі өңдеу кезінде реагенттердің қолжетімділігін жақсартады [36].

Кесте 2 – Наноцеллюлоза алу әдістерін салыстыру

Алу әдісі	Процестің сипаттамасы	Артықшылықтары	Кемшіліктері	Сілтеме
Қышқыл гидролизі	Аморфты аймақтарды жою үшін күшті қышқылдармен (H_2SO_4, HCl) өңдеу	Жоғары реакция жылдамдығы, жоғары кристалдылықтағы ЦНК оңай өндіріледі	Жабдық коррозиясы, қышқыл қалдықтарын жою мәселелері	[20, 26, 33]
Механикалық өңдеу	Жоғары қысымды гомогендеу, ультрадыбыстық, шарлы фрезерлеу	Экологиялық таза, агрессивті химиялық заттар қажет етпейді	Жоғары энергия шығыны, талшықтың ұзындығы біркелкі емес	[26, 34]
TEMPO тотығуы	C_6 гидроксил топтарының карбоксил топтарына селективті тотығуы	Фибрилляцияны жеңілдетеді, тұрақты НФЦ дисперсияларын қалыптастырады	Катализаторлардың жоғары құны (TEMPO)	[26, 33, 35]
Ферменттік гидролиз	Байланыстарды ыдырату үшін целлюлоза ферменттерін пайдаланады	Жеңіл жағдайлар, экологиялық таза, талшық құрылымы сақталған	Химиялық әдістермен салыстырғанда ұзақ реакция уақыты, төмен реакция жылдамдығы	[26, 33]

Ультрадыбыстық өңдеу

Ультрадыбыстық өңдеу механикалық дисперсия үшін қолданылады; акустикалық кавитация нәтижесінде пайда болатын күшті локалды импульстер (~10-100 кДж/моль) сутектік байланыстарды үзіп, нанофибриллалардың бөлінуіне ықпал етеді [36].

Бу жарылысы

Бу жарылысы («steam explosion») – шикізатты жоғары қысымда қысқа уақытқа қыздырып, содан кейін қысымды лезде төмендету арқылы жасушалық қабырғаларды бұзатын алдын ала өңдеу технологиясы [36].

TEMPO-тотығуы

TEMPO-тотығуы – функционалдық топтарды алдын ала енгізудің химиялық әдісі [29]. TEMPO ерітіндісі глюкопираноза бірліктерінің C_6 бастапқы спирт топтарын карбоксил топтарына тотықтырады; карбоксилаттар фибриллаларға заряд беріп, электростатикалық тебілісті күшейтеді, бұл кейінгі механикалық дефибрилляцияны айтарлықтай жеңілдетеді [29].

Наноцеллюлоза алу үшін ауылшаруашылық қалдықтарын – күріш қауызын, соя қабығын, зірә қабығын – шикізат ретінде пайдалану айрықша перспективалы бағыт болып табылады [19-21]. Мысалы, күріш қауызынан алынған ЦНК бірнеше химиялық өңдеу сатысынан кейін кристалдылығы 22,63%-дан 67,16%-ға дейін өсіп, бөлшектерінің орташа диаметрі 19 ± 3,3 нм және ұзындығы 195 ± 24 нм болатын материал береді [20]. Мұндай агроқалдықтар әдетте өртеуге жіберіледі, ал наноцеллюлоза өндірісіне бағыттау ауылшаруашылық биомассасын тиімді пайдаланып, қоршаған ортаға түсетін жүктемені азайтады [20]. Ауылшаруашылық қалдықтарынан наноцеллюлоза алудың жалпыланған технологиялық схемасы 1-суретте берілген.



Сурет 1 – Ауылшаруашылық қалдықтарынан наноцеллюлоза алудың технологиялық схемасы: алдын ала өңдеу, экстракция әдістері және алынатын наноцеллюлоза өнімі

Наноцеллюлозаның беттік модификациясы

Модификацияның жалпы принциптері

Наноцеллюлозаның гидроксил топтары арқылы жүзеге асырылатын беттік модификациясы материалдың функционалдық мүмкіндіктерін айтарлықтай кеңейтеді [14, 15].

Реактивті -OH топтарының болуы тотығу, ацетилдеу және басқа функционализация әдістерін қоса алғанда, салыстырмалы түрде қарапайым химиялық түрлендірулер арқылы наноцеллюлоза бетіне әртүрлі химиялық функционалдық топтарды енгізуге мүмкіндік береді [14, 15].

Целлюлозадан айырмашылығы, наноцеллюлозаны функционалдандыру көбінесе гетерогенді жағдайда жүзеге асады, яғни реакциялар негізінен оның бетінде жүреді [42, 43]. Наноцеллюлоза құрылымында гидроксил топтарының айтарлықтай үлесі беткі қабатта орналасқан; олардың мөлшері (реакцияға қабілетсіз C_3 гидроксилдерін есептемегенде) шамамен 15%-ға дейін жетеді [42, 43]. Беттік гидроксил топтарының жоғары үлесі наноцеллюлозаны функционалдандырылған материалдар алуда ерекше перспективалы етеді.

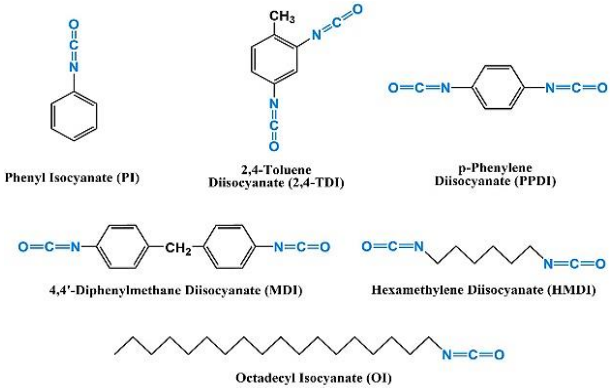
Негізгі функционалдандыру тәсілдері мен олардың мақсаты 3-кестеде жинақталған.

Кесте 3 – Наноцеллюлоза беттік модификациясының негізгі әдістері

Модификация түрі	Химиялық реакция	Енгізілетін топтар	Мақсаты	Сілтеме
TEMPO-тотығуы	C_6 -OH → -COOH селективті тотығу	$-COO^-$ (карбоксилат)	Зарядтылықты арттыру, НФЦ дисперсиясын жақсарту	[24]
Сульфаттау	H_2SO_4 гидролизі кезінде	$-OSO_3H$ (сульфат эфирі)	Теріс заряд, суспензия тұрақтылығы	[109]
Изоцианат модификациясы	-OH + R-NCO → уретан байланысы	Уретан (-NHCOO-)	Гидрофобтылық, матрицамен үйлесімділік	[8-10]
Полимер егу («grafting»)	Беттегі -OH арқылы инициация	Полимерлік тізбектер (ПВА, ПҚ)	Композиттік матрицамен үйлесімділік	[44]
Аминдеу	Амин топтарын енгізу	$-NH_2$	Анионды ластаушыларды байланыстыру	[22]
Тиол модификациясы	Тиол топтарын енгізу	-SH	Сынап және ауыр металдарды хелациялау	[45]

Изоцианаттар арқылы функционалдандыру

Көптеген модификаторлар мен линкерлердің ішінде алифатты және ароматты изоцианаттар соңғы жылдары ерекше назар аудартып отыр, дегенмен олар целлюлозалық материалдар химиясында бір ғасырдан астам уақыт бойы қолданылып келеді [46]. Бұл қосылыстарға деген қызығушылық олардың жоғары реакциялық қабілетімен және функционалдандырылған материалдарды алудағы кең мүмкіндіктерімен түсіндіріледі [46] (Сурет 2).



Сурет 2 – Целлюлоза мен наноцеллюлозаны функционалдандыру үшін ең көп қолданылатын ароматты және алифатты моно- және ди-изоцианаттар

Фенилизоцианат (Ф-изо-Ц) және н-октадецилизоцианат (О-изо-Ц) сияқты алифатты және ароматты моноизоцианаттар, сондай-ақ толуол диизоцианаты (ТД-изо-Ц), дифенилметан диизоцианаты (ДФМД-изо-Ц), гексаметилен диизоцианаты (ГМД-изо-Ц) және олардың полимерлік формалары целлюлоза мен наноцеллюлозаны функционалдандыру үшін кеңінен қолданылады [16, 17].

ТД-изо-Ц, ДФМД-изо-Ц және ГМД-изо-Ц қосылыстары молекулалық құрылымының қаттылығымен ерекшеленеді, бұл негізінен олардың құрамындағы бензол сақиналарының болуымен байланысты [49]. Атап айтқанда, екі бензол сақинасы бар ДФМД-изо-Ц ең жоғары қаттылыққа ие, ал алифатты тізбекті құрылымға ие ГМД-изо-Ц ең икемді болып табылады [49].

Изоцианаттар мен наноцеллюлозаның гидроксил топтары арасындағы реакцияны жеңілдету үшін триэтиламин сияқты аминдер тиімді катализаторлар болып табылады [51]. Изоцианаттар целлюлозаны функционалдандыру үшін бір ғасырға жуық уақыт бойы қолданылып келгеніне қарамастан, олар наноцеллюлозаны функционалдандыру үшін алғаш рет 2008 жылы пайдаланылды [18, 52, 53].

Наноцеллюлозаны изоцианаттар арқылы функционалдандыру тәсілдері 4-кестеде жинақталған.

Кесте 4 – Моно- және диизоцианаттарды қолдану арқылы наноцеллюлозаны функционалдандыру бойынша зерттеулер

Санаты	Кристалды / Талшықты наноцеллюлоза	Изоцианат	Матрица / химиялық жүйе	Әдебиет
Функционалды наноцеллюлоза	ЦНК	3,5-диметилфенилизоцианат	-	[48]
	ЦНК	О-изо-Ц (н-октадецилизоцианат)	-	[49]
	ЦНК	2,4-ТД-изо-Ц	Фотобөлінетін полимер	[41]
Наноцеллюлоза қасиеттерін жақсарту	НФЦ	О-изо-Ц	-	[54]
	ЦНК	2,4-ТД-изо-Ц	Кастор майы	[55]
	ЦНК	2,4-ТД-изо-Ц	Полигидроксибутират-валерат	[56]
	НФЦ	Гексаметилен диизоцианаты	Алкил диаминдер	[57]
	НФЦ	Гексаметилен диизоцианаты	-	[58]
Наноцеллюлозаны полярсыз матрицалармен өңдеу	ЦНК, НФЦ	О-изо-Ц	Поликапролактон	[59, 60]
	ЦНК	О-изо-Ц	Полибутилен адипат-терефталат	[51, 63]
	ЦНК	2,4-TDI	Полилактид	[66]
Наноцеллюлоза матрицасын тігу (cross-linking)	ЦНК	Дифенилметан диизоцианаты	Белгілі полиолдар	[68, 69]
	ЦНК	HMDI	Полиуретан	[70]
	НФЦ	Полимерлік дифенилметан диизоцианаты	Лигнин-соя полиолы + полимерлік дифенилметан диизоцианаты	[71]
	ЦНК	Изофорон диизоцианаты	Изофорон диизоцианаты + трифункционалды полиэфир спирті	[73]

Молекулалық импринттелген полимерлер

Наноцеллюлоза негізіндегі молекулалық импринттелген полимерлер (МИП) қазіргі таңда жоғары селективті адсорбенттер ретінде кеңінен зерттелуде. МИП – молекулалық импринттеу әдісі арқылы синтезделетін синтетикалық полимерлер болып табылады [76]. Бұл әдіс полимер матрицасында белгілі бір селективтілікке және шаблонға (мақсатты молекулаға) жоғары аффинділікке ие арнайы қуыстарды қалыптастыруды қамтиды. Бұл қуыстар немесе арнайы тану орталықтары шаблонға өлшемі, пішіні және функционалдық топтары бойынша комплементарлы болады [77].

МИП синтезінің бірінші кезеңінде шаблон мен функционалдық мономер(лер) әрекеттесіп, ковалентті немесе ковалентті емес өзара әрекеттесулермен тұрақтандырылған преполимерлену кешенін түзеді. Екінші кезеңде полимерлену барысында бұл кешен тігуші агентпен әрекеттесіп, полимердің үшөлшемді құрылымын қалыптастырады. Үшінші және соңғы кезең - шаблонды жою: шаблон молекулалары физикалық әдістермен немесе сәйкес еріткіштермен экстракциялау арқылы алынып тасталады, нәтижесінде МИП құрылымында арнайы тану орталықтары ашылады.

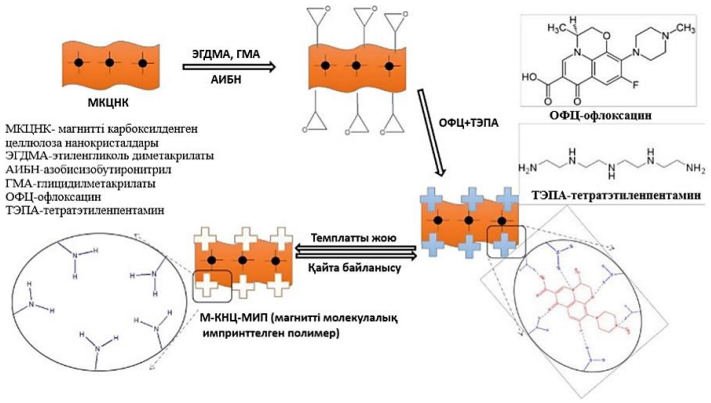
МИП синтездеудің бірнеше әдістері әзірленген: көлемдік, тұнбалық, эмульсиялық, суспензиялық және беттік импринттеу полимерленуі [78].

Беттік импринттеу әдісі ең тиімді тәсілдердің бірі болып табылады, себебі бұл әдіс арқылы алынған полимерлерде байланысу орталықтары материалдың бетінде орналасып, оңай қолжетімді болады. Нәтижесінде мұндай материалдар жоғары байланыстыру жылдамдығын, массалық тасымалдың тиімділігін және темплат молекуланы оңай жою мүмкіндігін қамтамасыз етеді.

Осы тұрғыдан алғанда, целлюлоза нанокристалдарының тотығуы нәтижесінде алынатын карбоксилденген наноцеллюлоза (КНЦ) жоғары меншікті беткі ауданы, беттік функционалдық топтарының көптігі, жақсы механикалық беріктігі және биоүйлесімділігі арқасында молекулалық таңбаланған полимерлер үшін тиімді тасымалдағыш ретінде қарастырылады [80].

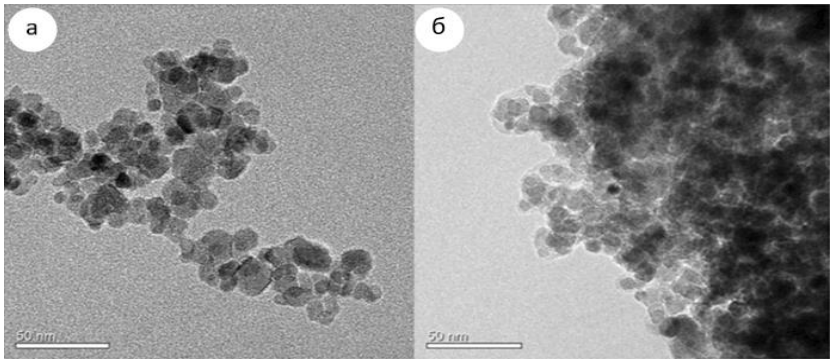
Ағынды сулардағы фторхинолондарды тиімді адсорбциялау үшін МИП тасымалдағышы ретінде магниттік карбоксилденген наноцеллюлоза кристалдары (КНЦ) қолданылды [82]. Бұл жүйеге Fe_3O_4 нанобөлшектерін енгізу материалға магниттік қасиет беріп, оны сыртқы магнит өрісі арқылы оңай бөліп алуға мүмкіндік жасады. Зерттеу барысында КНЦ мен Fe_3O_4 нанобөлшектері тұндыру әдісі арқылы біріктіріліп, КНЦ-Fe_3O_4 композиті алынды, ол МИП синтезі үшін тиімді тірек ретінде қызмет атқарды [82].

КНЦ-Fe_3O_4-МИП композитін алу барысында функционалдық мономер ретінде глицидилметакрилат (ГМА), тігуші агент ретінде этиленгликоль диметакрилат (ЭГДМА), инициатор ретінде азобисизобутиронитрил (АИБН), ал кеуек түзуші еріткіш ретінде ацетонитрил қолданылды (3-сурет).



Сурет 3 – Магниттік КНЦ-Fe_3O_4-МИП синтезінің схемасы

Трансмиссиялық электронды микроскопия (ТЭМ) нәтижелері магниттік КНЦ бөлшектерінің орташа өлшемі шамамен 25 нм екенін көрсетті. Сонымен қатар, қысқа целлюлоза нанотаяқшаларының өздігінен ұйымдасуы нәтижесінде агрегаттардың түзілуі байқалды (4-сурет).



Сурет 4 – Магниттік КНЦ (а) және КНЦ-Fe_3O_4-МИП (б) ТЭМ суреттері

Алынған КНЦ-Fe_3O_4-МИП композитін қатты фазалы экстракция (ҚФЭ) сорбенті ретінде қолдану фторхинолондарды тиімді анықтауға мүмкіндік берді. Атап айтқанда, материал жоғары адсорбциялық сыйымдылықты (45,64 мг/г) және жоғары экстракциялық қалпына келтіру көрсеткіштерін (81,2-93,7%) көрсетті. Бұл нәтижелер композит құрамындағы карбоксил және гидроксил топтарының фторхинолон молекулаларымен тиімді өзара әрекеттесуіне

байланысты. МИП технологиясы үлгі молекуланы дұрыс таңдау арқылы белгілі бір ластаушыға бағытталған жоғары селективті адсорбенттерді жасауға жағдай жасайды.

Басқа модификациялау тәсілдері

Тотығу (карбоксилдеу)

TEMPO-тотығуы глюкозаның C_6 гидроксил топтарын карбоксил (-COO^-) топтарына айналдырады, бұл фибриллалардың зарядтылығын және гидрофильділігін арттырады [29]. Карбоксил топтары ионды диссоциацияланып, тығыз электростатикалық зарядталған нановолокон желісін түзеді [29].

Сульфаттау

H_2SO_4 гидролизі кезінде ЦНК бетінде сульфат эфирлері (-OSO_3H) түзіледі; олар бетке теріс заряд беріп, электростатикалық тебілісті арттырады және агрегацияның алдын алады.

Полимер егу («grafting»)

Наноцеллюлоза бетіне ПВА, ПҚ және басқа полимерлік тізбектерді егу оның полимерлік матрицалармен үйлесімділігін жақсартады [44].

Аминдеу мен тиол модификациясы.

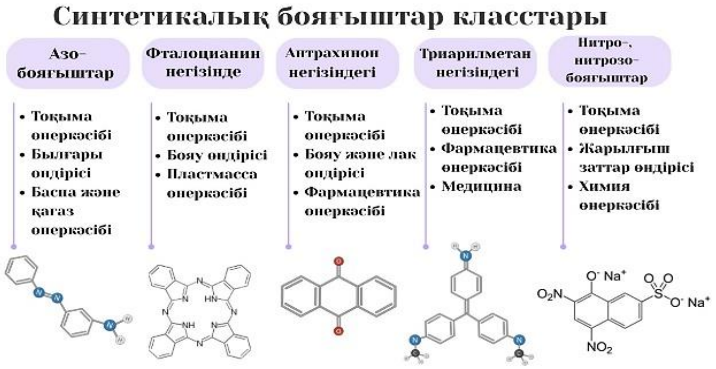
Амин (-NH_2) топтарын енгізу анионды бояғыштарды байланыстыруды жақсартса, тиол (-SH) топтары сынап және басқа ауыр металдармен күшті хелатты байланыстар түзуге мүмкіндік береді [22, 45].

Судағы органикалық және бейорганикалық ластаушылар

Синтетикалық бояғыштар

Ағын су құрамындағы негізгі экологиялық қауіп туындататын қосылыстардың бірі – бензол, нафталин негізіндегі органикалық бояғыштар; олардың молекулалық құрылымы тұрақты, биоыдырауы қиын, тірі организмдер үшін 1,0-10,0 мг/л төмен концентрацияларда да уытты және канцерогенді болып келеді [5-7]. Синтетикалық бояғыштардың 100 000 астам түрі суда жылдам ерігіштігі, ашық түстері және түстердің тұрақтылығы байланысты бояғыш өндірісінде, тоқыма бұйымдарында, пластмассаларда, мұнай өңдеуде, тамақ өнімдерін өңдеуде және басқа да салаларда жиі қолданылады [8-9]. Жыл сайынғы бояғыштар өндірісі 700 000 тоннаны құрайды, олардың ішінде 300 000 тонна тоқыма өнеркәсібінде қолданылады; жалпы көлемнің шамамен 10%-ы ағынды суларға төгіледі [10].

Синтетикалық бояғыштар құрамы бойынша екі компоненттен тұрады – хромофор және ауксохром: хромофор бояғыш агент ретінде, ал ауксохром бояғыш молекулалары мен талшықтар арасындағы тартылысқа жауап береді [10]. Ағынды суларды ластаушы бояғыштардың ең көп таралған түрі азо-бояғыштар болып табылады – олар барлық синтетикалық бояғыш өндірісінің 60%-ын құрайды; тіпті 1,0-10,0 мг/л аралығындағы төмен концентрацияларда да бұл заттар тератогенді, канцерогенді және мутагенді болады [5]. Мысалы, катионды бояғыш метилен көгі 4,7 мкг/л-ден жоғары концентрацияда су организмдеріне созылмалы әсер етеді және адамның қоректік тізбегіне байқалмай енеді, бұл бауырдың зақымдануына, созылмалы ауруларға және гемолизге әкеледі [6, 8]. Синтетикалық бояғыштардың негізгі кластары мен олардың қолданылу салалары 5-суретте көрсетілген.



Сурет 5 – Синтетикалық бояғыештардың негізгі кластары: азо-бояғыштар, фталоцианин, антрахинон, триарилметан және нитро-нитрозо-бояғыштар – олардың молекулалық құрылымдары мен қолданылу салалары

Әртүрлі бояғыш түрлерінің қоршаған ортаға және адам ағзасына әсері 5-кестеде жинақталған.

Кесте 5 – Әртүрлі бояғыштардың қоршаған ортаға және адам ағзасына әсері

Бояғыш түрі	Судағы ластану көздері	Судағы формалары мен құрылым	Рұқсат етілген концентрациялар	Адамдар мен қоршаған ортаға қауіп	Жою әдістері
Азо-бояғыштары (Конго қызылы, метил оранжы)	Тоқыма, былғары, баспа және қағаз өнеркәсіптері [24]	Хош иісті сақиналармен байланысқан азо тобын (-N=N-) қамтиды; аниондық немесе амфотерлі болуы мүмкін [24, 83]	1 мг/л; төмен дозаларда да қауіпті [11]	Канцерогенді және мутагенді. ДНҚ зақымдануына, гипертонияға, соқырлыққа, гастритке және бауырдың зақымдануына әкеледі [24, 84]	Адсорбция (наноцеллюлоза), фотокатализ, озондау, электрокоагуляция [24, 85]
Катионды (негізгі) бояғыштар (метилен көгі, кристалды күлгін)	Қағаз және тоқыма өнеркәсібі, косметика және медицина [1, 8, 85]	Диссоциация-дан кейін оң зарядқа ие болатын гетероциклді ароматты құрылымдар [8, 83]	Планктон бойынша 4,7 мкг/л-ден жоғары [6]	Метгемоглобинемия, цианоз, сарғаю, құрысулар, көздің күйігі және тіндердің некрозын тудырады [1, 5]	Теріс зарядталған гидрогельдермен адсорбциялау, мембраналық сүзу және экстракция қолданылады [6, 83]
Антрахинон негізіндегі бояғыштар (Mordant Violet, Acid Blue)	Тоқыма бұйым және жүн өнеркәсібі [9, 86]	Екі карбонил обы бар бензол сақинасына негізделген күрделі құрылымдар; ыдырауға төзімді. Биологиялық ыдырауы қиын [24, 86]	0,05-0,1 мг/дм³ (нақты затқа байланысты) [24, 86]	Қуық қатерлі ісігі, аллергиялық реакциялар және тыныс алудың бұзылуы қаупімен байланысты [24, 84]	Күшейтілген тотығу процестері (AOP), Фентон процестері, адсорбция [24, 85, 86]
Күкіртті және дисперсті бояғыштар (Direct Blue 71, Sulfur Black)	Тоқыма және былғары өнеркәсібі [24, 84]	Күкірт немесе хош иісті аминдер болады; иондық емес формалары суда нашар ериді [24, 84]	2 мг/м³	Геноуытты, аллергиялық дерматит пен мутацияларды тудырады. Организмдерде биожинақтауға қабілетті [84]. Төмен концентрацияда да жағымсыз иіске ие [84]	Коагуляция және флокуляция, биологиялық өңдеу, мембраналық әдістер (NF/RO) [24, 85]
Фенолды қосылыстар (хлорфенолдар, нитрофенолдар)	Мұнай өңдеу зауыттары, бояу өндірісі, фармацевтика және пестицидтер [11, 24]	Ерігіштігі жоғары, улы хош иісті қосылыстар; ыдырауға төзімді [11]	Фенолдың су тазалығындағы шекті мөлшері 1 мкг/л-ден аз [11]	Орталық жүйке жүйесіне, бүйректерге және бауырға әсер етеді; бұлшықет әлсіздігін, дірілдеуді және тыныс алудың тоқтауын тудырады [11]	Белсендірілген көмірдегі фотокаталитикалық ыдырау, айдау және адсорбция [11, 85]

Ауыр металдар

Ағынды суларда көбінесе органикалық бояғыштар ғана емес, сонымен қатар ауыр металдар, фармацевтикалық қосылыстар, пестицидтер және басқа да улы компоненттер бар күрделі қоспалар да кездеседі [3, 83]. Al, Cu, Pb, Hg, Fe, Co, As және Zn сияқты ауыр металдар бояғыш молекулаларымен байланысып, әртүрлі күрделі қосылыстар түзеді және адам ағзасына қатерлі ісік түрлері, деменция, нейроуыттылық және мүшелер жеткіліксіздігі сияқты бірқатар кері әсер етеді [10]. Мысалы, қорғасын иондары өте нейроуытты және когнитивті функцияны бұзуы мүмкін, ал кадмий мен сынап созылмалы аурулардың дамуымен және канцерогендік әсерлермен байланысты [84].

Судың ауыр металдармен ластануының негізгі себептері – тау-кен өнеркәсібі, металлургия, тыңайтқыш өндірісі, көлік және қалалық орта. Сондықтан ағынды суларды тазарту осы мәселелердің барлығын алдын алу және судың ластану деңгейін төмендету үшін өте маңызды болып табылады [1-3, 88].

Негізгі ауыр металдардың су жүйелеріне түсу көздері, рұқсат етілген концентрациялары және денсаулыққа келтіретін зияны 6-кестеде келтірілген.

Кесте 6 – Ауыр металдардың әсер ету сипаттамалары және ағынды судағы рұқсат етілген деңгейлері

Ауыр металл	Суды ластаушы көздер	Судағы формалары мен кешен түрлері	Рұқсат етілген концентра-циялар	Адам және қоршаған ортаға келтіретін зияны	Жою әдістері
Қорғасын (Pb)	Батареялар, бояулар, шыны және баспа өнеркәсібі, құбырлар [23, 88, 89]	Pb^{2+} иондары, ЭДТА және гумин қышқылдарымен қосылыстар түрінде [87]	10 мкг/л (ДДСҰ) [11, 89]	Орталық жүйке жүйесінің, бүйректің, бауырдың зақымдануы, анемия, балалардың IQ төмендеуі [7, 11, 23, 84]	Адсорбция (наноцеллюлоза), тұндыру, кері осмос, ион алмасу [84, 85, 88]
Хром (Cr)	Мырыштау, былғары илеу, тыңайтқыштар және тоқыма өнеркәсібі [8, 11, 89]	Cr(III) және өте улы Cr(VI); цитраттар мен ЭДТА байланысқан күрделі қосылыстар [11, 87, 89]	50 мкг/л (ДДСҰ) [8, 11]	Канцероген, өкпе обырын, аллергиялық дерматитті, асқазан-ішек жолдарының зақымдануын тудырады [5, 8, 11, 84]	Химиялық тотықсыздану ($Cr^{6+}\rightarrow Cr^{3+}$), адсорбция, фотокатализ [11, 87]
Кадмий (Cd)	Тау-кен өндіру, гальваникалық қаптау, батареялар, фосфат тыңайтқыштары өнеркәсіптері [7, 11, 23]	Бос Cd иондары, хлорид және органикалық кешендер [87]	3 мкг/л (ДДСҰ) [11, 89]	Бүйрек жеткіліксіздігі, өкпенің зақымдануы, сүйектің сынғыштығы, ағзалардың жоғары уыттылығына алып келеді [11, 84]	Ион алмасу, мембраналық сүзу (NF/RO), адсорбция [11, 83]
Сынап (Hg)	Электроника, химиялық реагенттер, фармацевтика, көмірді өңдеу [7, 9, 85]	Бейорганикалық және метилденген түрлері (MeHg) [11, 87]	1 мкг/л (ДДСҰ) [11, 89]	Миға (Минамата ауруы), бүйрек және тыныс алу мүшелеріне зақым келтіретін күшті нейротоксин [11, 84]	Адсорбция (модификация-ланған гидрогельдер), сульфидтермен тұндыру [23, 89]
Мыс (Cu)	Металлургия, мырыштау, пестицидтер, құбыр коррозиясы [1, 11, 89]	Cu^{2+} иондары, цитраттары бар қосылыстар, ЭДТА және аммиак қосылыстары [87]	2000 мкг/л (ДДСҰ) [11]	Бауыр мен бүйректің зақымдануы, құрысулар, шырышты қабықтың тітіркенуі, диарея [1, 11, 84]	Электролиз, адсорбция, мембраналық әдістер (RO/NF), коагуляция [11, 85, 87]
Мышьяк (As)	Пестицидтер, тау-кен өндірісі, металл балқыту, тыңайтқыштар өндірісі [7, 11, 91]	Арсениттер As(III) және арсенаттар As(V) [11, 91]	10 мкг/л (ДДСҰ) [91]	Канцероген, тері мен бауыр ісіктерін, тамырлар мен жүйкелердің зақымдануын тудырады [7, 11, 84, 91]	Темір оксидтеріне адсорбция, ион алмасу, бірге тұндыру [91]
Никель (Ni)	Болат балқыту, гальваникалық қаптау, батарея өндірісі [11, 87, 89]	ЭДТА, цитраттар және аммиак қосылған қосылыстары [87]	20-70 мкг/л (ДДСҰ) [11, 89]	Өкпе және синус қатерлі ісігі, өкпе фиброзы, дерматит және бүйрек жеткіліксіздігі [5, 11, 84]	Озондау (декомплекстеу), адсорбция және ион алмасу [11, 85]
Мырыш (Zn)	Гальваникалық қаптау, резеңке өндірісі, ауылшаруашылық ағынды сулары [7, 23, 89]	Негізінен тұрақсыз Zn^{2+} иондары [87]	3-5 мг/л (ДДСҰ) [11, 89]	Тыныс алғанда асқазанның түйілуі, анемия, енжарлық және металл түтінінің қызбасы [11, 84, 89]	Коагуляция, тұндыру, адсорбция, мембраналық сүзу [11, 85, 89]

Дәстүрлі тазарту әдістерінің шектеулері

Ластаушы заттарды жою әдісін таңдау ағынды судың құрамына байланысты; коагуляция және флокуляция судағы қалқымалы қатты заттарды, коллоидтарды және органикалық бояғыштарды кетіруге өте қолайлы, алайда микроластағыштарды, тұрақты органикалық бояғыштарды, ауыр металл қосылыстарын және фармацевтикалық қосылыстарды тазалауда тиімсіз [92-94]. Электрохимиялық әдістер көп мөлшерде химиялық заттарды қажет етпейді және экологиялық таза болып табылады, алайда жоғары энергия тұтынуы, электрод коррозиясы және жабдықтың жоғары құны сияқты кемшіліктері бар [89, 95]. Мембраналық микросүзгілер 0,1 мкм диапазонындағы бөлшектерді азайтады, бірақ наноөлшемді иондық тұздар мен металдар ағынды суларда қалады [5, 35, 96]. Фотокатализ суды толығымен минералдандыру мүмкіндігімен ерекшеленеді, бірақ қуатты жарық көзін қажет етеді [97, 98]. Биологиялық тазарту салыстырмалы түрде тиімді және экологиялық таза болғанымен, ауыр металдарды терең жою қиын болып табылады [5, 98].

Ататылған әдістер тек белгілі бір ластаушы затты жоюмен шектеледі, қымбат жабдықты және жоғары энергия шығындарын талап етеді, сонымен қатар суды тазарту жабдықтарында улы қосалқы өнімдер жиналады, оларды қоршаған ортаға зиян келтірмейтіндей етіп жою қажет [5, 11]. Осы технологиялық және экономикалық шектеулер адсорбцияға – әсіресе наноцеллюлоза негізіндегі жаңа буын адсорбенттерге – деген ғылыми қызығушылықтың артуына негіз болуда.

Наноцеллюлоза негізіндегі адсорбенттер

Адсорбцияның жалпы принциптері

Адсорбция – ағын су құрамындағы ластаушы заттарды жоюдың кең таралған және тиімді әдісі [45, 100]. Материалды дұрыс таңдау адсорбцияның бірнеше артықшылықтарын бере алады, соның ішінде қолжетімділік, үнемділік, жоғары беттік аудан, кең pH диапазонында қолдану және жоғары тиімділік [45, 100]. Адсорбция кезінде ластаушы заттар сұйық фазадан қатты фазаға ауысады және адсорбент бетіне тартылады; бұл процестер негізінен Ван-дер-Ваальс күштері, сутектік байланыстар, ион алмасу, электромагниттік өзара әрекеттесулер және гидрофобты өзара әрекеттесулер арқылы жүзеге асады [45, 100].

Наноцеллюлоза негізіндегі материалдар жоғары меншікті беттік ауданға, кеуекті архитектураға, гидроксил және карбоксил топтарының көп мөлшеріне ие; бұл амин, тиол, сульфонат және басқа да функционалдық топтарды мақсатты түрде енгізуге мүмкіндік береді [3, 22, 23, 101]. Осы қасиеттерінің арқасында наноцеллюлоза негізіндегі адсорбенттер ластаушы заттарды электростатикалық тартылыс, ион алмасу, кешен түзу, сутектік байланыстар, гидрофобты өзара әрекеттесулер және π-π қабаттасу арқылы байланыстыра алады [27, 83, 101-103]. Наноцеллюлозаның белсенді функционалдық топтары мен негізгі адсорбция механизмдері 6-суретте схемалық түрде берілген.



Сурет 6 – Наноцеллюлозаның белсенді функционалдық топтары (-OH, -COOH, -NH_2) және олардың ластаушы заттармен өзара әрекеттесу механизмдері: электростатикалық тартылыс, ион алмасу, координациялық байланыс, сутектік байланыстар және π-π қабаттасу

pH және температураның адсорбция тиімділігіне әсері

Наноцеллюлоза негізіндегі адсорбенттердің тиімділігін анықтайтын екі негізгі физика-химиялық параметр – ерітіндінің pH-ы және процесс температурасы. Осы параметрлер

адсорбент бетіндегі функционалдық топтардың иондану күйін, ластаушы заттың зарядтық формасын және адсорбент-сорбат өзара әрекеттесу механизмін тікелей өзгертеді [118, 119].

pH-тың әсері. Наноцеллюлоза бетіндегі карбоксил (-COOH, pKa ≈ 3,5-4,5), гидроксил (-OH) және амин (-NH_2, pKa ≈ 9-10) топтары pH-қа тәуелді түрде иондалады. pH > pHpzc (нөлдік заряд нүктесі, әдетте наноцеллюлоза үшін pH 3-4) болғанда бет теріс зарядты иемденеді, бұл катионды ластаушыларды (Pb^{2+}, Cd^{2+}, Cu^{2+}, Hg^{2+}, катионды бояғыштар - метилен көгі) электростатикалық тартуды күшейтеді [118, 120]. Ауыр металдардың катиондары үшін оңтайлы pH әдетте 5-6 аралығында болады: pH < 4 кезінде H^+ иондары белсенді орталықтар үшін бәсекелеседі, ал pH > 7 кезінде металдар ерімейтін гидроксид түрінде тұнбаға түседі, бұл адсорбция механизмін бұзады. Мысалы, Fe_2O_3@SiO_2-L-цистеин-целлюлоза жүйесі Cd(II), Ni(II) және Pb(II) иондарын оңтайлы pH 6,5-те 422-426 мг/г дейін адсорбциялайды [120].

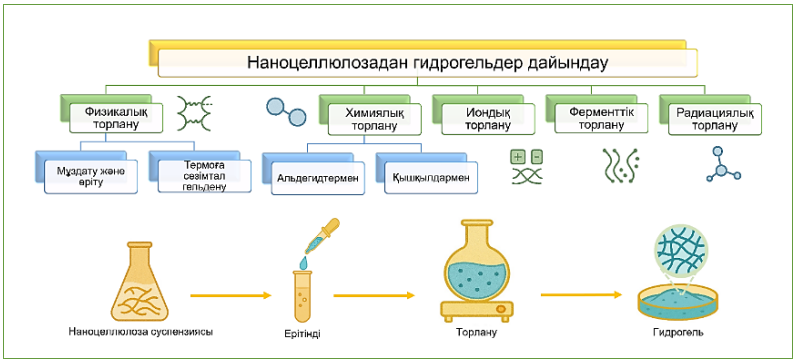
Cr(VI) жағдайы ерекше: ол суда $HCrO_4^-$ және $Cr_2O_7^{2-}$ аниондық формаларында болғандықтан, қышқыл ортада (pH 2-3) протонданған амин топтары (-NH_3^+) бар наноцеллюлоза композиттерімен тиімді байланысады [118]. Катионды бояғыштар (метилен көгі) үшін pH-тың 7-ден 10-ға өсуі адсорбция сыйымдылығын айтарлықтай арттырады: мысалы, ЦНК/КМЦ/цеолит мембранасында метилен көгі бойынша сыйымдылық pH 7-де 38,3 мг/г-ден pH 10-да 76,5 мг/г-ге дейін екі есеге өседі [121].

Температураның әсері. Наноцеллюлоза негізіндегі адсорбция процестерінің басым бөлігі - эндотермиялық сипатта (ΔH° > 0), яғни температура көтерілген сайын (25°C-тан 45°C-қа дейін) адсорбция сыйымдылығы артады. Ван-Гофф теңдеуі арқылы есептелген типтік термодинамикалық параметрлер: ΔG° = -20...-5 кДж/моль (процесстің өздігінен жүретіндігі), ΔH° = +15...+40 кДж/моль (эндотермиялық), ΔS° = +50...+120 Дж/(моль·К) (адсорбцияда беттегі реттілік азаяды) [119, 121]. Теріс ΔG° мәні процестің термодинамикалық қолайлылығын, ал оң ΔH° мәні – хемосорбцияның басым болатындығын растайды. Алайда, температура 60-70 °C-тан асқанда функционалдық топтардың деградациясы және беттік құрылымның бұзылуы адсорбция сыйымдылығын төмендетеді; сондықтан индустриялық процестер үшін 25-45 °C аралығы оңтайлы деп саналады [118, 119].

Осылайша, pH және температура нақты ағынды судың сипаттамаларына сәйкес алдын ала реттелуі керек: тоқыма стоктары үшін (жоғары pH) - катионды бояғыштарға арналған TEMPO-тотыққан НФЦ тиімді; гальваникалық стоктар үшін (қышқыл, Cr(VI) бар) – амин-функционализацияланған наноцеллюлоза қолайлы; ал фармацевтикалық стоктар үшін (күрделі органика) – МИП негізіндегі композиттер ұсынылады.

Гидрогельдер

Целлюлоза негізіндегі гидрогельдер – карбоксиметилцеллюлоза, гидроксипропилметилцеллюлоза және этилцеллюлоза сияқты целлюлоза туындыларынан синтезделген үш өлшемді полимерлі жүйелер; олар адсорбция тиімділігінде маңызды рөл атқарады [23, 27, 90, 100]. Гидрогельдердің жоғары кеуектілігі және көптеген гидрофильді функционалдық топтары (-OH, -COOH және -SO_3H) оларға құрылымдық тұтастығын сақтай отырып, көп мөлшерде суды сіңіруге және сақтауға мүмкіндік береді [23, 27, 90, 100]. Наноцеллюлоза негізіндегі гидрогельдерді дайындаудың негізгі торлану стратегиялары 7-суретте көрсетілген.



Сурет 7 – Наноцеллюлоза негізіндегі гидрогельдерді дайындаудың жалпыланған схемасы: физикалық, химиялық, иондық, ферменттік және радиациялық торлану әдістері

Гидрогельдердің синтетикалық бояғыштарды жою тиімділігі

Наноцеллюлоза негізіндегі гидрогель жүйелері синтетикалық бояғыштарды тазартуда айтарлықтай нәтиже көрсетеді [24]. TEMPO-тотыққан наноцеллюлоза 769 мг/г метилен көгіне дейін адсорбциялайды, сульфатталған түрі 118 мг/г, ал периодат-тотыққан катионды наноцеллюлоза 556 мг/г дейін қышқыл қызыл GR және 2100 мг/г дейін Конго қызылының сорбциясын қамтамасыз етті [24]. Хитозан, карбоксиметилцеллюлоза және наноцеллюлоза негізіндегі жүйелер катионды және анионды бояғыштарды кетіруге қабілетті екені көрсетілді: pH 7 кезінде метилен көгінің шамамен 99%-ы және pH 3 кезінде метилен қызғылт-сарының шамамен 82%-ы; тіпті 20 регенерация циклінен кейін де тиімділік сақталатыны байқалды [23].

Гидрогельдердің ауыр металдарды жою тиімділігі

Карбоксилденген целлюлоза нанофибриллаларына негізделген гидрогельдер төрт сағат ішінде шамамен 171 мг/г адсорбциялық сыйымдылығымен Pb^{2+}-тің шамамен 90%-ын кетіреді, ал Cu^{2+}, Ni^{2+} және Hg^{2+} үшін алынған мәндер сәйкесінше 182-230 мг/г, шамамен 200 мг/г және шамамен 140 мг/г құрайды [84]. Күкірт қышқылымен белсендірілген каолинмен модификацияланған SA/CMC негізіндегі гидрогель адсорбенті Pb^{2+} үшін 879,84 мг/г және Cu^{2+} үшін 543,50 мг/г мәндерін көрсетті; бес сорбциялық-десорбциялық циклден кейін қорғасын үшін тиімділіктің шамамен 80%-ы және мыс үшін 79%-ы сақталды [1].

Наноцеллюлоза негізіндегі гидрогельдердің органикалық бояғыштар мен ауыр металдарды адсорбциялаудағы тиімділігі 7, 8-кестеде жинақталған.

Кесте 7 – Наноцеллюлоза негізіндегі гидрогельдердің бояғыштарды адсорбциялаудағы тиімділігі

Адсорбент	Бояғыш түрі	Qmax, мг/г	Механизм ерекшелігі	Сілтеме
CMC/PAA/GO гидрогель	Метилен көгі	138,4	Электростатикалық өзара әрекеттесу	[3, 100]
Магниттік НЦ (m-Alg/RH)	Метилен көгі	274,9	Магнитпен бөлу	[84, 100]
PAA/CS/Fe_3O_4 (магниттік қосылыс)	Метилен көгі	1603,0	Электростатикалық өзара әрекеттесу, ісіну дәрежесінің жоғары болуы	[85]
ТНФЦ/GO/PEI гидрогель	Метилен көгі	32,3	Компоненттердің синергиясы	[19]
Крахмал-g-P (AMPS-co-AA)/МЦНКs	Кристалды күлгін	2500,0	3D құрылымына байланысты өте жоғары сорбция	[23]
CS/CMC-PEG гидрогель	Конго қызылы	1053,88	π-π өзара әрекеттесу және сутектік байланыстар	[23, 100]
Chlorella vulgaris-тан НЦ	Метилен көгі	109,03	Сыйымдылық 4 есеге артады	[12]
HEC және лигнин негізіндегі гидрогель	Родамин 6G	153,0	π-π өзара әрекеттесу және гидрофобты байланыстар	[85, 100]
Аэрогель CMC/НФЦ-C	Метилен көгі	579,50	Жоғары кеуектілік және электростатикалық тартылыс	[3]
SA/AAc/графит	Малахит жасылы (MG)	628,9	Ион алмасуы, электростатикалық тартылыс	[85]
БНЦ (бактериалды наноцеллюлоза)	Метил қызғылт-сары (MO)	93-96 % (жою)	Гидрофобты байланыс	[102]
SA/CMC/SKL (каолинмен модификацияланған)	Метилен көгі	805,16	Ион алмасуы, электростатикалық тартылыс	[1]
CS-g-PAA/HT (галлуазит)	Метилен көгі	1336,05	Электростатикалық өзара әрекеттесу ($-COO^-/MB^+$), сутектік байланыстар	[102]

Кесте 8 – Наноцеллюлоза негізіндегі адсорбенттердің ауыр металдарды тазалаудағы тиімділігі

Адсорбент (Композит)	Металл ионы	Qmax, мг/г	Тазарту механизмі	Оптималды pH/регенерация циклы	Сілтеме
1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*
NOНФЦs (азотпен тотыққан джут нанофибриллдері)	Pb^{2+}	2270,0	Электростатикалық тартылыс, координациялық байланыстардың түзілуі	-	[104]
NaAlg/PAMPS	Pb^{2+}	2042,0	Хелатация және электростатикалық өзара әрекеттесу	pH 11 / 5 цикл	[100]
SLS/DTPA@ZIF-8 (Лигносульфонат/MOF)	Pb^{2+}	1021,85	Беттік комплекс түзілу және ион алмасу	pH 6 / 5 цикл (0.1M HNO_3)	[83]

1	2	3	4	5	6
Хитозан-g-PAA + ЦНК	Pb^{2+}	935,8	Функционалдық топтармен үйлестіру (-COOH, -OH)	pH 4 / 5 цикл (0.1M HCl)	[23, 104]
SA/CMC/SKL (Альгинат/КМЦ/Каолин)	Pb^{2+}	879,84	Хелатация, иондық алмасу және электростатикалық өзара әрекеттесу	pH 4 / (0.1M HCl)	[1]
Целлюлоза-g-акрил қышқылы	Pb^{2+}	825,7	Металл катиондары мен $-COO^-$ топтары арасындағы иондық алмасу	pH 5-6 / 3 цикл (15% жоғалту)	[105]
Тиолмен модификацияланған НЦ (аэрогель)	Hg^{2+}	700,0	Химиялық кешен түзілуі және күкірт атомдарымен әрекеттесуі	3 цикл (Na-EDTA)	[45, 104]
Ксилан байгемицеллюлоза-g-AA	Pb^{2+}	683,0	Хелатация, иондық алмасу	pH 5-6 / бірнеше рет қайта пайдалану	[102, 106]
SA/НФЦ микросфералары	Pb^{2+}	676,97	$-COO^-$ және -OH топтарымен электростатикалық өзара әрекеттесу	pH 5	[5, 102, 106]
НЦ/CDs/титанат (Флуоресцентті гидрогель)	Cr(VI)	648,4	Электростатикалық адсорбция және амин топтарымен кешен түзілу	-	[23, 26]
SA/CMC/SKL	Cu^{2+}	543,51	Ион алмасуы және беттік кешен түзілуі	pH 5 / 1 M HCl	[1]
CMC/PEI (МКЦ және полиэтиленимин)	Cr(VI)	312,5	$-NH_2$-ға электростатикалық тартылыс және Cr^{3+} дейін тотықсыздану	Қышқылдық орта / 4 цикл	[85, 104]
CMC/PAM (МКЦ және полиакриламид)	Cd^{2+}	256,4	Амид және карбоксил топтарымен координация	pH 5,5	[85, 91, 104]
Биогибридті НЦ/хитин (Аэрогель)	As(III)	217,0	Сутектік байланыстар және электростатикалық өзара әрекеттесу	Бейтарап орта	[23, 104]

Мембраналар

Наноцеллюлоза негізіндегі мембраналар адсорбент пен селективті тосқауылдың қасиеттерін біріктіреді; бұл оларға ластаушы заттарды тек байланыстыру арқылы ғана емес, сонымен қатар өлшемдік іріктеу және бақыланатын сүзу механизмдері арқылы да жоюға мүмкіндік береді [5, 22]. Натрий альгинатына, целлюлоза нанофибриллаларына және UiO-66 негізіндегі композиттік мембрана 0,4 МПа қысымда Pb^{2+}-тің 99,9%-ын, Cu^{2+}-тің 98,5%-ын және Cd^{2+}-тің 96,5%-ын сақтап қалды, ал Конго қызылын, тартразинді және метилен көгі бояғышын кетіру 98%-дан асты [5]. Сонымен қатар сүзу және регенерацияның он циклынан кейін мембрана бастапқы тиімділігінің 90%-дан астамын сақтап қалды [5].

ЦНК/НФЦ-мембраналар фильтрация мен деионизацияда, сондай-ақ су-мұнай эмульсияларын бөлуде қолданылады; жоғары кеуектілік пен гидрофильді қабат тиімді сүзуді салыстырмалы төмен гидравликалық кедергімен қамтамасыз етеді.

Аэрогельдер

Нановолокондардан жасалған аэрогельдер өте төмен тығыздықпен (2 мг/см³-ден аз) және ультражоғары кеуектілікпен (>99%) сипатталады; олардың су ұстау қабілеті өз салмағынан жүздеген есе асады (≈100 г/г дейін) [107]. НФЦ/графен наноқабатты нанокомпозиттік аэрогельдер метилен көгі үшін 1178 мг/г және Конго қызылы үшін 585 мг/г сорбциясын көрсетті, ал кеуекті rGO/ЦНК құрылымдары бояғыштар үшін 850 мг/г дейінгі сорбцияны көрсетті [3, 22].

Гидрофобталған наноцеллюлоза негізіндегі аэрогельдер мұнай өнімдерін сіңіруде де жоғары тиімділік көрсетеді: 279 г/г кастор майын, 101 г/г дизель отынын және 185 г/г өсімдік майын сіңіре алады, ал су-органикалық қоспалардың бөліну тиімділігі 99,97%-ға жетеді [22].

Басқа органикалық ластаушыларды жою

Наноцеллюлоза фенолдық қосылыстарды, антибиотиктерді, пестицидтерді және мұнай өнімдерін қоса алғанда, басқа органикалық ластаушы заттарды ағын сулардың құрамынан тазалауда да жоғары тиімділікке ие. ZnO және магнетитпен модификацияланған целлюлоза ацетатына негізделген композит екі сағат ішінде фенолды шамамен 64%-ға кетірді [101]. Наноцеллюлозаның ауылшаруашылық ағынды сулары мен топырақ ерітінділерінен алынған нитраттарды, сондай-ақ хлорпирифос, тетраконазол, диурон, дифеноконазол және нитенпирам сияқты пестицидтерді тиімді байланыстыру мүмкіндігі көрсетілген [25]. Антибиотиктерді жою бойынша: ZIF-67/альгинат үшін ципрофлоксациннің сорбциялық сыйымдылығы 364,89 мг/г құрады, ал CNT/GO/SA негізіндегі үш торлы жүйелер үшін ципрофлоксациннің сыйымдылығы 158,5 мг/г-ға жеткен [83].

Сенсорлық және мониторинг жүйелері

Наноцеллюлоза негізіндегі гидрогельдер қоршаған ортаны бақылау платформалары ретінде де зерттелуде [26]. Наноцеллюлозаға, титанат нанофибриллаларына және көміртек кванттық нүктелеріне негізделген флуоресцентті гидрогельдер Cr(VI)-ны бір мезгілде анықтауға және жоюға қабілетті: флуоресценция ион концентрациясының артуымен басылады, бұл жылдам визуалды реакцияны қамтамасыз етеді [26]. Осыған ұқсас алтын нанокластерлері бар жүйелер Hg^{2+} үшін жоғары сезімталдықты көрсетті; аналитикалық және қайта қалпына келтіру функцияларын бір материалда біріктіруге болатыны осы зерттеулерден айқын көрінеді [26].

Наноцеллюлоза негізіндегі адсорбенттердің артықшылықтары, кемшіліктері және болашақ зерттеу бағыттары

Артықшылықтары

Соңғы жылдары наноцеллюлоза негізіндегі материалдар ластанған ортаны тазарту және қайта қалпына келтіру технологияларында қолданылатын экологиялық таза адсорбенттерді дайындау үшін ең перспективті көпфункционалды материалдардың бірі болып саналды; бұл наноцеллюлозаның су жүйелерінен әртүрлі ластаушы заттарды кетіруде жоғары тиімділікті қамтамасыз ететін физикалық-химиялық, құрылымдық және экологиялық сипаттамалардың бірегей үйлесіміне байланысты [3, 22, 101].

Жаңартылатын шикізат және экономикалық тиімділік

Наноцеллюлозаны ағаш, ауыл шаруашылық қалдықтары және басқа да лигноцеллюлозалық ресурстарды қоса алғанда, биомассаның кең ауқымынан алуға болады [20]. Ауыл шаруашылығы қалдықтарын (күріш қабығы, торт, сабан) шикізат ретінде пайдалану өндірісті белсендірілген көмір сияқты дәстүрлі сорбенттерге қарағанда арзанырақ етеді [21, 35, 102].

Биоыдырауы және қоршаған ортаға үйлесімділігі

Көптеген синтетикалық полимерлерден айырмашылығы, наноцеллюлоза негізіндегі материалдар тұрақты улы қалдықтар түзбейді және биологиялық ыдырауы жеңіл, бұл оларды экологиялық таза адсорбенттер қатарына қосады [3].

Жоғары меншікті беттік аудан және химиялық белсенділік

Наноцеллюлоза материалдарының жоғары меншікті беттік ауданы (жүздеген $м^2/г$) көптеген қолжетімді сорбциялық орындарды қамтамасыз етеді [22, 23, 83, 101]. -OH, -COOH және $-NH_2$ сияқты белсенді функционалдық топтардың болуы ауыр металл иондарымен координациялық байланыстар түзуге, ион алмасуына қатысуға, сутектік байланыстарды түзуге және электростатикалық тартылысты қамтамасыз етуге көмектеседі [45, 101, 102].

Механикалық қасиеттері

Наноцеллюлоза композиттік гидрогельдерде күшті армирлеуші агент ретінде әрекет етеді, олардың беріктігі мен құрылымдық тұрақтылығын айтарлықтай арттырады [25, 26, 102].

Регенерация қабілеті

Адсорбенттерді бірнеше рет (кейбір жағдайларда 20 циклге дейін) қалпына келтіруге болады; жұмсақ элюенттерді (қышқыл немесе сілті) қолданған кезде 80-90%-дан астам тиімділікті сақтайды [23, 35, 83, 102].

6.1.6. Функционализация мүмкіндігі

Металл оксидтері, көміртекті материалдар немесе металл-органикалық қаңқалар сияқты әртүрлі нанотолтырғыштарды енгізу жақсартылған сорбциялық қасиеттері бар гибридті жүйелерді жасауға мүмкіндік береді [5, 83].

Наноцеллюлоза адсорбенттерінің негізгі артықшылықтары мен кемшіліктері 9-кестеде жинақталған.

Кесте 9 – Наноцеллюлозаның артықшылықтары мен кемшіліктерін салыстыру кестесі

Артықшылықтары	Сипаттамасы	Сілтеме
Экологиялылық	Наноцеллюлоза – биомассадан алынған толығымен жаңартылатын және биологиялық ыдырайтын материал. Ол улы бөлінділер шығармайды, сондықтан қоршаған ортаға зиянсыз.	[20, 25, 35, 102, 104, 105]
Меншікті беттік аудан	Материалдың өте жоғары меншікті беттік ауданы бар (жүздеген м²/г), бұл ластаушы заттарды ұстап қалу үшін көптеген белсенді орталықтарды қалыптастырады. Бұл жоғары адсорбциялық қабілетті қамтамасыз етеді.	[19, 20, 24, 102]
Химиялық белсенділік	Беткі гидроксил топтарының көптігі белгілі бір иондарды немесе бояғыштарды селективті түрде жою үшін оңай химиялық функционалдандыруға (карбоксилдеу, аминдеу, полимер егу) мүмкіндік береді.	[27, 34, 45, 105]
Механикалық қасиеттері	Наноцеллюлоза композиттік гидрогельдерде күшті армирлеуші агент ретінде әрекет етеді, олардың беріктігі мен құрылымдық тұрақтылығын айтарлықтай арттырады.	[25, 26, 102]
Экономикалық тиімділік	Ауыл шаруашылығы қалдықтарын (күріш қабығы, торт, сабан) шикізат ретінде пайдалану өндірісті белсендірілген көмір сияқты дәстүрлі сорбенттерге қарағанда арзанырақ етеді.	[21, 35, 102]
Регенерация	Адсорбенттерді бірнеше рет (кейбір жағдайларда 20 циклге дейін) қалпына келтіруге болады, сонымен қатар жұмсақ элюенттерді (қышқыл немесе сілті) қолданған кезде 80-90%-дан астам тиімділікті сақтайды.	[23, 35, 83, 102]
Кемшіліктері	Сипаттамасы	Сілтеме
Агломерация	Жоғары беттік энергиясы және күшті сутектік байланыстардың түзілуіне байланысты нанобөлшектер агрегатқа бейім, бұл қолжетімді беттік ауданды күрт азайтады.	[24, 35, 102]
Масштабталу	Көптеген синтез әдістері зертханада жоғары нәтиже көрсетеді, бірақ өнеркәсіптік масштабқа көшіру процесті басқарудың күрделілігіне және шикізаттың гетерогенділігіне байланысты қиын.	[23, 90, 101, 102]
Энергия шығыны	Механикалық өндіріс әдістері (жоғары қысымды гомогендеу, ұнтақтау) айтарлықтай энергия шығынын талап етеді, бұл өнімнің құнын арттырады.	[21, 23, 101]
Сілтіленуі	Адсорбент матрицасынан тазартылған суға нанобөлшектердің немесе катализаторлардың сілтіленуі екінші реттік ластануды тудыруы мүмкін және уыттылықты бағалауды қажет етеді.	[23, 35, 90]
Ылғалдылықтың әсері	Кептірілген кезде наноцеллюлоза «мүйіздену» процесінен өтіп, икемділігін және қайта таралу қабілетін жоғалтуы мүмкін.	[21, 24, 35]
Күрделі матрицалар	Зерттеулердің көпшілігі бір ластаушы заттан тұратын модельдік ерітінділерде жүргізіледі; нақты ағынды суларда бәсекелес иондар адсорбция тиімділігін айтарлықтай төмендетуі мүмкін.	[83, 84, 102, 104]

Нақты ағынды суларда тиімділік және тұрақтылық

Наноцеллюлоза негізіндегі адсорбенттердің зертханалық модельдік ерітінділерде көрсеткен жоғары сорбциялық сыйымдылығы нақты өнеркәсіптік ағынды суларда үнемі сол деңгейде сақтала бермейді. Бұл айырмашылықтың басты себебі – нақты ағындылардың күрделі матрицасы: жоғары минералдану (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+}), еріген органикалық зат, өлшенген бөлшектер, майлар, беттік-белсенді заттар және иондық күштің жоғары болуы [110, 111]. Бұл компоненттер адсорбция бәсекелестігі, функционалдық топтардың экрандалуы және бетте қабықша қалыптасуы арқылы мақсатты ластаушы затқа қатысты сорбциялық сыйымдылықты 20-60%-ға дейін төмендетеді [111, 112].

Функционалдық топтардың тұрақтылығы да маңызды фактор. TEMPO-тотыққан НФЦ-де карбоксил топтары, амин- және тиол-модификацияланған наноцеллюлозада сәйкесінше – $-H_2$ және -SH топтары – ұзақ экспозицияда, әсіресе төмен pH (pH<3) мен жоғары температурада (>60° C) ішінара деградацияға ұшырайды. Соған қарамастан, TEMPO-НФЦ негізіндегі сүзгі-мембраналар Cu(II) және Ca(II) иондарын адсорбциялауда 76-90% бастапқы сыйымдылықты регенерация циклінен кейін қалпына келтіреді, бұл пилоттық-ауқымды сынақтармен расталған [110]. МИП-графтталған ЦНФ адсорбенттер 10 цикл регенерациядан кейін де сыйымдылықты елеусіз жоғалтады, ал фенол-импринтталған ЦНФ құрылымдық ұқсас

қосылыстар (2-хлорфенол, 4-хлорфенол, 2,4-дихлорфенол) болған жағдайда да фенолды 97% тиімділікпен адсорбциялайды [112].

Механикалық тұрақтылық пен биодеградация қарама-қарсы талаптарды тудырады: наноцеллюлоза материалдары экологиялық таза және биоыдырайтын болғаны дұрыс, бірақ өнеркәсіптік сүзгі ретінде олар механикалық жүктемеге, ағым қысымына және микробтық әсерге ұзақ мерзімді төзуі керек. Бұл қайшылықты шешу үшін соңғы зерттеулерде наноцеллюлозаны МОК (металл-органикалық қаңқалар), графен оксиді, Fe_3O_4 наноқұрылымдары және цеолиттермен біріктіру ұсынылады – бұндай композиттер жеке наноцеллюлоза адсорбенттеріне қарағанда екі-үш есе жоғары циклдік тұрақтылық көрсетеді [92, 108].

Алайда, жарияланған жұмыстардың басым бөлігі (>85%) зертханалық деңгеймен шектеледі; пилоттық және жартылай өнеркәсіптік сынақтар саны өте аз [110]. Осыған байланысты нақты өнеркәсіптік ағынды суларда (тоқыма, гальваника, фармацевтика, мұнай өңдеу) ұзақ мерзімді тестілеу, сондай-ақ биообрастанудан қорғау стратегияларын (мысалы, антимикробтық агенттермен бірге функционализациялау) әзірлеу – наноцеллюлоза адсорбенттерінің шынайы индустриялық енгізілуі үшін шешуші маңызды қадамдар болып табылады.

Экономикалық тиімділік және дәстүрлі адсорбенттермен салыстыру

Наноцеллюлоза негізіндегі адсорбенттердің өнеркәсіптік қолданылуы тек техникалық көрсеткіштерге ғана емес, экономикалық тиімділікке де байланысты. 2023 жылы жүргізілген жүйелі техника-экономикалық талдау мәліметтері бойынша, қазіргі өндіріс масштабында ЦНК-ның минималды сату бағасы шикізат пен өндіріс жолына байланысты 7-15 USD/кг, НФЦ үшін 5-10 USD/кг, ал БНЦ-ның өзіндік құны 20-40 USD/кг деңгейінде бағаланады [113]. Бұл көрсеткіштер белсенді көмір (~1-3 USD/кг), цеолиттер (~0,5-2 USD/кг) және хитозан (~10-20 USD/кг) сияқты дәстүрлі адсорбенттермен салыстырғанда әлі де жоғары [113, 114].

Алайда, тура бағаны салыстыру толық экономикалық көрініс бермейді. Наноцеллюлоза адсорбенттерінің меншікті сорбциялық сыйымдылығы (мг/г) белсенді көмірден 3-10 есе, цеолиттерден 5-15 есе жоғары болуы мүмкін [111, 114]. Бұл бір килограмм ластаушы затты жою үшін қажетті материалдың массасы пропорционалды түрде аз болатынын білдіреді. Сонымен қатар, функционализацияланған наноцеллюлоза (әсіресе МИП негізіндегілер) селективтілік бойынша дәстүрлі адсорбенттерден айтарлықтай асып түседі, бұл көпсатылы тазарту қажеттігін азайтады [112]. Регенерация қабілеті жоғары (10-20 циклге дейін 80-90% сыйымдылықты сақтау) болғандықтан, адсорбенттің «тиімді» өзіндік құны (кг адсорбент × цикл саны негізінде) бәсекеге қабілетті деңгейге жақындайды.

Бұған қоса, ауылшаруашылық қалдықтарынан (күріш қауызы, соя қабығы, жүгері қауызы, бадам қабығы) алынған наноцеллюлоза бағасы 2-5 USD/кг деңгейіне дейін төмендеуі мүмкін; мұндай материалдар ауыр металдарды (Pb, As) тиімді сорбциялай алады және тұрақты даму принциптеріне толық сәйкес келеді [115, 116]. Терең эвтектикалық еріткіштер мен ультрадыбыстық өңдеуді біріктіретін «жасыл» әдістер күшті қышқылдарды (H_2SO_4) пайдалану қажеттігін азайтады, еріткіштер қайта пайдаланылады, ал энергия шығыны 15-25%-ға төмендейді [117, 108].

Осылайша, наноцеллюлоза адсорбенттері қазіргі уақытта құны жағынан муниципалдық ауқымдағы сумен жабдықтау жүйелерінде кең таралған белсенді көмір мен цеолиттерге бәсекелес бола алмайды. Алайда олар концентрацияланған өнеркәсіптік ағындыларды тазалауда (гальваника, тоқыма, фармацевтикалық өндіріс, сирек металдарды қалпына келтіру) - яғни жоғары сорбциялық сыйымдылық, селективтілік және биоыдырау қажет болатын ерекше ниша салаларында – технологиялық және экологиялық тұрғыдан айқын артықшылық көрсетеді.

Болашақ зерттеу бағыттары

Жалпы алғанда, ұсынылған әдебиеттерді талдау наноцеллюлозаның қоршаған ортаға қолданылуы өте алуан түрлі екенін және ағын суларды ластаушы жеке заттардың қарапайым сорбциясынан әлдеқайда тиімдірек екенін көрсетеді [19, 20, 22, 25, 26, 83, 101]. Дегенмен, бұл салада бірқатар ғылыми және технологиялық олқылықтар сақталуда.

Көпкомпонентті жүйелерді зерттеу. Нақты көп компонентті жүйелердегі ластаушы заттардың адсорбциялық процестерін егжей-тегжейлі зерттеу қажет, себебі зертханалық зерттеулердің көпшілігі модельдік ерітінділерді қолдану арқылы жүргізіледі [45, 90]. Нақты

ағынды суларда бәсекелес иондар адсорбция тиімділігін айтарлықтай төмендетуі мүмкін [83, 84, 102, 104].

Көпфункционалды композиттер жасау. Бірнеше суды тазарту механизмдерін біріктіретін көпфункционалды наноцеллюлоза негізіндегі композиттерін жасау [5, 83]. Металл-органикалық қаңқаларды, көміртекті материалдарды немесе металл оксидтерін қамтитын гибридті жүйелер бір мезгілде ластаушы заттарды адсорбциялай алады, олардың ыдырауын катализдей алады және селективті сүзуді қамтамасыз ете алады.

Механикалық тұрақтылықты арттыру. Көптеген регенерация циклдарында тиімділігін сақтай алатын тұрақты және механикалық тұрғыдан берік наноцеллюлоза материалдарын әзірлеу қажет [45, 90].

Изоцианатты модификацияны тереңдету. Изоцианаттар арқылы функционализацияланған наноцеллюлоза адсорбенттері ауыр металдар мен органикалық бояғыштарды жоюда жоғары тиімділік көрсеткенімен, бұл бағытта жүйелі зерттеулер әлі де жеткіліксіз. Әсіресе ТД-изо-Ц, ДФМД-изо-Ц және ГМД-изо-Ц негізіндегі наноцеллюлоза композиттерінің нақты ағынды сулардағы адсорбциялық мінез-құлқын зерттеу болашақтың маңызды бағыты болып табылады [47, 48].

Өнеркәсіптік масштабтаудың нақты әдістері. Наноцеллюлоза өндірісінің дәстүрлі батч-режимдегі қышқыл гидролизі мен TEMPO-тотығуы жоғары энергия мен реагент шығынын талап етеді. Соңғы жылдары бірнеше нақты технологиялық шешім ұсынылды:

(1) Терең эвтектикалық еріткіштер (deep eutectic solvents, DES) – холин хлориді/щавель қышқылы жүйесі ультрадыбыспен біріктірілгенде бір өтпеде крафт-целлюлозаны ЦНФ/ЦНК-ға ыдыратады; DES қайта пайдаланылады, бұл H_2SO_4 қажеттігін азайтады және жасыл химия принциптеріне сай келеді [117];

(2) Жұмсақ тазалау (moderate refining) және көбік флотациясы (froth flotation) комбинациясы – пилоттық масштабта жылдық операциялық шығын 7312 AUD/тонна болатын экономикалық тиімді сценарий ұсынады; сезгіштік талдау капитал шығындарын басты фактор ретінде анықтайды [115];

(3) Ферменттік гидролиз (рекомбинантты эндоглюканазалар) – қышқылсыз жол, бірақ ферменттің құны әлі жоғары;

(4) Үздіксіз ағынды (continuous-flow) TEMPO-тотықтыру реакторлары – NaOCl тұтынуын 30-40%-ға азайтады және өнімнің біркелкілігін қамтамасыз етеді.

Нақты технологиялар мен интеграция шешімдері. Наноцеллюлоза адсорбенттерін қолданыстағы суды тазарту жүйелеріне біріктіру үшін келесі нақты бағыттар перспективалы:

(1) Магнитті наноцеллюлоза композиттері (Fe_3O_4-функционализацияланған ЦНК/НФЦ, сондай-ақ наноцеллюлоза-МОК гибридтері) - сыртқы магнит өрісі арқылы тазартылған судан жеңіл бөлінеді; мұндай композиттер антибиотиктер, ауыр металдар мен бояғыштарды тиімді адсорбциялайды және биоыдырайтын қаңқа мен жоғары беттік ауданды біріктіреді [122];

(2) Наноцеллюлоза мембраналарын мембраналық биореакторларда (MBR) және жұқа қабатты нанокомпозитті (TFN) мембраналарда пайдалану – антифулинг қасиеттерін арттырады және тазарту тиімділігін жақсартады;

(3) Гранулаланған наноцеллюлозалы бағаналық жүйелер – зертханалық партиялық тестерден көрі өнеркәсіптік ағынды суды үздіксіз өңдеуге жақын келеді;

(4) Фермент иммобилизацияланған наноцеллюлоза (лакказа, пероксидаза) – органикалық ластаушыларды тек сорбциялап қана қоймай, каталитикалық ыдыратады;

(5) Микропластик жою жүйелері – татбақ бактериалдық целлюлоза мен TEMPO-НФЦ гидрогельдері полистирол және басқа микропластиктерді 93-96% тиімділікпен ұстайды – суды тазартудың жаңа бағыты [111].

Стандарттау және қауіпсіздік. Өнеркәсіптік қолдануға ауысу үшін наноцеллюлоза адсорбенттерін сипаттауға арналған бірыңғай ISO/ASTM стандарттарын әзірлеу және тазартылған судағы қалдық наноцеллюлоза бөлшектерінің уыттылығы мен биожинақталуын бағалау өзекті міндеттер болып табылады. Бұл аспектілер қазіргі әдебиетте жеткіліксіз қамтылған және болашақ зерттеулер үшін маңызды олқылық болып қалады.

Қорытынды

Осы шолу мақаласында судағы органикалық және бейорганикалық ластаушыларды жоюға арналған функционалданған наноцеллюлоза негізіндегі адсорбенттердің түрлері, алу

мен функционалдандыру әдістері, тиімділігі және болашақ даму перспективалары жан-жақты талданды.

Талдаулардан наноцеллюлоза негізіндегі материалдардың ағын сулардан синтетикалық бояғыштарды, ауыр металдарды, мұнай өнімдерін, антибиотиктерді, пестицидтерді және басқа да органикалық қосылыстар түріндегі ластаушы заттардың кең ауқымын тиімді түрде жоя алатыны байқалады. Целлюлоза нанокристалдары (ЦНК), нанофибриллалы целлюлоза (НФЦ) және бактериялық наноцеллюлоза (БНЦ) – әрқайсысы өзіндік морфологиясымен, кристалдылығымен және функционалдық мүмкіндіктерімен ерекшеленетін - адсорбциялық материалдар жасау үшін бай шикізат болып табылады [3, 13, 20, 22].

Беттік модификация - атап айтқанда TEMPO-тотығуы, сульфаттау, аминдеу, тиол функционализациясы және изоцианаттар арқылы өңдеу – наноцеллюлозаның адсорбциялық қасиеттерін мақсатты түрде реттеуге мүмкіндік беретін стратегиялық тәсіл болып табылады [14-17, 29]. Фенилизоцианат, толуол диизоцианаты (ТД-изо-Ц) және дифенилметан диизоцианаты (ДФМД-изо-Ц) сияқты моно- және диизоцианаттардың қолданылуы наноцеллюлозаның полярсыз матрицалармен үйлесімділігін арттырып, композиттік адсорбенттердің жаңа буынын жасауға жол ашады [16-18].

Гидрогельдер, мембраналар, аэрогельдер және композиттік жүйелер түріндегі наноцеллюлоза негізіндегі адсорбенттер жоғары сорбциялық сыйымдылықты – метилен көгі үшін 769 мг/г-дан 2500 мг/г-ға дейін, қорғасын иондары үшін 879 мг/г-дан 2270 мг/г-ға дейін – және жақсы регенерация қабілетін (20 циклге дейін 80-90% тиімділікпен) көрсетеді [1, 23, 24, 104]. Наноцеллюлозаның MOF құрылымдарымен, графен оксидімен және магниттік нанобөлшектермен үйлесуі селективтілікті одан әрі жақсартып, бір материалда бірнеше ластаушы зат класын бір мезгілде жоюға мүмкіндік береді [5, 108].

Наноцеллюлоза адсорбенттерінің айрықша артықшылығы – оларды күріш қабығы, соя қабығы, зірә қабығы сияқты ауылшаруашылық қалдықтарынан алу мүмкіндігі [19-21]. Бұл тәсіл тұрақты даму және айналмалы экономика қағидаттарына толық сәйкес келеді: агроқалдықтар бағалы шикізатқа айналады, қоршаған ортаға түсетін жүктеме азаяды.

Алайда осы саладағы бірқатар мәселелер толық шешімін таппаған. Нанобөлшектердің агрегациялану үрдісі, механикалық беріктіктің төмендігі, өнеркәсіптік масштабтаудың күрделілігі және нақты көпкомпонентті ағынды суларда тиімділіктің төмендеуі - болашақ зерттеулердің басым бағыттары болып табылады [22, 24, 83, 90]. Сонымен қатар, изоцианат модификациясы негізіндегі наноцеллюлоза адсорбенттерінің нақты ағынды сулардағы мінез-құлқын жүйелі зерттеу, сондай-ақ суды тазарту жүйелеріне кіріктіруге арналған пилоттық сынақтар жүргізу қажет.

Жалпы алғанда, наноцеллюлоза және оның функционалданған туындылары – жаңартылатын шикізат, биоыдырағыштық, жоғары сорбциялық сыйымдылық, химиялық түрлендіру мүмкіндігі және айналмалы экономикада пайдалану перспективасының бірегей үйлесімі арқасында – ағын суларды тазарту және қоршаған ортаны қорғауға арналған тұрақты адсорбциялық технологияларды дамытудың ең перспективті бағыты болып табылады [3, 22, 83, 101].

Әдебиеттер тізімі

1. Construction of cellulose-based hydrogel compounded with modified kaolin and its removal performance for heavy metal ions and dyes in water / J. Chen et al // International Journal of Biological Macromolecules. – 2025. – Vol. 306. – P. 141398.
2. Zhang Y. Construction of three-dimensional aerogels from electrospun cellulose fibers as highly efficient and reusable oil absorbents / Y. Zhang, Y. Wang // Separation and Purification Technology. – 2025. – Vol. 353. – P. 128604.
3. Cellulose based membranes, hydrogels and aerogels for water treatment application / K. Sharma et al // Industrial Crops & Products. – 2025. – Vol. 225. – P. 120474.
4. Qadir M. Domestic wastewater treatment and agricultural reuse progress and reporting challenges / M. Qadir, P. Drechsel, E.R. Jones // Discover Water. – 2025.
5. Sodium alginate-based nanocomposite hydrogel membrane for removal of heavy metal ions and dyes in water / J. Qiao et al // International Journal of Biological Macromolecules. – 2025. – Vol. 307. – P. 142109.

6. Synergistic coacervation-micelle extraction enables rapid and efficient removal of ultrahigh-concentration organic dyes from wastewater / T. Wang et al // Chemical Engineering Journal. – 2026. – Vol. 529. – P. 173028.
7. Wastewater as a driver of heavy metal pollution in river catchments – A study of possible scenarios / D. Matuszewska et al // Journal of Hazardous Materials. – 2025. – Vol. 499. – P. 140029.
8. Tejada-Tovar C. Removal of Metals and Dyes in Water Using Low-Cost Agro-Industrial Waste Materials / C. Tejada-Tovar, Á. Villabona-Ortíz, R. Ortega-Toro // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13. – P. 8481.
9. Dyes and Heavy Metals Removal from Aqueous Solutions Using Raw and Modified Diatomite / S.G. Muntean et al // Processes. – 2023. – Vol. 11. – P. 2245.
10. Phytoremediative adsorption methodologies to decontaminate water from dyes and organic pollutants / A. Kanwal et al // RSC Advances. – 2023. – Vol. 13. – P. 26455-26474.
11. Recent advances in wastewater treatment technologies: Innovations and new insights / A.K. Worku et al // Energy Reviews. – 2025. – Vol. 4. – P. 100164.
12. Marinho E. Cellulose: A comprehensive review of its properties and applications / E. Marinho // Sustainable Chemistry for the Environment. – 2025. – Vol. 100283.
13. Sanchez-Salvador J.L., Xu H., Balea A., Fuente E., Monte M.C., Blanco A., Negro C. Nanocellulose, a Promising Raw Material: Improving the Scalability of TEMPO-Mediated Oxidation Process.
14. Fraschini C. TEMPO-mediated surface oxidation of cellulose nanocrystals (CNCs) / C. Fraschini, G. Chauve, J. Bouchard // Cellulose. – 2017. – Vol. 24. – P. 2775-2790.
15. Preparation, characterization and acetylation of cellulose nanocrystal allomorphs / Z. Wu et al // Cellulose. – 2018. – Vol. 25. – P. 4905-4918.
16. Partial carbamoylation of cellulose microspheres: A new method to prepare adsorbents for liquid chromatography / W. Chen et al // Chinese Journal of Polymer Science. – 2013. – Vol. 31. – P. 1725-1732.
17. Homogeneous synthesis of partially substituted cellulose phenylcarbamates aiming at chiral recognition / W. Chen et al // Polymer International. – 2015. – Vol. 64. – P. 1037-1044.
18. Habibi Y. Highly filled bionanocomposites from functionalized polysaccharide nanocrystals / Y. Habibi, A. Dufresne // Biomacromolecules. – 2008. – Vol. 9. – P. 1974-1980.
19. Liao J. The mechanism of gels based on nano-cellulose and nano-chitin: A review / J. Liao, Z. Li, J. Zhang // International Journal of Biological Macromolecules. – 2025. – Vol. 322. – P. 146716.
20. Polyethylenimine functionalized graphene oxide and cellulose nanofibril composite hydrogels: Synthesis, characterization and water pollutants adsorption / Y. Nan et al // Carbohydrate Polymer Technologies and Applications. – 2024. – Vol. 8. – P. 100585.
21. Synthesis of sodium alginate/carboxy-methyl cellulose/Cu-based metal-organic framework composite for adsorption of tetracycline from aqueous solution / A. Ehsani et al // Surfaces and Interfaces. – 2023. – Vol. 36. – P. 102506.
22. Recent advances in cellulose- and alginate-based hydrogels for water and wastewater treatment: A review / S. Radoor et al // Carbohydrate Polymers. – 2024. – Vol. 323. – P. 121339.
23. Nanocellulose-hydrogel hybrids: A review on synthesis and applications in agriculture, food packaging and water remediation / K.G. Lakhani et al // International Journal of Biological Macromolecules. – 2025. – Vol. 309. – P. 143081.
24. Recent progress on the remediation of dyes in wastewater using cellulose-based adsorbents / M.S. Samuel et al // Industrial Crops & Products. – 2023. – Vol. 206. – P. 117590.
25. Cellulose nanocrystals extracted from rice husk using the formic/peroxyformic acid process: isolation and structural characterization / A.N. Vu et al // RSC Advances. – 2024. – Vol. 14. – P. 2048-2060.
26. Nanocellulose: Structure, modification, biodegradation and applications in agriculture as slow/controlled release fertilizer, superabsorbent, and crop protection: A review / B.-E. Channab et al // Journal of Environmental Management. – 2024. – Vol. 352. – P. 119928.
27. Multifunctional hydrogel adsorbents for wastewater remediation: Current trends and future directions / A. Khan et al // Journal of Molecular Liquids. – 2025. – Vol. 435. – P. 128129.
28. Effect of Acid Hydrolysis Conditions on the Extraction of Cellulose Nanocrystals / V.M. Serrano-Martínez et al // Polymers. – 2025.

29. TEMPO-Oxidized Cellulose Nanofibril Films Incorporating Graphene Oxide Nanofillers / Y. Kim et al // Polymers. – 2023. – Vol. 15. – P. 2646.
30. Tingaut P., Eyholzer C., Zimmermann T. Functional Polymer Nanocomposite Materials from Microfibrillated Cellulose.
31. Bacterial cellulose: a versatile biopolymer for wound dressing applications / R. Portela et al // Microbial Biotechnology.
32. Gorgieva S. Bacterial Cellulose: Production, Modification and Perspectives in Biomedical Applications / S. Gorgieva, J. Trček // Nanomaterials. – 2019. – Vol. 9. – P. 1352.
33. Nanocellulose-based hydrogels for smart sensors / B. Sun et al // Carbohydrate Polymers. – 2025. – Vol. 368. – P. 124152.
34. Agricultural Waste-Derived Biopolymers for Sustainable Food Packaging: Challenges and Future Prospects / T. Selvam et al // Polymers. – 2025. – Vol. 17. – P. 1897.
35. Treatment of natural dye wastewaters by electrochemical oxidation / B. Saraiva et al // Journal of Environmental Management. – 2025. – Vol. 395. – P. 127908.
36. Isolation and Characterization of Novel Cellulose Micro/Nanofibers from Lygeum spartum Through a Chemo-Mechanical Process / S. Ahmima et al // Polymers. – 2024. – Vol. 16. – P. 3001.
37. Salajková M. Hydrophobic cellulose nanocrystals modified with quaternary ammonium salts / M. Salajková, L.A. Berglund, Q. Zhou // Journal of Materials Chemistry. – 2012. – Vol. 22. – P. 19798-19805.
38. Song Z. Hydrophobic-modified nano-cellulose fiber/PLA biodegradable composites for lowering water vapor transmission rate (WVTR) of paper / Z. Song, H. Xiao, Y. Zhao // Carbohydrate Polymers. – 2014. – Vol. 111. – P. 442-448.
39. Ultra porous nanocellulose aerogels as separation medium for mixtures of oil/water liquids / N.T. Cervin et al // Cellulose. – 2012. – Vol. 19. – P. 401-410.
40. Alkyl aminated nanocelluloses in selective flotation of aluminium oxide and quartz / O. Laitinen et al // Chemical Engineering Science. – 2016. – Vol. 144. – P. 260-266.
41. Morandi G. Synthesis of cellulose nanocrystals bearing photocleavable grafts by ATRP / G. Morandi, W. Thielemans // Polymer Chemistry. – 2012. – Vol. 3. – P. 1402-1407.
42. Quantification of cellulose nanowhiskers sulfate esterification levels / J. Gu et al // Carbohydrate Polymers. – 2013. – Vol. 92. – P. 1809-1816.
43. Nishiyama Y. Crystal structure and hydrogen-bonding system in cellulose Iβ from synchrotron X-ray and neutron fiber diffraction / Y. Nishiyama, P. Langan, H. Chanzy // Journal of the American Chemical Society. – 2002. – Vol. 124. – P. 9074-9082.
44. Eyley S. Surface modification of cellulose nanocrystals / S. Eyley, W. Thielemans // International Journal of Biological Macromolecules. – 2020. – Vol. 152. – P. 616-632.
46. Polyurethane types, synthesis and applications – a review / J.O. Akindoyo et al // RSC Advances. – 2016. – Vol. 6. – P. 114453-114482.
47. Enantioseparation using cellulose tris(3,5-dimethylphenylcarbamate) / Y. Okada et al // Molecules. – 2016. – Vol. 21. – P. 1484.
48. Nanocellulose 3,5-Dimethylphenylcarbamate Derivative Coated Chiral Stationary Phase / X. Zhang et al // Chirality. – 2016. – Vol. 28. – P. 376-381.
49. Cellulose nanocrystals as water-in-oil Pickering emulsifiers via intercalative modification / J. Guo et al // Colloids and Surfaces A. – 2017. – Vol. 529. – P. 634-642.
50. Properties and paper sizing application of waterborne polyurethane emulsions synthesized with TDI and IPDI / Y.-H. Guo et al // Colloids and Surfaces A. – 2013. – Vol. 427. – P. 53-61.
51. Melt extruded nanocomposites of polybutylene adipate-co-terephthalate (PBAT) with phenylbutyl isocyanate modified cellulose nanocrystals / C.L. Morelli et al // Journal of Applied Polymer Science. – 2016. – Vol. 133.
52. Labet M. Polymer grafting onto starch nanocrystals / M. Labet, W. Thielemans, A. Dufresne // Biomacromolecules. – 2007. – Vol. 8. – P. 2916-2927.
53. Thielemans W. Starch nanocrystals with large chain surface modifications / W. Thielemans, M.N. Belgacem, A. Dufresne // Langmuir. – 2006. – Vol. 22. – P. 4804-4810.
54. Missoum K. Organization of aliphatic chains grafted on nanofibrillated cellulose and influence on final properties / K. Missoum, J. Bras, M.N. Belgacem // Cellulose. – 2012. – Vol. 19. – P. 1957-1973.
55. Hydrophobic modification of cellulose nanocrystal via covalently grafting of castor oil / W. Shang et al // Cellulose. – 2013. – Vol. 20. – P. 179-190.

56. Yu H.-Y. Surface grafting of cellulose nanocrystals with poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) / H.-Y. Yu, Z.-Y. Qin // Carbohydrate Polymers. – 2014. – Vol. 101. – P. 471-478.
57. Chemical surface modifications of microfibrillated cellulose / P. Stenstad et al // Cellulose. – 2008. – Vol. 15. – P. 35-45.
58. Dimensionally Stable Cellulose Aerogel Strengthened by Polyurethane Synthesized in Situ / L. Verdolotti et al // Macromolecular Chemistry and Physics. – 2019. – Vol. 220. – P. 1800372.
59. Siqueira G. New process of chemical grafting of cellulose nanoparticles with a long chain isocyanate / G. Siqueira, J. Bras, A. Dufresne // Langmuir. – 2009. – Vol. 26. – P. 402-411.
60. Thermal and mechanical properties of bio-nanocomposites reinforced by Luffa cylindrica cellulose nanocrystals / G. Siqueira et al // Carbohydrate Polymers. – 2013. – Vol. 91. – P. 711-717.
61. Polycaprolactone/modified bagasse whisker nanocomposites with improved moisture-barrier and biodegradability properties / M.L. Hassan et al // Journal of Applied Polymer Science. – 2012. – Vol. 125. – P. E10-E19.
62. Tunable gas barrier properties of filled-PCL film by forming percolating cellulose network / N. Follain et al // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2018. – Vol. 545. – P. 26-30.
63. Supramolecular aromatic interactions to enhance biodegradable film properties through incorporation of functionalized cellulose nanocrystals / C.L. Morelli et al // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2016. – Vol. 83. – P. 80-88.
64. Mechanical, rheological and degradation properties of PBAT nanocomposites reinforced by functionalized cellulose nanocrystals / I. Pinheiro et al // European Polymer Journal. – 2017. – Vol. 97. – P. 356-365.
65. Biodegradable PBAT-Based Nanocomposites Reinforced with Functionalized Cellulose Nanocrystals from Pseudobombax munguba: Rheological, Thermal, Mechanical and Biodegradability Properties / I. Pinheiro et al // Journal of Polymers and the Environment. – 2019. – Vol. 27. – P. 757-766.
66. Physiochemical, optical and mechanical properties of poly(lactic acid) nanocomposites filled with toluene diisocyanate grafted cellulose nanocrystals / J.-G. Gwon et al // RSC Advances. – 2016. – Vol. 6. – P. 9438-9445.
67. Influence of chemical surface modification of cellulose nanowhiskers on thermal, mechanical, and barrier properties of poly(lactide) based bionanocomposites / E. Espino-Pérez et al // European Polymer Journal. – 2013. – Vol. 49. – P. 3144-3154.
68. Li Y. Rigid polyurethane foam/cellulose whisker nanocomposites: Preparation, characterization, and properties / Y. Li, H. Ren, A.J. Ragauskas // Journal of Nanoscience and Nanotechnology. – 2011. – Vol. 11. – P. 6904-6911.
69. Li Y. Ethanol organosolv lignin-based rigid polyurethane foam reinforced with cellulose nanowhiskers / Y. Li, A.J. Ragauskas // RSC Advances. – 2012. – Vol. 2. – P. 3347-3351.
70. Isocyanate-rich cellulose nanocrystals and their selective insertion in elastomeric polyurethane / L. Rueda et al // Composites Science and Technology. – 2011. – Vol. 71. – P. 1953-1960.
71. Development of lignin and nanocellulose enhanced bio PU foams for automotive parts / O. Faruk et al // Journal of Polymers and the Environment. – 2014. – Vol. 22. – P. 279-288.
72. The role of nanocrystalline cellulose on the microstructure of foamed castor-oil polyurethane nanocomposites / A.I. Cordero et al // Carbohydrate Polymers. – 2015. – Vol. 134. – P. 110-118.
73. Site-selective modification of cellulose nanocrystals with isophorone diisocyanate and formation of polyurethane-CNC composites / N.M. Girouard et al // ACS Applied Materials & Interfaces. – 2016. – Vol. 8. – P. 1458-1467.
74. Improved specific thermomechanical properties of polyurethane nanocomposite foams based on castor oil and bacterial nanocellulose / R.B. Gimenez et al // Journal of Applied Polymer Science. – 2017. – Vol. 134.
75. The preparation and characterization of polyurethane reinforced with a low fraction of cellulose nanocrystals / X. Kong et al // Progress in Organic Coatings. – 2018. – Vol. 125. – P. 207-214.
76. Azizi A. A critical review of molecularly imprinted polymers for the analysis of organic pollutants in environmental water samples / A. Azizi, C.S. Bottaro // Journal of Chromatography A. – 2020. – Vol. 1614. – P. 460603.
77. Molecularly imprinted polymers for the selective recognition of microcystins / M. Mbisana et al // Chemistry Africa. – 2023.

78. Synthesis techniques of molecularly imprinted polymer composites / A. Lamaoui et al // Molecularly Imprinted Polymer Composites. – Woodhead Publishing, 2021. – P. 49-91.
79. Molecularly imprinted polymers by the surface imprinting technique / C. Dong et al // European Polymer Journal. – 2021. – Vol. 145. – P. 110231.
80. One-pot preparation of carboxylated cellulose nanocrystals and their liquid crystalline behaviors / L. Zhou et al // ACS Sustainable Chemistry & Engineering. – 2018. – Vol. 6, № 9. – P. 12403-12410.
81. Enhancing removal of Cr(VI), Pb^{2+}, and Cu^{2+} from aqueous solutions using amino-functionalized cellulose nanocrystal / Q. Xu et al // Molecules. – 2021. – Vol. 26, № 23. – P. 7315.
82. Fabrication of ofloxacin imprinted polymer on the surface of magnetic carboxylated cellulose nanocrystals for highly selective adsorption of fluoroquinolones from water / Z.H. Hu et al // International Journal of Biological Macromolecules. – 2018. – Vol. 107. – P. 453-462.
83. Research progress on the application of hydrogel adsorbent materials in wastewater treatment: A review / R. Zhou et al // Chemical Engineering Research and Design. – 2025. – Vol. 216. – P. 1-24.
84. Cellulose-Based Hydrogels for Wastewater Treatment: A Concise Review / M. Akter et al // Gels. – 2021. – Vol. 7. – P. 30.
85. Revolutionizing wastewater treatment: A review on the role of advanced functional bio-based hydrogels / P.S. Khoo et al // International Journal of Biological Macromolecules. – 2024. – Vol. 278. – P. 135088.
86. Effect of pH on photocatalytic degradation of methylene blue / U.K. Saint et al // JCIS Open. – 2025. – Vol. 19. – P. 100150.
87. A critical review on chemical analysis of heavy metal complexes in water/wastewater / Z. Xu et al // Chemical Engineering Journal. – 2022. – Vol. 429. – P. 131688.
88. Adsorption of lead ions from an aqueous solution onto NaOH-modified rice husk / I.W. Almanassra et al // Desalination and Water Treatment. – 2022. – Vol. 262. – P. 152-167.
89. Rajoria S. Electroplating wastewater treatment by electro-oxidation / S. Rajoria, M. Vashishtha, V.K. Sanga // Process Safety and Environmental Protection. – 2024. – Vol. 183. – P. 735-756.
90. Hasan M. Development of an eco-friendly and cost-effective hydrogel composite utilizing leather shaving dust / M. Hasan, M.L. Begum // Results in Materials. – 2026. – Vol. 29. – P. 100840.
91. Pattnaik A. An overview on advancements in hydrogels for effective wastewater treatment / A. Pattnaik, P. Ghosh, A.K. Poonia // Journal of Molecular Liquids. – 2025. – Vol. 424. – P. 127120.
92. Modelling and optimization of factors influencing adsorptive performance of agrowaste-derived Nanocellulose Iron Oxide Nanobiocomposites / J. Baruah et al // International Journal of Biological Macromolecules. – 2020. – Vol. 164. – P. 53-65.
93. Treatment of printing industrial wastewater / G. Simoni et al // Journal of Water Process Engineering. – 2025. – Vol. 72. – P. 107574.
94. Wang K.-J. Coagulation-flocculation process optimization for industrial wastewater treatment / K.-J. Wang, P.-S. Wang // Journal of Water Process Engineering. – 2025. – Vol. 78. – P. 108703.
95. Model prediction of coagulation by magnetised rice starch / N.P. Sibiya et al // Scientific African. – 2022. – Vol. 17. – P. e01282.
96. Rice Husk-Derived Nanosilica and Nanocellulose as Antifouling Agents in Thin-Film Nanocomposite Membranes / W.A. Dzulhijjah et al // Advanced Nanocomposites. – 2025.
97. Membrane-based water and wastewater treatment technologies / N. Shehata et al // Chemosphere. – 2023. – Vol. 320. – P. 137993.
98. Photocatalytic removal of textile wastewater-originated methylene blue and malachite green dyes / S. Ali et al // Scientific Reports. – 2025. – Vol. 15. – P. 1851.
99. Chemical degradation of remazol dye by using Tb-doped TiO_2 catalyst / B. Sharma et al // Scientific Reports. – 2025. – Vol. 15. – P. 36930.
100. Doyo A.N. Recent advances in cellulose, chitosan, and alginate based biopolymeric composites for adsorption of heavy metals / A.N. Doyo, R. Kumar, M.A. Barakat // Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers. – 2023. – Vol. 151. – P. 105095.
101. Nanocellulose-Based Materials for Water Treatment: Adsorption, Photocatalytic Degradation, Disinfection, Antifouling, and Nanofiltration / A. Salama et al // Nanomaterials. – 2021. – Vol. 11. – P. 3008.

102. Tshikovhi A. Nanocellulose-based composites for the removal of contaminants from wastewater / A. Tshikovhi, S.B. Mishra, A.K. Mishra // International Journal of Biological Macromolecules. – 2020. – Vol. 152. – P. 616-632.
103. Recent advances in nanocellulose based hydrogels: Preparation strategy, typical properties and food application / X. Lv et al // International Journal of Biological Macromolecules. – 2024. – Vol. 277. – P. 134015.
104. New Developments in Medical Applications of Hybrid Hydrogels Containing Natural Polymers / C. Vasile et al // Molecules. – 2020. – Vol. 25. – P. 1539.
105. Persano F. Cellulose-Based Hydrogels for Wastewater Treatment: A Focus on Metal Ions Removal / F. Persano, C. Malitesta, E. Mazzotta // Polymers. – 2024. – Vol. 16. – P. 1292.
106. Innovations in cellulose-based hydrogels for enhanced wastewater treatment through adsorption / A. Verma et al // International Journal of Biological Macromolecules. – 2025. – Vol. 303. – P. 140660.
107. Recent Progress on Nanocellulose Aerogels: Preparation, Modification, Composite Fabrication, Applications / Y. Chen et al // Advanced Materials.
108. Valorization of diverse waste-derived nanocellulose for multifaceted applications: A review / M. Ghamari et al // International Journal of Biological Macromolecules. – 2024. – Vol. 280. – P. 136130.
109. Nanocellulose-Based Nanocomposites for Sustainable Applications: A Review / M.N. Norizan et al // Nanomaterials. – 2022. – Vol. 12. – P. 3483.
110. Pilot-scale foam and cast-coated nanocellulose filters for water treatment / K. Byambatsogt et al // Monatshefte für Chemie – Chemical Monthly156. – 2025. – P. 91-101.
111. Abdelhamid H.N. Nanocellulose-Based Materials for Water Pollutant Removal: A Review / H.N. Abdelhamid // International Journal of Molecular Sciences. – 2024. – Vol. 25. – P. 8529.
112. Nanocellulose composites: synthesis, properties, and applications to wastewater treatment / M. Mbisana et al // Cellulose. – 2024. – Vol. 31. – P. 10651-10678.
113. Techno-Economic Considerations on Nanocellulose's Future Progress: A Short Review / G. Penloglou et al // Processes. – 2023. – Vol. 11. – P. 2312.
114. Innovative Adsorbents for Pollutant Removal: Exploring the Latest Research and Applications / M.S. Akhtar et al // Molecules. – 2024. – Vol. 29. – P. 4317.
115. Sustainable production of nanocellulose: Technoeconomic assessment, energy savings and scalability / W. Kargupta et al // Journal of Cleaner Production. – 2023. – Vol. 425. – P. 138748.
116. Activated Nanocellulose from Corn Husk: Application to As and Pb Adsorption Kinetics in Batch Wastewater / A.M. Solano-Reynoso et al // Polymers. – 2024. – Vol. 16. – P. 3515.
117. Production of functionalized nanocelluloses from different sources using deep eutectic solvents and their applications / Ricardo O. Almeida et al // Industrial Crops and Products. – 2023. – Vol. 199. – P. 116583.
118. Cellulose Nanocrystals (CNCs) and Cellulose Nanofibers (CNFs) as Adsorbents of Heavy Metal Ions / T.W. Kurniawan et al // Journal of Chemistry. – 2023. – P. 5037027.
119. Nanocellulose: A sustainable functional construct for the remediation of heavy metal ions from water / J. Basheer et al // Journal of Thermoplastic Composite Materials. – 2025. – Vol. 38. – P. 1147-1185.
120. An investigation of the mechanical properties and adsorption potentials of Fe2O3@SiO2-L-cysteine-cellulose system / M. Khalaj et al // Scientific Reports. – 2025. – Vol. 15. – P. 8413.
121. Fabrication of cellulose nanocrystals/carboxymethyl cellulose/zeolite membranes for methylene blue dye removal: understanding factors, adsorption kinetics, and thermodynamic isotherms / M.A. Ibrahim et al // Frontiers in Chemistry. – 2024. – Vol. 12. – P. 1330810.
122. Optimized Nanocellulose-Based Magnetic Metal- Organic Frameworks for Antibiotic Adsorption: A Cutting-Edge Strategy in Environmental Remediation / V.N.U. Pham et al // ACS Omega / Preprint, not peer-reviewed. – 2024.

Қаржыландыру туралы ақпарат

Зерттеу ҚР Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитетінің қаржылық қолдауымен орындалды (№ BR27199301 «Қоршаған ортаны ластаушы заттардан және климаттың өзгеруінен қорғаудың климаттық бейтарап жаңа материалдары, озық технологиялары және әдістерің әзірлеу» 2025-2026).

Д.Н. Аширалиева[1], Ж. Токтарбай[1], М.С. Кунарбекова[1], Б.У. Рахимова[2], К.К. Кудайбергенов[1]*
[1]Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева,
050000, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22
[2]Казахский национальный женский педагогический университет,
050000, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Гоголя, 114/8
*e-mail: k.kudaibergenov@satbayev.university

АДСОРБЕНТЫ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОЙ НАНОЦЕЛЛЮЛОЗЫ: ОЧИСТКА ВОДЫ ОТ ОРГАНИЧЕСКИХ И НЕОРГАНИЧЕСКИХ ЗАГРЯЗНИТЕЛЕЙ

В условиях интенсивного развития промышленности загрязнение водных ресурсов превратилось в глобальную экологическую проблему. В настоящей обзорной статье систематически проанализирована эффективность функционализированных адсорбентов на основе наноцеллюлозы для удаления из воды органических (синтетические красители, фенолы, антибиотики, пестициды) и (Pb^{2+}, Cd^{2+}, Hg^{2+}, Cr(VI), Cu^{2+}, As) загрязнителей. Ключевые результаты: наивысшая сорбционная ёмкость достигается на TEMPO-окисленной наноцеллюлозе и амин-функционализированных композитах – до 2500 мг/г для метиленового синего и до 2270 мг/г для ионов свинца. Молекулярно импринтированные полимеры (МИП) на основе наноцеллюлозы селективно адсорбируют фенолы с эффективностью до 97% даже в присутствии структурно близких конкурентов. Большинство рассмотренных адсорбентов сохраняют 80-90% ёмкости после 20 циклов регенерации. В работе рассмотрены три основных типа наноцеллюлозы (ЦНК, НФЦ, БНЦ), методы их получения (кислотный гидролиз, TEMPO-окисление, механическая и ферментативная обработка) и стратегии поверхностной функционализации (изоцианатная, амин- и тиольная). Особо отмечается соответствие производства наноцеллюлозы из сельскохозяйственных отходов (рисовая шелуха, соевая шелуха) принципам устойчивого развития. Также определены нерешённые проблемы – масштабирование, стабильность в реальных сточных водах, экономическая эффективность – и перспективные направления исследований.

Ключевые слова: *наноцеллюлоза, функционализация, адсорбция, тяжёлые металлы, органические загрязнители, молекулярно импринтированные полимеры, очистка воды, нанокомпозиты.*

D.N. Ashiralieva[1], Zh. Toktarbay[1], M.S. Kunarbekova[1], B.U. Rakhimova[2], K.K. Kudaibergenov[1]*
[1]Satbayev University (Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev),
050000, Republic of Kazakhstan, Almaty, 22 Satpayev St.
[2]Kazakh National Women's Teacher Training University,
050000, Republic of Kazakhstan, Almaty, 114/8 Gogol St.
*e-mail: k.kudaibergenov@satbayev.university

ADSORBENTS BASED ON MODIFIED NANOCELLULOSE: WATER PURIFICATION FROM ORGANIC AND INORGANIC POLLUTANTS

Against the backdrop of rapid industrial growth, water pollution has become a pressing global environmental issue. This review provides a systematic analysis of the efficiency of functionalized nanocellulose- based adsorbents for the removal of organic (synthetic dyes, phenols, antibiotics, pesticides) and inorganic (Pb^{2+}, Cd^{2+}, Hg^{2+}, Cr(VI), Cu^{2+}, As) pollutants from water. Key findings: the highest sorption capacities are achieved by TEMPO- oxidized nanocellulose and amine-functionalized composites – up to 2500 mg/g for methylene blue and up to 2270 mg/g for lead ions. Nanocellulose- based molecularly imprinted polymers (MIPs) selectively adsorb phenols with efficiencies of up to 97% even in the presence of structurally similar competitors. Most adsorbents reviewed retain 80+90% of their capacity after 20 regeneration cycles. The paper examines three main types of nanocellulose (CNC, NFC, BNC), their preparation methods (acid hydrolysis, TEMPO-oxidation, mechanical and enzymatic treatment), and surface functionalization strategies (isocyanate-based, amine- and thiol-functionalization). The alignment of nanocellulose production from agricultural waste (rice husks, soybean hulls) with sustainable development principles is emphasized. Key unresolved challenges – scale-up, stability in real wastewater matrices, and cost-effectiveness – and future research directions are also identified.

Key words: *nanocellulose, functionalization, adsorption, heavy metals, organic pollutants, molecularly imprinted polymers, water treatment, nanocomposites.*

Авторлар туралы мәліметтер

Дана Нурланқызы Аширалиева – «Материалтану, нанотехнология және инженерлік физика» кафедрасының магистранты, К.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Қазақстан; e-mail: asiralievadana@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-7190-2819.

Жексенбек Тоқтарбай – PhD, қауым.профессор, Инженерлік-бейінді зертханасының ғылыми қызметкері, Сәтбаев Университеті, e-mail: zhexenbek.toktarbay@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4131-0905.

Махаббат Сейт-Задаевна Кунарбекова – философия докторы, Инженерлік-бейінді зертханасының ғылыми қызметкері, Сәтбаев Университеті; e-mail: m.kunarbekova@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8640-0667.

Бибігүл Уәліқызы Рахимова – PhD доктор, Қазақ ұлттық қыздар педагогикалық университетінің оқытушысы, Қазақстан Республикасы, Алматы; e-mail: bibaarai1976@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7433-1094.

Кеңес Кәкімұлы Құдайбергенов* – PhD доктор, Қ.И.Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университетінің қауымдастырылған профессоры, Қазақстан Республикасы, Алматы; e-mail: k.kudaibergenov@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5444-0314.

Сведения об авторах

Дана Нурланқызы Аширалиева – магистрант кафедры «Материаловедение, нанотехнология и инженерная физика»; Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, Республика Казахстан; e-mail: asiralievadana@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-7190-2819

Жексенбек Токтарбай – PhD, ассоц.профессор, научный сотрудник лаборатории инженерного профиля, Сатбаев Университет; e-mail: zhexenbek.toktarbay@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4131-0905.

Махаббат Сейт-Задаевна Кунарбекова – доктор философии, научный сотрудник лаборатории инженерного профиля, Сатбаев Университет; e-mail: m.kunarbekova@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8640-0667.

Бибигул Уалиевна Рахимова – PhD доктор, Преподаватель Казахского национального женского педагогического университета, Республика Казахстан, Алматы; e-mail: bibaarai1976@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7433-1094.

Кенес Какимович Кудайбергенов* – PhD доктор, Ассоциированный профессор Казахского национального исследовательского технического университета имени К.И. Сатпаева, Республика Казахстан, Алматы; e-mail: k.kudaibergenov@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5444-0314.

Information about the authors

Ashiraliyeva Dana – Master's student of the Department of «Materials Science, Nanotechnology and Engineering Physics», Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satpayev, Republic of Kazakhstan; e-mail: asiralievadana@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-7190-2819.

Zhexenbek Toktarbay – PhD, Associate Professor, Researcher at the Engineering Profile Laboratory, Satbayev University; e-mail: zhexenbek.toktarbay@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4131-0905.

Makhabbat Kunarbekova – PhD, researcher at the Engineering Laboratory, Satbayev University; e-mail: m.kunarbekova@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8640-0667.

Bibigul Ualieva Rakhimova – PhD, Lecturer at the Kazakh national women's teacher training university, Republic of Kazakhstan, Almaty; e-mail: bibaarai1976@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7433-1094.

Kenes Kakimovich Kudaibergenov* – PhD, Associate Professor of the Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpaev, Republic of Kazakhstan, Almaty; e-mail: k.kudaibergenov@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5444-0314.

Редакцияға енуі 30.03.2026
Өңдеуден кейін түсуі 27.04.2026
Жариялауға қабылданды 04.05.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-69

IRSTI: 53.37.91; 87.53.13

N. Baatarbek[1]*, K. Kamunur[1,2], Onuralp Yücel[3]
[1]al-Farabi Kazakh National University,
71 Al-Farabi Avenue, Almaty, Kazakhstan
[2]Institute of Combustion Problems,
172 Bogenbai Batyr Street, Almaty, Kazakhstan
[3]Istanbul Technical University,
Ayazağa-Maslak, 34467 Sarıyer, Istanbul, Turkey
*e-mail: B.nurka@mail.ru

A MINI REVIEW ON LEACHING METHODS OF ASH AND SLAG WASTE USING AMORPHOUS GRAPHITE IN A MICROWAVE FURNACE

Abstract: *Currently, the recycling of ash-slag waste generated by thermal power plants and the efficient recovery of valuable metals such as aluminum from these materials represent one of the most important environmental and economic challenges. Traditional aluminum extraction methods, including acid and alkaline leaching, high-temperature thermal treatment, pyrometallurgical processes, and organic extraction techniques, are characterized by high energy consumption, significant environmental impact, and low economic efficiency.*

This review provides a comprehensive analysis of modern methods for extracting aluminum from industrial ash-slag waste, comparing their efficiency, energy consumption, and technological limitations. Special attention is given to microwave-assisted leaching technology using amorphous graphite, and its advantages over conventional methods are systematically evaluated.

The results of the literature review indicate that microwave-assisted leaching is a promising approach due to its energy efficiency, accelerated reaction kinetics, increased aluminum dissolution rate, and reduced environmental burden. Furthermore, this review highlights the scientific advantages of the proposed technology and identifies key areas for further development, including optimization of microwave penetration depth, power input, and temperature regimes.

Thus, this review systematizes the scientific basis for the application of microwave technologies in the processing of ash–slag waste and contributes to the development of new, environmentally friendly methods for the efficient recovery of aluminum from waste materials.

Key words: *ash-slag waste, aluminum oxide, graphite, electromagnetic technology, aluminum, microwave processing, leaching, chemical thermodynamics.*

1. Introduction

Currently, the efficient processing of industrial waste, along with the recovery of the various valuable metals it contains, represents one of the most important environmental and economic challenges. One of the main by-products of thermal power plants is ash-slag waste, which contains small amounts of aluminum along with iron, calcium, and mineral phases such as mullite and quartz. In this regard, the extraction of aluminum from ash-slag waste using traditional hydrometallurgical methods is inefficient due to high energy consumption and associated environmental impacts. Therefore, microwave-assisted leaching technology using amorphous graphite is being considered as an alternative, efficient, and environmentally friendly approach compared to conventional methods, offering reduced environmental impact and lower energy consumption [1-2].

At present, the development of an energy-efficient microwave-assisted leaching process for aluminum extraction from ash-slag waste using amorphous graphite remains a key research topic. This is because microwave leaching with amorphous graphite enables energy savings while reducing environmental impact and lowering overall process energy demand [3]. Various methods for aluminum recovery from ash-slag waste exist; however, most of them are economically and environmentally inefficient. Globally, coal accounts for approximately 30% of electricity generation, though this varies across regions [4]. In the context of waste recycling and depletion of bauxite reserves, the search for alternative sources of aluminum is one of the most urgent scientific and industrial challenges [5]. The main advantage of microwave-assisted leaching is the uniform

©N. Baatarbek, K. Kamunur, Onuralp Yücel, 2026

volumetric heating, which significantly accelerates reaction rates, promotes rapid formation of active phases, increases leaching efficiency, and reduces energy consumption [6]. In aluminum leaching from ash-slag waste, the role of amorphous graphite is particularly important, as it strongly absorbs microwave radiation and ensures efficient heat transfer. Acting as a heating mediator in the microwave field, it also creates a partially reducing environment during the leaching process, enhances reaction kinetics, and improves the transfer of aluminum into solution.

Numerous studies indicate that optimizing process parameters-such as temperature, microwave power, graphite dosage, and leaching medium composition-is a key challenge for scaling the technology to an industrial level [7]. Conventional leaching processes typically use mineral acids (H_2SO_4, HCl, HNO_3) or alkalis (NaOH) and rely on convective heating. However, convective heating has several disadvantages, including high energy consumption, long processing time, and limited leaching efficiency. To address these limitations, microwave heating has been proposed as an alternative to leaching processes [8]. Tian and co-authors investigated microwave-assisted pressure leaching of converter vanadium slag and found that, compared to conventional electric heating, the microwave method achieved up to 96% vanadium leaching efficiency within only 20 minutes, whereas electric heating achieved only 46%. In addition, the activation energy decreased from 40.5 kJ/mol under conventional heating to 14.8 kJ/mol under microwave irradiation, clearly demonstrating that microwave irradiation significantly reduces the reaction's kinetic barrier. The acceleration of the leaching process under microwave energy can be explained by several mechanisms. First, microwaves interact directly with the material's internal structure, enabling volumetric heating that differs from conventional surface heating. Second, microwave irradiation induces rapid boiling of the solution, helping to overcome chemical and diffusion kinetic limitations [9]. Hamidi and co-authors further investigated microwave-assisted leaching using organic acids, including ascorbic, gluconic, citric, and acetic acids. They found that oxalic acid enabled complete vanadium recovery and full iron removal, and that microwave leaching was the most environmentally friendly and efficient process, as determined by life-cycle assessment [10]. Kurtulus and co-authors demonstrated that microwave irradiation applied to electric arc furnace slag, using different approaches including direct treatment and NaOH-assisted leaching, increased aluminum dissolution by up to 25% and calcium removal by up to 50% [11]. Kim and co-authors (2016) showed that amorphous carbon can be transformed into crystalline graphite within 5 minutes under microwave heating, confirming that carbon-based materials effectively absorb microwave energy [12]. Gao and co-authors studied waste carbon derived from coal gasification residues and found that partially graphitized carbon exhibits excellent microwave absorption properties due to dielectric loss and polarization relaxation mechanisms [13]. Thus, based on the reviewed studies, microwave-assisted leaching of valuable metals from ash-slag waste using amorphous graphite as a microwave absorber is a promising, environmentally efficient approach. Microwave processing accelerates leaching kinetics, reduces energy consumption, and increases metal recovery efficiency. The high microwave absorption capacity of amorphous graphite makes it an excellent additive and absorber in microwave heating systems. However, research in this area remains limited, particularly regarding the optimization of process parameters, kinetic mechanisms, and the industrial-scale applicability of amorphous graphite in ash-slag leaching systems.

The objective of this review is to compare existing aluminum extraction methods in terms of energy consumption, economic feasibility, and environmental impact, and to systematically evaluate the advantages and industrial potential of microwave-assisted leaching technology. The aim of this work is to provide a scientific justification for improving the efficiency of valuable component extraction from ash-slag waste using amorphous graphite as a microwave absorber.

2. Physicochemical and Chemical Properties of Ash-slag

2.1. Physical Properties of Ash-slag

The physicochemical properties of ash depend directly on the composition of the initial raw material, the combustion temperature, and the technological operating conditions. Recent literature has identified the main components of ash as oxides such as SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, CaO, and MgO, and their relative contents determine the ash's reactivity and structural properties [14]. The most important physical properties of ash include density, bulk density, specific surface area, and moisture content. For example, the density of ash from different thermal power plants is approximately 2140-2210 kg/m³, while the bulk density ranges from 750-780 kg/m³, indicating a porous structure. Such

high porosity enhances ash's adsorption properties, making it suitable for use in construction materials and composites [15].

Table 1 presents the physical properties of ash, indicating that its morphology varies significantly. Physicochemical studies indicate that ash is not merely an inert waste material but rather an active structural component. Its high specific surface area increases the reaction surface, thereby enhancing hydration and bonding processes.

Table 1 – Physical properties and quantitative characteristics of ash.

Description of Physical Properties of Ash	Values of Physico-Chemical Properties of Ash	Reference
Particle size distribution	Fly ash particle size ranges from 1 μm to 300 μm, with an average particle size of 10-20 μm	[16]
Morphological shapes	Predominantly spherical, angular, and irregular particle forms	[16]
Density	Average density is 2.0 g/cm³, varying between 1-3 g/cm³ depending on composition	[16]
Composition and density of cenospheres	Cenospheres make up approximately 1% of the total mass; average density 600-800 kg/m³	[16]
pH value	pH ranges from 8 to 12	[16]
Unburned carbon content (LOI)	Loss on Ignition (LOI) varies between 1% and 15%	[16]
Relation between radioactivity and chemical composition	Increased CaO and SO_3 content reduces the concentration of radionuclides from the natural uranium series; increased P_2O_5, K_2O, and Na_2O increases radionuclide content	[17]
Heavy metals and toxic components	Contains Pb, Cr, As, Se, Zn, Cu, Ni; concentration of radioactive heavy metals depends on the type of fuel used	[17]
Specific surface area	Ranges from 1-50 m²/g; mechanically activated samples may exceed 10 m²/g	[18]
Pozzolanic activity	Fine amorphous ash samples show high reactivity; higher CaO content accelerates the hydration reaction with water	[19]

2.2 Chemical Properties

The chemical composition of ash waste directly influences its pozzolanic activity. Given their chemical composition, amorphous SiO_2 and Al_2O_3 phases can react with calcium hydroxide, forming calcium silicate hydrate compounds and thereby increasing the material's strength. In addition, the presence of iron and calcium oxides in the ash determines its melting temperature, thermal stability, and reactivity [20]. Mizerova and co-authors investigated the compounds present in ash and their respective contents. As a result, the data presented in Table 2 were obtained [21]. The quantitative data in Table 2 show that ash-slag waste contains various oxides and both amorphous and crystalline phases, which makes the extraction of active components from ash more difficult. Therefore, the complex and heterogeneous nature of ash composition, as well as the variability of its physicochemical properties, indicates the inefficiency of the extraction process. This is mainly due to the presence of inert mineral impurities with low reactivity, in particular quartz and mullite, which reduce overall extraction efficiency [21-22].

Table 2 – Chemical composition of ash [21]

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	Na_2O	MgO	S	K_2O
(%)	49.82	24.67	7.5	3.91	0.7	2.68	0.91	2.78

The high porosity and heterogeneous granular structure of ash hinder the uniform penetration of reagents into all particles, resulting in incomplete reaction progress. In addition, the strong bonding of certain elements, such as aluminum and silicon compounds, within a stable crystalline lattice makes their chemical extraction more difficult.

All these factors increase the complexity of recovering valuable components from ash and reduce the overall efficiency of the extraction process. Therefore, to improve this process, it is necessary to apply pre-treatment methods such as grinding, thermal treatment, and activation techniques [23].

2.3 Review of Different Methods for Leaching and Recovery of Aluminum from Ash–Slag Waste

According to scientific studies, a review of the physical and chemical properties, temperature dependence, and composition of ash-slag waste investigated by international researchers shows that Wang and co-authors reported amorphous graphite effectively absorbs microwave radiation and acts as a heating medium. It disrupts aluminosilicate phases in ash-slag waste, thereby increasing the leaching degree of aluminum, while the catalytic effect of graphite facilitates the transfer of aluminum into solution [24]. However, Wang and co-authors did not provide detailed information regarding the economic efficiency and technological parameters required for industrial-scale application of this method. Zhou and co-authors reported that microwave-assisted leaching technology is considered an alternative, efficient, and environmentally friendly method [25]. In addition, Li and co-authors demonstrated that microwave leaching methods reduce energy consumption, increase reaction rates, enhance the extraction degree of valuable metals such as aluminum, and improve the environmental safety of the process [26-28].

Although plasma-based waste treatment methods are widely used, they remain underdeveloped [29]. One of their main drawbacks is high electricity consumption during waste processing [30], which results in additional waste generation during the fuel production, enrichment, and processing stages. Li, Doucet, and co-authors studied the roasting of ash with ammonium sulfate ($(NH_4)_2SO_4$) at high temperature, where aluminosilicates were activated, and subsequent acid washing enabled the transfer of Al^{3+} ions into solution. However, this method has significant disadvantages, including high energy demand for the roasting stage (700-900 °C), high reagent consumption, and the release of gases such as ammonia and SO_2, which require continuous gas treatment systems [31]. Zhao and co-authors removed SiO_2 from ash using NaOH solution, followed by acid treatment to extract aluminum. However, this method has drawbacks, such as high NaOH consumption, formation of Na_2SiO_3 in solution requiring separation, and corrosion risks to equipment [32]. Rahul and co-authors studied pyrometallurgical methods involving flux melting with salts (Na_2CO_3, NaOH) or complex mixtures followed by water leaching for aluminum recovery from ash. The disadvantages of this method include high temperature requirements, environmental risks associated with salts, and the need for multi-stage washing processes [33]. Gökelma and co-authors investigated the separation of metallic aluminum from primary production residues using mechanical/physical separation methods. However, this method is limited because it is only applicable to metallic aluminum fractions, not oxides, and fine ash particles are difficult to process, requiring large-scale mechanical treatment [34]. Amani Shilla and co-authors reviewed the extraction of metal ions from ash in liquid phase systems. However, the main disadvantage of these methods is that organic solvents are environmentally hazardous, difficult to regenerate, and economically inefficient [35].

In acid-leaching processes, energy consumption is moderate; however, environmental issues arise from acidic waste and corrosion. Due to high acid consumption, spent solutions must be neutralized. Alkaline leaching processes are relatively efficient, but they also involve medium energy consumption and potential environmental corrosion risks. Their main limitations include high NaOH consumption and the formation of Na_2SiO_3. Thermal treatment methods, although efficient, require very high temperatures (700-900 °C) and generate CO_2 and SO_2 emissions. Pyrometallurgical salt fusion processes also suffer from high energy demand, low economic feasibility, and the generation of salt waste requiring multi-stage washing. Mechanochemical activation methods have moderate efficiency, but their high energy demand limits their applicability. DES/organic extraction methods have moderate energy consumption but involve toxic solvents and complex recycling processes.

In contrast, bioleaching and microwave-assisted leaching methods demonstrate low energy consumption and relatively low environmental impact. Considering the above limitations, microwave-assisted leaching using amorphous graphite has been actively studied as an alternative, energy-efficient method for aluminum extraction from ash–slag waste. The main advantage of this method is the uniform volumetric heating induced by microwave radiation, which significantly increases reaction rates, promotes rapid formation of active phases, and reduces overall energy consumption.

Amorphous graphite effectively absorbs microwave radiation, acting as a rapid-heating mediator and promoting the structural degradation of ash in the microwave field. In addition, its presence accelerates the decomposition of aluminosilicate phases and creates a reducing environment, thereby enhancing the transfer of aluminum into solution. This makes microwave-

assisted leaching more environmentally friendly and energy-efficient compared to conventional hydrometallurgical and pyrometallurgical methods.

Currently, coal fly ash (CFA), despite its complex mineral composition, has attracted significant interest as a valuable metal resource. The aluminum oxide (Al_2O_3) content in CFA can reach 20-30%, but most of it is bound in stable inert phases such as mullite ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) and quartz, which hinder efficient aluminum recovery [36]. Therefore, various strategies for aluminum extraction have been extensively studied. In general, aluminum recovery methods can be classified into four categories:

1. Conventional chemical leaching (acid/alkaline),
2. Pre-treatment methods (thermal, mechanochemical, microwave),
3. Biohydrometallurgical methods,
4. Deep eutectic solvents (DES) – a promising emerging approach.

In conventional leaching methods, many studies have focused on optimizing aluminum extraction using NaOH, H_2SO_4, and HNO_3 [36]. The formation of sodium aluminate ($NaAlO_2$) via NaOH is considered one of the most efficient mechanisms; however, due to mullite's stability, high temperatures (150-250°C) or long processing times are required.

Many studies in the literature have also investigated the use of NaOH, H_2SO_4, and HNO_3 individually or in combination for aluminosilicate dissolution in CFA. However, due to the high acid resistance of aluminosilicate phases in ash–slag waste, aluminum recovery remains limited [37]. Therefore, acid leaching is more effective when applied to pre-activated or calcined ash materials.

2.4 Acid Leaching (H_2SO_4, HCl, HNO_3)

Efficiency of acid leaching methods: Acid leaching is highly efficient, with direct leaching with acids enabling recovery of 68-87% Al from the amorphous phase, while autoclave conditions (180-220°C under pressure) can achieve 90-95%. In the studies of Sangita Panda and co-authors, sulfuric acid (H_2SO_4) was identified as the most effective leaching agent, achieving an Al yield of 68.68% at 220°C, while under high-pressure leaching conditions, the recovery reached 94.16%. When hydrochloric acid (HCl) is used, autoclave conditions can achieve Al recovery of 90–95%, though the process causes significant equipment corrosion [38].

Economic aspects of acid leaching: Acid leaching is technologically simple and uses relatively inexpensive reagents (H_2SO_4 is the most affordable mineral acid). However, high-temperature (180-220°C) and high-pressure conditions require autoclave equipment, which increases capital costs [39]. Aphane and co-authors noted that when silica (SiO_2) and mullite phases are not fully decomposed, the process results in high operational costs [40].

Environmental aspects of acid leaching: The use of fluoride additives (NaF) can increase yield, but poses a risk of fluoride pollution. Liquid wastes contain acids and heavy metals, requiring additional neutralization steps. If acid regeneration is incomplete, the process becomes environmentally unfavorable. The main limitations include: mullite-phase Al is not directly decomposed (it requires thermal/mechanical activation); high-temperature and high-pressure requirements; need for corrosion-resistant equipment; and toxicity of fluoride-based additives [41].

2.5 Alkaline Leaching (NaOH, $Ca(OH)_2$)

Efficiency: Alkaline leaching is typically carried out after pre-calcination at 600-900°C. Kumar and co-authors reported 80% Al dissolution in a muffle furnace and 89.4% under microwave heating conditions [42]. However, below 400°C, hydroxycancrinite forms, leading to Al loss. According to Tenza and Aphane, alkaline leaching and alkali fusion are effective for silicate recovery, but high reagent consumption reduces aluminum selectivity [43].

Economic aspects: NaOH is an expensive reagent and must be regenerated for large-scale applications. Sibanda and co-authors identified the high cost and difficulty in recycling as key barriers to commercialization [44]. In lime-soda sintering processes, reagents are cheaper, but very high temperatures (~1200°C) are required, leading to high energy consumption.

Environmental aspects: When Na_2CO_3 is used, CO_2 is released. Su reported that Na_2CO_3 sintering is more resource- and energy-efficient than $CaCO_3$ sintering [45]. However, large amounts of secondary solid waste are generated, requiring additional treatment.

Main limitations: high energy demand (600-1200°C); expensive reagents (NaOH); formation of hydroxycancrinite at low temperatures (~400°C), causing Al loss; CO_2 emissions and secondary solid waste generation.

2.6 Thermal Treatment with Sodium Carbonate Sintering

Efficiency: Na_2CO_3 sintering is one of the most efficient methods, achieving 91-95% Al recovery. Conventional sintering requires 800-900°C and 60+ minutes. Microwave-assisted sintering reduces these conditions to 700°C and 20-30 minutes. Gao and co-authors proposed the most promising approach as "desilication → Na_2CO_3 activation → acid leaching" [46].

Economic aspects: Conventional sintering operates at 800-1200°C, resulting in high energy costs. The Na_2CO_3 dosage is typically 0.8-1.2 times the stoichiometric amount relative to Al_2O_3. Microwave sintering reduces energy consumption by 30-50%, but it increases equipment costs. Bakirov and co-authors demonstrated 83-90% Al recovery from Almaty CHP-2 ash-slag waste using a CaO + Na_2CO_3 system, showing economic feasibility for Kazakhstan [47].

Environmental aspects: CO_2 emissions result from Na_2CO_3 decomposition, and large amounts of solid residues ($CaSiO_3$, SiO_2) are produced. Microwave technology helps reduce CO_2 emissions.

Limitations: high energy consumption (800-1200°C); CO_2 emissions; large amounts of solid waste; high reagent use.

2.7 Mechanochemical Activation (Ball Milling)

Efficiency: Mechanochemical activation breaks mullite and quartz phases, increasing acid solubility. Xu reported 91.15% Al recovery after 6 hours of milling followed by acid leaching [48]. Gao showed that mechanochemical activation reduced the calcination temperature by 100°C, the processing time by 20 minutes, and the Na_2CO_3/Al_2O_3 ratio to 0.1 [48]. Fang achieved 95.58% Al recovery using $Na_2S_2O_7$ activation combined with $Na_2S_2O_8$ pressure leaching [49].

Economic aspects: Ball milling equipment is relatively inexpensive, but grinding for 1-6 hours consumes significant electricity. However, reduced calcination temperature improves overall energy efficiency. Gao described mechanochemical activation as an «energy-efficient pre-treatment method» [50].

Environmental aspects: Low chemical consumption and relatively low-temperature processing make it environmentally favorable. However, noise, dust formation, and equipment wear are disadvantages.

Limitations: long grinding time (1-6 hours); high mechanical energy consumption; scaling difficulties; particle agglomeration requiring extended milling.

Traditional leaching methods primarily aim to determine optimal leaching conditions and evaluate alternative aluminum recovery routes using chemical reagents.

Pre-treatment methods

a) Calcination (thermal treatment):

At 1000-1200°C, mullite structure is destroyed and transformed into more reactive phases, significantly increasing Al recovery during NaOH leaching [51].

b) Mechanochemical activation:

High-energy ball milling disrupts CFA crystalline structure and increases surface area, improving leaching efficiency by 30-40% [52].

c) Microwave pre-treatment:

Microwaves (2.45 GHz) alter dielectric properties of Fe_2O_3, TiO_2, and Al_2O_3–SiO_2 systems. Internal heating weakens the mullite structure and accelerates leaching 3-5 times. Agus Mirwan et al. reported 67% Al recovery using 4 M HCl at 40°C for 15 minutes under 100 W microwave power, compared to 46.6% at 80 W, showing that higher microwave power improves dissolution kinetics [53].

2.8 Deep Eutectic Solvents (DES)

In recent years, deep eutectic solvents (DES) have attracted significant research interest for the recovery of aluminum and rare earth elements (REEs) from coal fly ash (CFA), sludge, and bauxite residues. DES are similar to ionic liquids but are considered more cost-effective and environmentally friendly. These solvents are characterized by low toxicity, high thermal stability, and the ability to tune their acidic or alkaline properties by changing component ratios. In addition, they exhibit strong selectivity for metal ion complexation and can efficiently absorb microwave radiation, providing additional advantages for process intensification [54].

DES are typically formed from choline chloride (ChCl) combined with hydrogen bond donors such as lactic acid (LA), p-toluenesulfonic acid (pTSA), glycerol, and urea. The main role of DES systems in aluminum leaching has been demonstrated using ChCl:LA (1:2) acidic DES, which

enables the recovery of 30-60% of aluminum and REEs from CFA residues [55]. ChCl:pTSA is considered a highly effective solvent for aluminum dissolution due to the strong acidity of both chloride and pTSA, which facilitates the breaking of Al–O bonds in solution [56].

Microwave-assisted DES systems temporarily reduce viscosity and enhance heat transfer, significantly accelerating leaching kinetics. This process can increase leaching rates by 3-10 times, reduce energy consumption, and improve aluminum recovery. The journal Green Chemistry (2021) reported that MW–DES combinations significantly enhance metal extraction efficiency [54].

Efficiency of DES: DES are a new generation of “green” solvents composed of organic acids and hydrogen bond donor/acceptor mixtures. Studies by Söldner et al. demonstrated their ability to selectively leach metal salts and oxides [55]. Bond et al. tested 11 DES and 6 green solvents on CFA and found performance comparable to that of mineral acids [55]. Huntington et al. reported that ChCl–EG (choline chloride-ethylene glycol) DES showed comparable extraction efficiencies for Fe, Cu, Al, and Ni relative to EDTA [56].

According to Moradi and Karimi, the main advantages of DES include selectivity, biodegradability, recyclability, and low wastewater generation [57]. The main limitations are high viscosity, slow reaction kinetics, and the lack of validated large-scale applications.

Economic aspects: DES components (choline chloride, urea, organic acids) are relatively inexpensive; however, their high viscosity limits mass transfer, leading to longer processing times. An industrial-scale application has not yet been demonstrated, and most studies remain at the laboratory scale.

Environmental aspects: DES are among the most environmentally friendly leaching agents due to their biodegradability, low toxicity, and minimal wastewater generation. They can also be regenerated. However, key limitations include high viscosity, which leads to poor mass transfer; lack of industrial-scale validation; limited interaction with CFA mullite phases; and limited quantitative performance data.

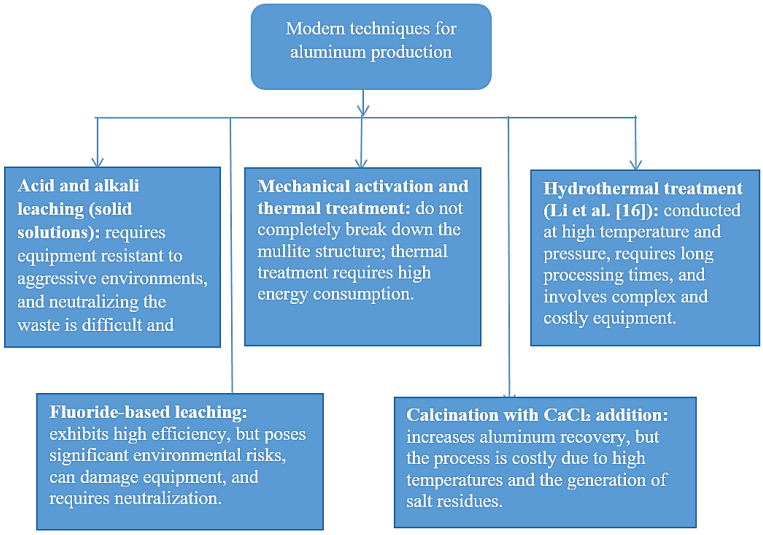
Based on the comparative data presented in Table 3, the thermal treatment method enables recovery of aluminum ions up to 95%. However, this process requires high temperatures, which results in significant energy consumption. Therefore, to achieve efficient aluminum ion extraction from ash-slag waste in a shorter processing time while saving energy, microwave-assisted leaching using amorphous graphite in a microwave furnace is a promising alternative.

Table 3 – Comparison of main aluminum leaching methods, reagents used, advantages, and disadvantages of each method

Aluminum leaching methods	Main reagents used	Aluminum recovery efficiency	Advantages of the method	Disadvantages o f the method	References
1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*
Acid leaching	H_2SO_4, HNO_3, HCl	68-84%	Simple process	Mullite in ash-slag waste is not completely decomposed; high temperature is required	[39-40]
Alkaline leaching	NaOH, Na_2CO_3	48-93%	High selectivity	May require multistage processing to carry out the process	[41-42]
Roasting and leaching	Na_2CO_3/CaC l_2 + acid/alkali	80-90%+	Breaks down the mullite structure; high efficiency.	High energy consumption.	[43]
Cascade approaches	Alkali → calcination → acid leaching	90%+	Multiple products; near-zero waste generation; economically efficient	Requires a complex technological scheme	[44-45]
Water leaching	H_2O	>92% Salt production	Simple; environmentally friendly	Designed only for extracting salts from compounds	[46]
Thermal treatment (Na_2CO_3 + sintering)	In the conventional method: 800-900°C In a microwave furnace: 700°C	91-95%	High yield; completely destroys the mullite structure	The process is carried out at high temperatures; high reagent consumption	[47]

1	2	3	4	5	6
Mechanochemical activation (ball milling)	1-6 hours of grinding + acid leaching	74-95%	Reduces the calcination temperature by 100°C; decreases reagent consumption	Long grinding time; significant energy consumption	[50]
DES (Deep eutectic solvents)	Can be carried out at room temperature	Limited quantitative data available	Environmentally friendly; selective; reusable	Industrial-scale application has not yet been demonstrated; the process is expensive	[54]

Based on Scheme 1, the methods for leaching aluminum from ash-slag waste can be categorized into five groups. However, it should be noted that, for cost-effectiveness and low energy consumption, each of these methods has its own limitations [58].



Scheme 1 – Modern methods currently used for aluminum recovery

Zhao and co-workers reported that desilicated fly ash was calcined with calcium carbonate, transforming the mullite phase into nepheline. This increased the leachability of Al_2O_3 and Fe_2O_3 during acid leaching to 90.4% and 92.3%, respectively. They also stated that during acid leaching, silicon compounds in the activated fly ash were converted into silicic acid with a purity of 93.9%, while sequential precipitation allowed the recovery of $Fe(OH)_3$ and $Al(OH)_3$ with purities of 70.6% and 90.8%, respectively [59].

The obtained $CaSiO_3$, silica gel, $Fe(OH)_3$, and $Al(OH)_3$ can be reused as flame-retardant materials. In addition, $Al(OH)_3$ can be converted to $NaAlO_2$ to remove chlorides from saline wastewater. It has been noted that this cascade recovery approach is economically efficient, environmentally friendly, and does not generate solid waste during fly ash utilization in Figure 1 [59].

Mullite is an aluminosilicate solid solution composed of aluminum oxide and silicon oxide, and it is more stable than corundum at very high temperatures [59]. Mullite exists in two stoichiometric forms: 3:2 and 2:1 [59]. Due to its low thermal expansion coefficient and high resistance to deformation, it exhibits low thermal expansion, making phase transformations difficult. Since aluminum and silicon in fly ash are present as mullite, their separation is challenging.

Yanghui and co-workers reported that as the number of aluminum atoms in tetrahedral units increases, the absorption peaks shift to lower wavenumbers. This indicates an increase in aluminum content within the structure under microwave irradiation, which in turn accelerates the polycondensation reaction rate. These findings were clearly demonstrated in their study Fig. 2 [59].

The dielectric loss factors of solid carbon, calculated using microwave polarization (MWS, 300 MWS), are located in the low-absorption region, indicating they fall within the microwave-transparent materials range. Tewon and co-workers compared the dielectric loss and its corresponding coefficients, and presented the results in Figure 3 [60].

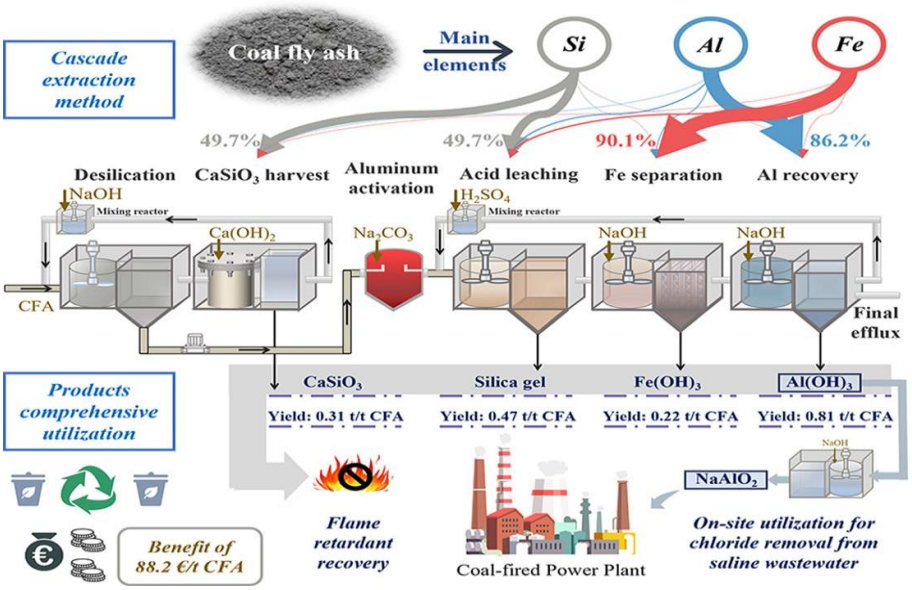


Figure 1 – Schematic of aluminum leaching from ash-slag waste in acidic and alkaline media [59]

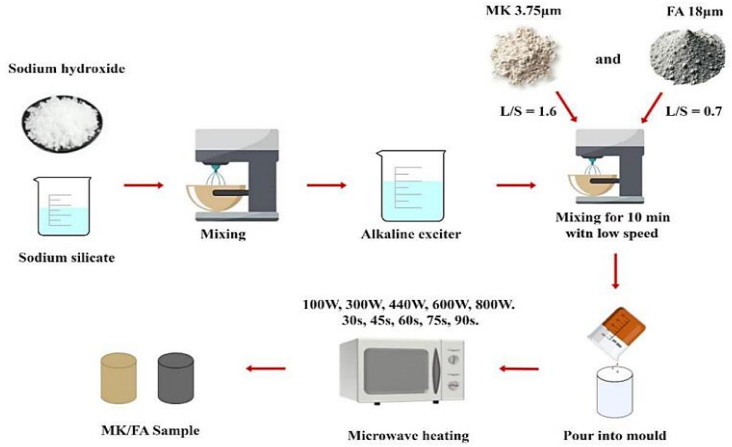


Figure 2 – Experimental block diagram of ash-slag waste treatment showing parameters such as microwave power and irradiation time [59]

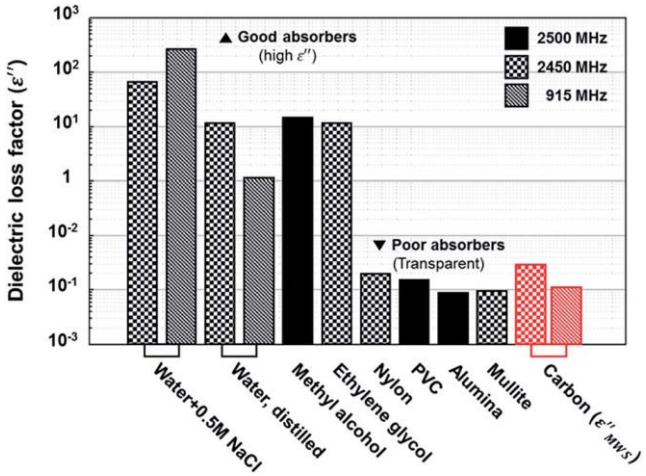


Figure 3 – Comparison of dielectric loss factor

The dielectric loss factors of solid carbon calculated based on microwave polarization (MWS, 300 MWS) are located in the low absorption region, meaning they fall within the area of microwave-transparent materials. Tewon and co-workers compared the dielectric loss and its corresponding coefficients, and presented the results in Figure 3 [60].

3. Microwave leaching: the effect of power and time on yield

The efficiency of microwave-assisted leaching (MAL) mainly depends on two key factors: microwave power and irradiation time. The effect of microwave power was studied by Mirwan and co-workers during aluminum leaching from beneficial clay using HCl solution. At 100 W, an aluminum yield of 67% was achieved, while at 80 W the yield decreased to 46.6% [61]. In the study of Hamidi et al., vanadium and nickel in oil ash were completely (100%) leached using 700 W microwave irradiation in H_2SO_4 solution without any additional oxidizing agent. This result is achievable only in conventional leaching with 10% H_2O_2 [62].

Regarding time effects, Liu and co-workers activated ash–slag waste with Na_2CO_3 under microwave heating at 700 °C for 20 minutes, achieving an aluminum recovery of 95.52%, whereas conventional heating required more than 1 hour to reach similar results [63]. Similarly, Hu et al. reported that in a comparable system (Na_2CO_3 activation at 700 °C), microwave treatment achieved ~93% yield in 30 minutes, while conventional heating required more than 50 minutes [10].

Ma et al. used a H_2SO_4 + NH_4HSO_4 system under microwave-assisted roasting (280 °C, 60 min) and achieved 82.4% aluminum recovery, while significantly reducing energy consumption and gas emissions compared to conventional acid sintering [64].

Khan et al. compared microwave-assisted leaching with conventional heating for municipal waste ash and found that MAL significantly reduces processing costs, making it a more energy-efficient and promising method [65].

Based on the literature data presented in Table 4, it can be concluded that the use of amorphous graphite in microwave-assisted leaching of aluminum from ash–slag waste significantly reduces processing time and enables operation at lower temperature and power conditions.

Table 4 – Comparison of the effect of time and power in microwave-assisted leaching processes

Power/Temperature	Time	Al/metal yield	Comparison with conventional method	References
100 watts	15 min	67% Al	The value is 46.6% at W	[61]
700 watts	30 min	100% V, 100% Ni	No H_2O_2 is required.	[10]
700°C (MWH)	20 min	95,52% Al	The time is reduced threefold.	[62]
280°C (MWH)	60 min	82,4% Al	Gas emissions were reduced.	[63]
700°C (MWH)	30 min	~93% Al	Lower temperature and shorter time	[64]
MAE	40 min	48,4% Al	5M HCl is optimal	[65]

Amorphous graphite possesses a high specific surface area, a defective structure, good electrical conductivity, and strong dielectric absorption properties, which enable it to effectively absorb microwave radiation and convert it into thermal energy. These characteristics make it suitable for use in leaching systems as a catalyst or energy transformer [66].

During microwave heating, amorphous graphite particles absorb microwave energy, generating localized «hot spots» within the reaction mixture. As a result, the interaction rate with leaching agents increases, leading to enhanced solubility and higher aluminum recovery yield. Therefore, current research considers incorporating amorphous graphite into microwave-assisted leaching processes as a promising direction [67].

During microwave-assisted leaching, complex physicochemical interactions occur between graphite and aluminosilicate phases. Graphite absorbs microwave energy and can generate localized surface temperatures of 500-700°C on ash particles. This effect weakens the aluminosilicate structure and intensifies leaching reactions. As a result of electron transfer and redox reactions, graphite can act as a reducing agent, facilitating the conversion of aluminum oxide species into more reactive forms and enhancing their dissolution in solution. Due to surface adsorption and complexation processes, oxygen-containing functional groups on the graphite surface (–OH, –COOH) promote hydrogen bonding or coordination interactions with aluminum ions, thereby catalyzing leaching [68].

Based on the studies mentioned above, X-ray phase analysis was performed on the initial ash–slag waste composition obtained from Thermal Power Plant No. 2 in Almaty. The obtained sample was mixed with amorphous graphite and milled in a ball mill for 30 minutes, then treated with a 1-6 M NaOH solution. Analytical tests were then carried out to determine the concentration of

aluminum ions in the solution. The results demonstrate that, in microwave-assisted leaching of aluminum from ash-slag waste using amorphous graphite, the processing time is significantly reduced and energy consumption is minimized. It was also confirmed that phase structures are effectively disrupted under these conditions, providing a scientifically validated basis for this approach.

Conclusion

In conclusion, the conducted literature review demonstrates that the technologies used for extracting aluminum from ash–slag waste vary significantly, and their efficiency largely depends on the balance between energy consumption, environmental safety, and industrial applicability. Acidic and alkaline leaching methods provide relatively high aluminum recovery; however, they are associated with high reagent consumption and environmental issues such as corrosion and secondary pollution. High-temperature thermal and pyrometallurgical processes are technologically effective but require substantial energy input, thereby increasing environmental burdens.

At the same time, the review highlights microwave-assisted leaching using amorphous graphite as a promising alternative approach for aluminum recovery. The literature indicates that this method efficiently utilizes microwave energy, accelerates reaction kinetics, and rapidly disrupts aluminosilicate phases, thereby enhancing the dissolution of aluminum into solution. The reduction in processing temperature and reaction time under microwave conditions contributes to overall energy savings.

However, the reviewed studies also reveal several unresolved challenges in microwave leaching. In particular, the penetration depth of microwaves into dense ash-graphite mixtures, the energy efficiency of high-power режимдер, the consumption and recyclability of graphite, as well as the feasibility of continuous and large-scale operation, remain insufficiently studied. These factors represent key limitations for industrial-scale application of the technology.

In conclusion, microwave-assisted leaching using amorphous graphite is a promising, energy-efficient, and environmentally friendly alternative for aluminum recovery from ash-slag waste. Nevertheless, its industrial implementation requires systematic studies to optimize the relationship between microwave power and temperature, evaluate overall process economics, and address scale-up challenges. Such research could significantly contribute to the development of alternative aluminum sources and advanced technologies for comprehensive industrial waste utilization.

Refernces

1. Processing of Ash and Slag Waste from Coal-Fired Thermal Power Plants and Extraction of Commercial Products from the Waste / L.M. Delitsyn et al //Thermal Engineering. – 2025. – № 72(3). – P. 203-220. https://doi.org/10.1134/S0040601524700836.
2. Ash and Slag Waste Processing in Self-Shielded Atmospheric DC Arc Discharge Plasma / Z. Bolatova et al // Materials. – 2022. – № 15(22). – P. 8134. https://doi.org/10.3390/ma15228134.
3. Ash waste utilization via direct current arc plasma with production of SiC and AlN / A.Y. Pak et al // Waste and Biomass Valorization. 2021. – № 12(10). – P. 5689-5700. https://doi.org/10.1007/s12649-021-01399-w.
4. Transmutation of coal fly ash with conceivable applications / A.R. Gollakota // Journal of Innovative Technology. – 2020. – № 2(1). – P. 35-40. http://doi.org/10.29424/JIT.202003_2(1).0005.
5. A review on the utilization of fly ash / M. Ahmaruzzaman // Prog. Energy Combust. Sci. – 2010.– № 36. – P. 327-363. https://doi.org/10.1016/j.pecs.2009.11.003.
6. A review on fly ash utilization / M. Mathapati et al // Materials Today: Proceedings. – 2022. – № 50. – P. 1535-1540. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.106.
7. A cleaner approach for recovering Al and Ti from coal fly ash via microwave-assisted baking, leaching, and precipitation / Y. Ma et al // Hydrometallurgy. – 2021. https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105754.
8. Extraction of aluminum and iron from boiler slag by sulfuric acid / J. Li et al // Wuhan University Journal of Natural Sciences. – 2007. – № 12(3). – P. 541-547. https://doi.org/10.1007/s11859-006-0071-8.
9. Effect of microwave heating on the pressure leaching of vanadium from converter slag / L. Tian et al // Hydrometallurgy. – 2019. – № 184. – P. 45-54.
10. Fly ash treatment via conventional and microwave-assisted organic acid leaching: kinetics and life cycle assessment / A. Hamidi et al // Environmental Science and Pollution Research. – 2024. – № 31(20). – P. 30039-30058.

11. Microwave-induced modifications in electric arc furnace slag: An attempt to enhance aqueous dissolution / R. Kurtulus et al // Hydrometallurgy. – 2025. – № 234. – P.106475.
12. A review of graphene research and its outputs: waste carbon source and synthesis technique. Green Infrastructure / M.Z. Nurfazianawatie et al // Materials and Sustainable Management. – 2025. – P. 205-225 .
13. The microwave absorption properties of residual carbon from coal gasification fine slag / S. Gao et al // Fuel – 2021. – № 290. – P. 120050.
14. Das D. A review of coal fly ash utilization to save the environment / D. Das, P.K. Rout // Water, Air, & Soil Pollution. – 2023. – № 234(2). – P. 128.
15. An assessment of physicochemical and adsorption properties / J. Mokrzycki et al // Materials. – 2023. – № 16(6). – P. 2142. https://doi.org/10.3390/ma16062142.
16. A Review of Coal Fly Ash Utilization: Environmental, Energy, and Material Assessment / M. Kuźnia // Energies. – 2024. – №18. – P. 52. https://doi.org/10.3390/en18010052.
17. Relationship Between the Chemical Composition and Radioactive Content of Fly Ash and Bottom Ash from Thermoelectric Power Plants / J.A. Suárez-Navarro et al // Minerals. – 2025. – № 15(5). – P. 471. https://doi.org/10.3390/min15050471.
18. The effect of mechanical activation of fly ash on cement-based materials hydration and hardened state properties / K. Akmalaiuly et al // Materials. – 2023. – № 16(8). – P. 2959. https://doi.org/10.3390/ma16082959
19. Mineralisation of CO2 in wood biomass ash for cement substitution in construction products / N. Tripathi et al // Frontiers in .Sustainability. – 2024. – № 5. – P. 1287543. https://doi.org/10.3389/frsus.2024.1287543.
20. Zhang X. Efficient activation of coal fly ash for silica and alumina leaches and the dependence of Pb (II) removal capacity on the crystallization conditions of Al-MCM-41 / X. Zhang, T. Du, H. Jia // International Journal of Molecular Sciences. – 2021. – № 22(12). – P. 6540. https://doi.org/10.3390/ijms22126540.
21. Mizerová C. Electrical properties of fly ash geopolymer composites with graphite conductive admixtures / C. Mizerová, I. Kusák, P. Rovnaník // Acta Polytechnica CTU Proceedings. – 2019. – №. 22. – P. 72-76. https://doi.org/10.14311/APP.2019.22.0072.
22. A sustainable process to recycle aluminum from coal fly ash for simultaneous removal of iron: Solid waste management and evaluation. / X. Li et al // Minerals Engineering. – 2022. – № 184. – P. 107638. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.10763.
23. Improve toxicity leaching, physicochemical properties of incineration fly ash and performance as admixture by water washing / X. Ma et al // Construction and Building Materials. – 2023. – № 386. – P. 131568.
24. Tenza N.P. Coal fly ash industrial waste-derived products: A review / N.P. Tenza, M.E. Aphane // Environ. Sci. Pollut. Res. – 2026. – № 33. – P. 736-765. https://doi.org/10.1007/s11356-025-37298-z.
25. A cleaner approach for recovering Al and Ti from coal fly ash via microwave-assisted baking, leaching, and precipitation / Y. Ma et al // Hydrometallurgy. – 2021. – № 206. – P. 105754. https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105754.
26. WANG Y. Research progress on the activation and extraction of valuable strategic key metals from coal fly ash / Y. WANG, Z.COAL DONG // GEOLOGY & EXPLORATION. – 2025. – № 176. – P. 94-102.
27. Correlation Between Heavy Metal Adsorption Capacity and Thermal Behavior of Acid-Activated Kaolin During Coal Combustion / H. Cheng et al // Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering. – 2025. e70031. https://doi.org/10.1002/apj.70031.
28. Application of Thermal Plasma Technology for the Treatment of Solid Wastes in China: An Overview. / J. Li et al // Waste Manag. – 2016. – № 58. – P. 260-269. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.06.011.
29. Thermal Plasma Technology for the Treatment of Wastes: A Critical Review / E. Gomez et al // Mater. – 2009. – № 161. – P. 614-626. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.04.017.
30. Extraction of alumina from high-alumina fly ash by ammonium sulfate: roasting kinetics and mechanism / X. Li et al // RSC advances. – 2022. – № 12(51). – P. 33229-33238. https://doi.org/10.1039/D2RA06658K.

31. Study on Experimental Parameters of Alkali-Assisted Extraction of Aluminum from Fly Ash / B. Zhao et al // Materials. – 2025. – № 18(7). – P. 1568. https://doi.org/10.3390/ma18071568.
32. Extraction of alumina from fly ash by pyro-hydro metallurgical routes: A review / Rahul Mandal 1, Manaranjan Mohanta 2 1 Department Of Material Science, Maharaja Sriram Chandra BhajaDeo. // International Journal of Science and Research Archive. – 2024. – № 11(02). – P. 740-749.
33. Effects of Size and Mechanical Pre-Treatment on Aluminium Recovery from Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash / M. Gökelma et al // Minerals. – 2024. – № 14(10). – P. 1006. https://doi.org/10.3390/min14101006.
34. Shilla A. Review of methods for alumina recovery from mudstone and coal fly ash / A. Shilla, G. Mwandila // Heliyon. – 2024. – № 10(14). – P. 10 e34812.
35. Kar M.K. Alumina recovery from bauxite residue: A concise review / M.K. Kar, M.A.R. Önal, C.R. Borra // Resources, Conservation and Recycling. – 2023. – № 198. – P. 107158. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107158.
36. Metal extraction and recovery from mobile phone PCBs by a combination of bioleaching and precipitation processes / A. Santaolalla et al // Minerals. – 2021. – № 11(9). – P. 1004. https://doi.org/10.3390/min11091004.
37. Sangita S. Kinetics of aluminium leaching from coal fly ash by sulphuric acid / S. Sangita, C.R. Panda // Indian Journal of Chemical Technology. – 2020. – Vol. 27, № 4. – P. 263-273.
38. Energy-efficient leaching process for preparation of aluminum sulfate and synergistic extraction of Li and Ga from circulating fluidized bed fly ash / J. Li et al // Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. – 2022. – Vol. 44, № 3. – P. 7123-7136. https://doi.org/10.1080/15567036.2022.2074765.
39. The effect of sulphuric acid concentration on the removal of reactive aluminium from South African coal fly ash / M.E. Aphane et al // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2017. – Vol. 5, № 3. – P. 2458-2466. https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.04.042.
40. Sodium fluoride assisted acid leaching of coal fly ash for the extraction of alumina / A. Tripathy et al // Minerals Engineering. – 2019. – Vol. 135. – P. 45-53. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.02.012.
41. Kumar A. Processing of coal fly ash for the extraction of alumina values / A. Kumar, S. Agrawal, N. Dhawan // Journal of Sustainable Metallurgy. – 2020. – Vol. 6, № 3. – P. 450-462. https://doi.org/10.1007/s40831-020-00287-1.
42. Shoppert A. Kinetics study of Al extraction from desilicated coal fly ash by NaOH at atmospheric pressure/ A. Shoppert, I. Loginova, D. Valeev // Materials. – 2021. – Vol. 14, № 12. – Art. 3281. https://doi.org/10.3390/ma14123281.
43. Murmu A.K. Desilication of high-silica Indian coal fly ash by alkali leaching with KOH and NaOH: A comparative study/ A.K. Murmu, L. Parida, P.K. Senapati // International Journal of Coal Preparation and Utilization. – 2023. – Vol. 43, № 5. – P. 1801-1815. https://doi.org/10.1080/19392699.2021.1967482.
44. Micro-structural evolution of high aluminium fly ash enhanced by microwave heating to accelerate activation reaction process / T. Hu et al // Powder Technology. – 2021. – Vol. 385. – P. 144-153. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.03.015.
45. Kinetics of aluminum extraction from roasting activated fly ash by sulfuric acid leaching / C.-J. Liu et al // MRS Communications. – 2023. – Vol. 13. – P. 512-520. https://doi.org/10.1557/s43579-023-00345-2.
46. Technology of processing of ash and slag waste of thermal power plants by sintering / A. Bakirov et al // Trudy Universiteta. – 2022. – № 4. – P. 103-110. https://doi.org/10.52209/1609-1825_2022_4_103.
47. A study on the mechanism of alumina extraction from coal fly ash / M. Wang et al // Advanced Materials Research. – 2012. – Vol. 550-553. – P. 1123-1128.
48. Söldner A. Deep eutectic solvents as extraction media for metal salts and oxides exemplarily shown for phosphates from incinerated sewage sludge ash / A. Söldner, J. Zach, B. König // Green Chemistry. – 2019. – № 21 (2). – P. 321-328. https://doi.org/10.1039/D1GC03450B.
49. Recovery of rare earth elements from coal fly ash using deep eutectic solvents as leachants and precipitating as oxalate or fluoride / R. Karan et al // Hydrometallurgy. – 2022. – Vol. 214. – Art. 105972. https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2022.105972.

50. Study on experimental parameters of alkali-assisted alumina recovery from fly ash / B. Zhao et al // Metals. – 2025. – Vol. 15, № 1. – P. 1-14. https://doi.org/10.3390/ma18071568.
51. .Mechanical activation of coal fly ash and its effect on aluminum and rare-earth elements extraction / C. Meireles et al // Powder Technology. – 2023. – Vol. 418. – P. 118-129.
52. Microwave-assisted pretreatment of coal fly ash for enrichment and enhanced extraction of reactive phases / G.A. Yakaboylu et al // Energy & Fuels. – 2019. – Vol. 33, № 6. – P. 5674-5683.
53. Recovery of rare earth elements from coal fly ash using deep eutectic solvents as leachants and precipitating as oxalate or fluoride / R. Karan et al // Hydrometallurgy. – 2022. – Vol. 213. – P. 105975. https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2022.105952.
54. Combining acid-based deep eutectic solvents and microwave irradiation for improved extraction / J. González-Rivera et al // Green Chemistry. – 2021. – Vol. 23, № 11. – P. 4189-4203. https://doi.org/10.1039/D1GC03450B.
55. Alguacil F.J. Recent work on the recovery of rare earths using ionic and deep eutectic solvents: a review / F.J. Alguacil, F.A. López // Minerals. – 2023. – Vol. 13, № 2. – P. 1-19. https://doi.org/10.3390/min13101288.
56. Moradi M. The influence of adding a supplementary constituent to choline chloride and p-toluenesulfonic acid based deep eutectic solvents on the dissolution of chalcopyrite / M. Moradi, S. Karimi, B. Behnajady // Journal of Manufacturing Innovations. – 2024. – № 1(2). – P. 45-52.
57. Mechanical activation of coal fly ash and its effect on aluminum and rare-earth elements extraction / C. Meireles et al // Powder Technology. – 2023. – Vol. 418. – P. 118-129.
58. Impact of microwave Pre-Curing on pore structure and environmental performance of Metakaolin-and fly Ash-Based geopolymers / Y. Dong et al // Buildings. – 2024. – № 14(12). – P. 3918. https://doi.org/10.3390/buildings14123918.
59. A review of graphene research and its outputs: waste carbon source and synthesis technique / M.Z. Nurfazianawatie et al // Green Infrastructure: Materials and Sustainable Management. – 2024. – P. 205-225.
60. Insight into Aluminum Leaching with Microwave from Peat Clay: A Comparative Kinetic Study of SC and BIC Models / A. Mirwan et al // Communications in Science and Technology. – 2025. – № 10(2). – P. 447-459.
61. Extraction of Aluminum from Coal Fly Ash by Alkali Activation with Microwave Heating / N. Liu et al // Journal of Residuals Science Technology. – 2016. – № 13.
62. Micro-structural evolution of high aluminium fly ash enhanced by microwave heating to accelerate activation reaction process. / T. Hu et al // J. Powder Technology. – 2021. – № 377 – P. 739-747.
63. Stainable utilization strategies for basic oxygen furnace slag: Properties, processing, and future directions / C. Ma et al // Metals – 2025. – № 15(5). – P. 537.
64. Technologies for municipal solid waste management: Current status, challenges, and future perspectives / S. Khan et al // Chemosphere. – 2021. – № 288. – P. 132403. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132403.
65. The recycling of carbon-rich solid wastes from aluminum electrolytic cells: a review / Ma et al // Environmental Chemistry Letters. – 2024. – № 22(5). – P. 2531-2552. https://doi.org/10.1007/s10311-024-01738-y.
66. Drying kinetics of microwave-assisted drying of leaching residues from hydrometallurgy of zinc / C. Tian et al // Materials. – 2023. № 16(6). – P. 5546. https://doi.org/10.3390/ma16165546.
67. A cleaner approach for recovering Al and Ti from coal fly ash via microwave-assisted baking, leaching, and precipitation / Y. Ma et al // Hydrometallurgy.– 2021. № 206. – P. 105754. https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105754.
68. A sustainable process to recycle aluminum from coal fly ash for simultaneous removal of iron: Solid waste management and evaluation. / X. Li et al // Minerals Engineering. – 2022. № 184. – P. 107638. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107638.

Funding: *This work has been supported by Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (grant number: AP26101069).*

Н. Баатарбек[1]*, Қ. Камұнұр[1,2], Ю. Онуральп[3]
[1]Әл-Фараби атындағы қазақ Ұлттық Университеті,
Қазақстан, Алматы қ., Әл-Фараби даңғылы, 71
[2]Жану Проблемалары институты,
Алматы, Қазақстан, Бөгенбай батыр көшесі, 172
[3]Стамбул техникалық Университеті,
Ayazağa - Maslak, 34467 Sarıyer/İstanbul, Стамбул, Туркия
*e-mail: B.nurka@mail.ru

АМОРФТЫ ГРАФИТТІ ҚОЛДАНА ОТЫРЫП, КҮЛ-КОЖ ҚАЛДЫҚТАРЫН МИКРОТОЛҚЫНДЫ ПЕШТЕ ШАЙМАЛАУ ӘДІСТЕРІНЕ ШАҒЫН ШОЛУ

Қазіргі уақытта жылу электр станцияларынан түзілетін күл-қож қалдықтарын қайта өңдеу және олардың құрамындағы алюминий сияқты бағалы металдарды тиімді алу экологиялық және экономикалық тұрғыдан маңызды мәселелердің бірі болып табылады. Дәстүрлі түрде алюминий алу әдістері – қышқылды және сілтілі шаймалау, жоғары температуралы термиялық өңдеу, пирометаллургиялық және органикалық экстракция әдістері – энергия шығынының жоғары болуымен, экологиялық тұрғыдан қоршаға ортаға тигізетін зияны мен қатар экономикалық тұрғыдан тиімсіз болуымен сипатталады.

Осы шолу жұмысында өнеркәсіптік күл-қож қалдықтарынан алюминийді алудың қолданыстағы заманауи әдістеріне кешенді талдау жүргізіліп, олардың тиімділігі, энергетикалық шығындары мен технологиялық тұрғыдан алғандағы шектеулері салыстырмалы түрде қарастырылды. Әсіресе аморфты графитті қолдана отырып микротолқынды пеште шаймалау технологиясына ерекше назар аударылып, оның дәстүрлі әдістермен салыстырғандағы артықшылықтары жүйеленді.

Жүргізілген әдеби шолулар нәтижесінде микротолқынды пеште шаймалау әдісінің энергия үнемділігі, реакцияның жылдамдығын арттыруы, алюминийдің ерітіндіге өту дәрежесін жоғарылатуы және экологиялық жүктемені азайтуы тұрғысынан перспективалы бағыт екендігі анықталды. Сонымен қатар, бұл шолу аталған технологияның ғылыми тұрғыдан артықшылықтарын нақтылап, және оны дамытуға қажетті негізгі бағыттарды – микротолқындардың ену тереңдігін, қуат пен температура режимдерін оңтайландыруды – айқындайды.

Осылайша, берілген шолу жұмысы күл-қож қалдықтарын қайта өңдеу саласында микротолқынды технологияларды қолданудың ғылыми негіздерін жүйелеп, қалдықтың құрамындағы алюминийді тиімді алудың жаңа, экологиялық қауіпсіз әдістерін дамытуға үлес қосады.

Түйін сөздер: *күлшлак, алюминий оксиді, графит, электромагниттік технология, алюминий, микротолқынды өңдеу, сілтілеу, химиялық термодинамика.*

Н. Баатарбек[1]*, К. Камунур[1,2], Ю. Онуральп[3]
[1]Казахский национальный университет имени аль-Фараби,
г. Алматы, проспект аль-Фараби, 71, Казахстан
[2] Институт проблем горения,
г. Алматы, ул. Богенбай батыра, 172, Казахстан
[3]Стамбульский технический университет,
Ayazağa-Maslak, 34467 Sarıyer, Стамбул, Турция
*e-mail: B.nurka@mail.ru

КРАТКИЙ ОБЗОР МЕТОДОВ МИКРОВОЛНОВОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ЗОЛО-ШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АМОРФНОГО ГРАФИТА

В настоящее время переработка золошлаковых отходов, образующихся на тепловых электростанциях, и эффективное извлечение из них ценных металлов, таких как алюминий, является одной из важных экологических и экономических задач. Традиционные методы извлечения алюминия – кислотное и щелочное выщелачивание, высокотемпературная термическая обработка, пирометаллургические процессы и методы органической экстракции – характеризуются высоким энергопотреблением, негативным воздействием на окружающую среду и низкой экономической эффективностью.

В данном обзорном исследовании проведён комплексный анализ современных технологий извлечения алюминия из промышленных золошлаковых отходов с сравнительной оценкой их эффективности, энергетических затрат и технологических ограничений. Особое внимание уделено технологии микроволнового выщелачивания с использованием аморфного графита, а также систематизированы её преимущества по сравнению с традиционными методами.

Результаты литературного обзора показывают, что микроволновое выщелачивание является перспективным направлением благодаря энергоэффективности, ускорению кинетики реакций, повышению степени перехода алюминия в раствор и снижению экологической нагрузки. Кроме того, в работе определены основные научные преимущества данной технологии и ключевые направления её дальнейшего развития, включая глубину проникновения микроволн и оптимизацию режимов мощности и температуры.

Таким образом, данная обзорная работа систематизирует научные основы применения микроволновых технологий в переработке золошлаковых отходов и способствует разработке новых экологически безопасных методов эффективного извлечения алюминия из отходов.

Ключевые слова: *золошлаковые отходы, оксид алюминия, графит, электромагнитные технологии, алюминий, микроволновая обработка, выщелачивание, химическая термодинамика.*

Information about the authors

Nursaule Baatarbek* – is a 3nd-year PhD student at the Faculty of Chemistry and Chemical Technology of the Al-Farabi Kazakh National University; e-mail: b.nurka@mail.ru.

Kaster Kamunur – PhD, Senior Researcher, Institute of Gorenje Problemy; e-mail: kamunur.k@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-0013-1926.

Yücel Oneralp – Professor at Istanbul Technical University; e-mail: yucel@itu.edu.tr. ORCID: https://orcid. org / 0000-0002-3879-0410.

Авторлар туралы мәліметтер

Нурсауле Баатарбек* – әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университетінің химия және химиялық технология факультетінің 3-курс PhD студенті; e-mail: b.nurka@mail.ru.

Қастер Қамунур – PhD доктор, жетекші ғылыми қызметкер, Жану проблемалары институты; e-mail: kamunur.k@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-0013-1926.

Ючел Онеральп – профессор, Стамбул техникалық университеті; e-mail: yucel@itu.edu.tr. ORCID:https://orcid.org/0000-0002-3879-0410.

Сведения об авторах

Нурсауле Баатарбек* – студент PhD 3 курса факультета химии и химической технологии Казахского национального университета имени аль-Фараби; e-mail: b.nurka@mail.ru.

Қастер Камунур – доктор PhD, ведущий научный сотрудник, Институт проблем горения; e-mail: kamunur.k@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-0013-1926.

Ючел Онеральп – профессор Стамбульского технического университета; e-mail: yucel@itu.edu.tr. ORCID: https: / / orcid. org / 0000-0002-3879-0410.

Received 06.01.2026
Revised 30.04.2026
Accepted 30.04.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-70

IRSTI: 61.59.29

CC BY 4.0
Check for updates

G.K. Burkeyeva, A.K. Kovaleva*, N.M. Zhumabek, Z.M. Ibrayeva
Karaganda National Research University named after academician Ye.A. Buketov,
100026, Republic of Kazakhstan, Karaganda, 28, Universitetskaya Street
*e-mail: cherry-girl1899@mail.ru

RESEARCH OF THE EFFECT OF UV-IRRADIATION ON UNSATURATED POLYESTER RESINS OBTAINED IN THE PROCESS OF «COLD» CURING WITH ACRYLIC ACID

Annotation: *The investigation of the influence of UV irradiation on polymers represents an important and relevant area of science and technology, as it enables the development of new approaches for designing more durable and efficient materials. This work examines the changes occurring in polymers based on unsaturated polyesters under prolonged exposure to ultraviolet radiation. The objective of the study was to evaluate the effect of long-term UV irradiation on the thermal stability of polymeric materials based on polyethylene glycol maleate and polypropylene glycol maleate copolymerized with acrylic acid at a component*

©G.K. Burkeyeva, A.K. Kovaleva, N.M. Zhumabek, Z.M. Ibrayeva, 2026

ratio of approximately 70:30 wt.%. The samples were examined using microscopy to identify microcracks formed as a result of UV exposure. In addition, visual assessment of color variation and the appearance of turbidity in the studied materials was performed. Additionally, the carbonyl index was determined to quantitatively evaluate the degree of photooxidative degradation of the polymers. This parameter characterizes the accumulation of carbonyl groups formed as a result of polymer chain scission under UV irradiation and allows estimation of the extent of photodegradation processes in the materials. The obtained results demonstrate that the polymer synthesized on the basis of polyethylene glycol maleate exhibited a more pronounced decrease in the onset temperature of thermal deformation after UV exposure compared with the copolymer based on polypropylene glycol maleate, indicating higher resistance of the latter to UV-induced degradation. The thermal stability of the copolymers was evaluated by thermogravimetric analysis through determination of the onset temperature of thermal deformation before and after 21 days of UV irradiation.

Key words: *UV-irradiation, thermal deformation, thermal stability, copolymerization, «cold» curing, unsaturated polyesters, polyethylene glycol maleate, polypropylene glycol maleate.*

Introduction

With the advancement in technology and increasing use of polymeric materials in various industries such as automotive, construction, medical and packaging, special attention has been paid to the durability and resilience of these materials [1-3]. Polymers have carved a significant niche in the global market due to their versatility, lightness and low cost, however, their performance is largely dependent on the effects of various environmental factors [4]. One of the most damaging effects on polymers is ultraviolet (UV) radiation, which is a portion of the solar radiation spectrum. UV-rays can significantly affect the structure and properties of polymeric materials, leading to their degradation.

UV-irradiation causes photochemical reactions in the molecular structure of polymers, which can lead to the breaking of chemical bonds, formation of free radicals, and degradation of polymer chains. These processes can affect many physical characteristics of materials, including strength, elasticity, transparency and resistance to external aggressive influences such as moisture, temperature and chemicals [5, 6]. The effect of UV-radiation is particularly noticeable on polymers that are exposed to prolonged sunlight, such as in exterior coatings, product packaging, medical and construction materials. Polymers can lose their original characteristics when exposed to UV-radiation, which limits their service life and reduces the cost-effectiveness of their use [7].

However, the study of the effects of UV-radiation on polymers provides valuable information for the development of new sustainable materials as well as methods to protect polymers from UV-radiation. Current research is aimed at improving the UV-stability of polymeric materials through the use of various stabilizers, UV-absorbers, and the introduction of innovative polymer compositions with improved properties [8]. In addition, UV-radiation is used not only as a destruction factor, but also as a tool to improve the properties of polymers, for example, in the curing process of some types of coatings and resins [9].

Thus, the results of the study can be used to further optimize the composition of such polymers in order to increase their resistance to UV-exposure, which will open new opportunities for their use in conditions of prolonged solar irradiation.

This work is devoted to the investigation of prolonged exposure to UV-irradiation on the thermal stability of polymers based on unsaturated polyesters, polyethylene glycol maleate (p-EGM) and polypropylene glycol maleate (p-PGM) with acrylic acid (AA).

Materials and Methods

Reagents used in this work: ethylene glycol, propylene glycol, maleic anhydride, acrylic acid, benzoyl peroxide, dimethylaniline («Sigma-Aldrich»), aluminum chloride («Reachim»). All reagents were used without additional purification.

Initial polyesters – polyethylene glycol maleate and polypropylene glycol maleate – were obtained by polycondensation reaction of ethylene glycol and propylene glycol, respectively, with maleic anhydride according to the method [10, 11] at the temperature of 150-160°C. Aluminum chloride was used as a catalyst.

«Cold» curing of solutions of the obtained unsaturated polyesters in acrylic acid of ~70:30 wt.% composition was carried out using an optimized binary initiating system consisting of benzoyl peroxide (PB) and dimethylaniline (DMA) (ratio of components 1:0.15 wt.% of the mass of the initial solution). The curing was carried out at 20°C [12, 13].

The reaction products were identified by IR spectroscopy. Analysis of the obtained IR spectra showed the presence of characteristic bands in the range of 1570-1590 cm^{-1} (1572 cm^{-1} and 1583 cm^{-1}), indicating the presence of unsaturated double bonds of p-EGM and p-PGM, which did not

react. Both IR-spectra of the copolymers of p-EGM and p-PGM with AA exhibited absorption bands with peaks at 1718 cm^{-1} and 3432 cm^{-1}, confirming the presence of –COOH carboxyl groups. Peaks at 2846 cm^{-1} and 2918 cm^{-1} were also detected, which is characteristic of the methylene groups of p-PGM.

Next, the effect of UV-irradiation on samples of binary systems of p-EGM and p-PGM with AA in the ratio of ~70:30 wt.% was investigated. The experiment was carried out in accordance with EN 1297:2004, MOD (GOST 32317-2012) using Weiss UV3 instrument of Weiss Technik (Germany) [14]. This device is a closed chamber for observation, providing irradiation of samples with ultraviolet light with wavelengths 290 and 450 nm [15].

For the experiment, plates of different thicknesses from 1 to 5 mm were made (three samples of each thickness for parallel experiments, which allowed to ensure the reliability of the results. The irradiation intensity was kept constant and the experiment itself was continued for three weeks (21 days). The condition of the specimens after irradiation was assessed visually, focusing on color changes and the appearance of microcracks.

To quantitatively assess the degree of photooxidative degradation, the carbonyl index (CI) was calculated, defined as the ratio of the area of the carbonyl group band (1710-1720 cm^{-1}) to the area of the reference band (e.g., deformation vibrations of methylene groups in the 1450 cm^{-1} region):

$$CI = \frac{A_{1710-1720}}{A_{1450}} \quad (1)$$

where A is the area of the corresponding peak.

To evaluate the thermal stability of the samples, their thermograms were analyzed by determining the thermal deformation temperature in the range from 30 to 200°C. The process of complete decomposition of copolymers was recorded at a temperature of about 550-600°C *on a device for the synchronic thermal analysis* Labsys Evolution TG-DTA/DSC («Setaram») in dynamic regimen [16].

Results and Discussion

Nowadays, polymeric materials play an important role in almost all areas of industry. The exploitation of polymers includes their use in different environments, depending on their purpose. Thus, polymers can be used in a wide variety of applications such as construction, packaging, medicine, electronics and automotive. During their use, they are subjected to various influences that can affect their mechanical, thermal, chemical and physical properties. Polymer aging is a set of processes occurring in a material that cause deterioration of its properties over time. One of the main factors affecting polymer aging is UV-radiation and temperature. In particular, UV-exposure leads to polymer chain breakage, color change, loss of strength and elasticity (photoaging), and high temperature accelerates degradation processes, for example, thermal aging causes changes in the polymer structure, which can lead to its brittleness or softening.

Taking into account that photo-aging is accompanied by disruption of polymer structure, appearance of cracks (surface and in the thickness of the material), surface opacity, etc., reduction of mechanical characteristics of materials, the influence of UV-rays on polymeric materials should be taken into account in the calculation of building structures or other polymer products by appropriate coefficients of working conditions [17].

In double-reactive bonded polymers, aging is usually manifested by two types of processes: degradation and cross-linking of macromolecules. The degradation process caused by UV-irradiation is called «photodegradation» [15].

To determine the effect of UV-exposure on copolymers of p-EGM and p-PGM with AA of ~70:30 wt.% ratio, we performed visual evaluation of the samples to detect color changes and appearance of turbidity. Further, microscopic analysis was performed to detect microcracks on the surface of the samples due to irradiation. The results obtained by visual and microscopic analysis are presented in Table 1.

Based on the experimental data obtained, it was found that as a result of prolonged exposure of the analyzed binary system of p-PGM with AA to UV radiation, all samples, regardless of thickness, acquired a yellowish tint. However, the surfaces did not tarnish or become matte. Also, the color changes were more pronounced in plates of smaller thickness (1-2 mm) compared to thicker samples. Although polymers are often subjected to cracking or degradation under UV exposure, in this case microscopic analysis did not show the appearance of microcracks or other

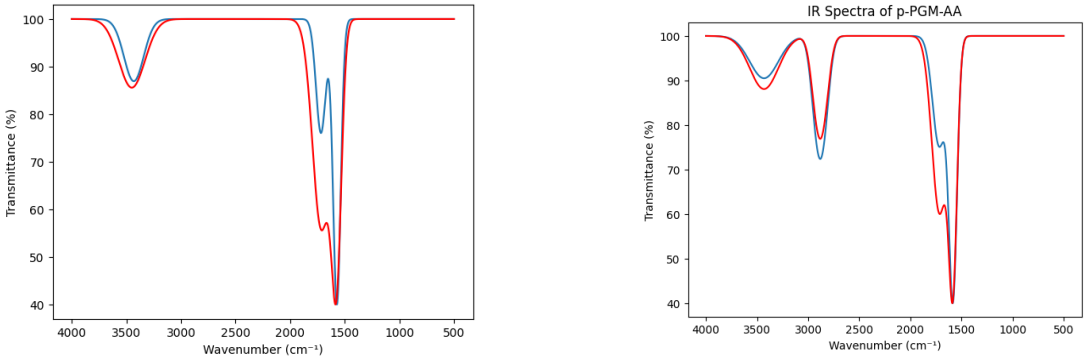
deformations on the surface of the samples. No visual changes in color, appearance of bubbles or turbidity were recorded for the p-EGM samples with AA, and microcracks were also absent on their surface.

Table 1 – Effect of UV-irradiation on copolymers of p-EGM and p-PGM with AA of ~70:30 wt.% composition (after exposure to UV-radiation for 21 days)

Unsaturated polyester	Co-curing agent	Color change, turbidity	Presence of microcracks, bubbles	Other changes
p-EGM	AA	–	–	Slight hardening, loss of flexibility
p-PGM		Slight yellowish tint	–	Slight hardening, loss of flexibility

After UV irradiation, significant changes were observed in the IR spectra of copolymers in the carbonyl group absorption region. For the p-EGM–AA copolymer, an increase in the intensity and area of the absorption band in the range 1710–1720 cm^{-1} was noted, indicating an increase in the concentration of carbonyl fragments formed as a result of photooxidative destruction of the macromolecular chain.

In the case of the p-PGM–AA copolymer, an increase in the intensity of the carbonyl band in the range 1710-1720 cm^{-1} was also observed after UV irradiation. However, the appearance of new absorption bands in the 1680-1690 cm^{-1} region was also recorded, caused by the formation of conjugated carbonyl structures (chromophores). The formation of these structures was accompanied by visual yellowing of the samples, which is characteristic of photoaging processes involving conjugated systems (Figure 1).



a b

Figure 1 – IR spectra of p-EGM and p-PGM with AA copolymers
a – p-EGM–AA 68.94:31.06 wt.%; b – p-PGM–AA 68.65:31.35 wt.%

The calculation of the carbonyl index showed that for the p-EGM–AA copolymer, this indicator increased from 0.82 to 1.46 after UV irradiation, while for the p-PGM–AA copolymer, a less pronounced increase was observed – from 0.79 to 1.18. The more significant increase in CI for p-EGM–AA indicates a more intense photo-oxidative degradation process.

The results of IR spectroscopy are consistent with the data from thermogravimetric analysis.

Thus, instrumental analysis of the thermal stability of the binary systems of p-EGM and p-PGM with AA included thermogravimetric analysis (TGA) to determine the temperature of the onset of thermal deformation before and after exposure to UV-radiation for 21 days. The thermogram results showed that the thermal stability of p-EGM–AA decreased slightly after UV-irradiation. While there was almost no change in the onset temperature of thermal deformation for the p-PGM–AA system (Figure 2).

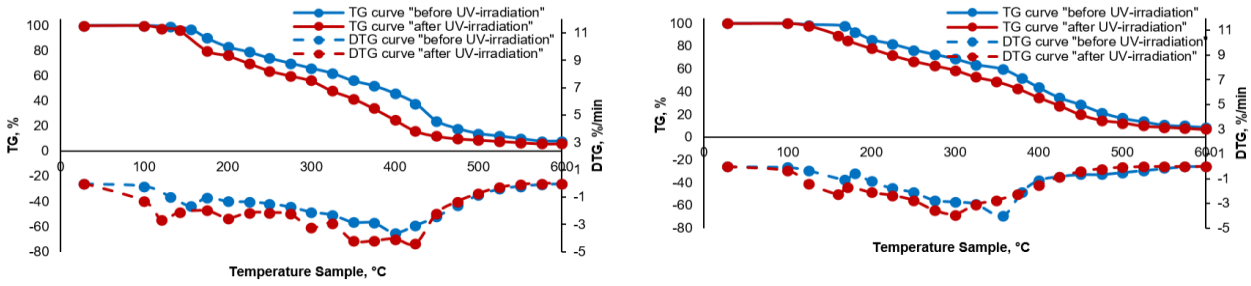


Figure 2 – TG curves of p-EGM and p-PGM with AA copolymers at heating rate of 10°C/min before and after UV-irradiation:
a – p-EGM–AA 68.94:31.06 wt.%; b – p-PGM–AA 68.65:31.35 wt.%

Thus, the onset temperature of thermal decomposition of the p-EGM–AA copolymer before irradiation was 156°C, and after UV-irradiation it slightly decreased to 141°C (Figure 2 a). For the p-PGM–AA binary system, the onset temperature of thermal decomposition before and after irradiation was 168°C and 159°C (Figure 2 b).

Thus, based on the obtained data, it should be noted that exposure to UV-rays, even for a long time, does not significantly affect the onset temperature of thermal deformation. However, with respect to the binary system p-PGM–AA, it should be noted that its application in the production of polymeric materials may be limited due to its color change as a result of exposure to UV-rays. In comparison with the above-mentioned binary system p-PGM–AA, the copolymers of p-EGM with AA showed better performance, including a fairly good thermal stability after UV-irradiation. The obtained results make it possible to speak about the preferability of using the binary system p-EGM–AA as a polymer base in the production of materials for various purposes.

Conclusions

The studies of thermal stability as a result of prolonged exposure to UV rays on binary systems of p-EGM and p-PGM with AA of ~70:30 wt.% composition have shown high thermal stability of copolymers of these unsaturated polyesters after prolonged UV-irradiation, which reveals broad prospects for their use as special-purpose materials.

The negative consequences of UV-irradiation on the copolymers of p-PGM with AA should be attributed to the appearance of yellowness, which may limit their use in the manufacture of products from the polymer, in which the importance is given to the color performance of the finished product.

Thus, as a result of the conducted experiment it is possible to draw a conclusion about the preferability of choosing the binary system of p-EGM with AA for obtaining polymeric materials for various purposes on their basis.

References

1. Glogowska K. Characteristics of Polymer Materials with New Smart Utilities / K. Glogowska, T. Klepka, L. Dulebova // Advances in Science and Technology-Research Journal. – 2020. – Vol. 14. – № 4. – P. 96-103. https://doi.org/10.12913/22998624/125581.
2. Research progress in functional polymer materials / C.Y. Han et al // Cailiao gongcheng – Journal of Materials Engineering. – 2021. – Vol. 49, № 6. – P. 55-65. https://doi.org/10.11868/j.issn.1001-1381.2020.000187.
3. Influence of tropical and temperate climatic factors on the properties of urethane-based paint coatings / N.P. Andreeva et al // Paint and varnish materials and their application. – 2018. – № 4. – P. 24-28.
4. Halary J.L. Polymer materials and sustainable development / J.L. Halary, L. Avérous, V. Verney // Actualite chimique. – 2010. – № 338(39). – P. 41-53.
5. Study of Aging Processes of Polymer Composite Materials in Natural Conditions of the Tropical Climate of North America / E.V. Nikolaev et al // Novosti materialovedeniya. Science and technology: electronic scientific and technical journal. – 2018. – Vol. 30, № 3-4. – Art. 08.
6. Tanzer J.D. Climate driven durability tester / J.D. Tanzer, L.S. Frankel // American Society for Testing and Materials Special Technical Publication. – 1992. – № 1200. – P. 29-44. https://doi.org/10.1520/STP14871S.

7. Tan L.J.Y. Recent progress on polymer materials for additive manufacturing / L.J.Y. Tan, W. Zhu, K. Zhou // Advanced Functional Materials. – 2020. – Vol. 30, № 43. https://doi.org/10.1002/adfm.202003062.
8. Development and modification of elastomeric materials for use in all climatic conditions / O.A. Eliseev et al // Aviation materials and technologies. – 2012. – № 5. – P. 309-314.
9. Loch K.P. Unsaturated polyester resin / K.P. Loch // Ungesattigte Poliesterharra. – 1995. – Vol. 85. – № 10. – P. 1622-1630.
10. Burkeyev M.Zh. Method for producing unsaturated polyester resins based on propylene glycol and fumaric acid : Patent No. 33266 RK, C08G63/00 / M.Zh. Burkeyev, A.K. Kovaleva, E.M. Tazhbayev. – Publ. 2018.
11. New Polyampholyte Polymers Based on Polypropylene Glycol Fumarate with Acrylic Acid and Dimethylaminoethyl Methacrylate / M.Zh. Burkeev et al // Russian Journal of Applied Chemistry. – 2018. – Vol. 91, № 7. – P. 1145-1152. https://doi.org/10.1134/S1070427218070121.
12. «Cold curing» of polyethylene glycol maleate with acrylic acid and some physicochemical properties of their solutions / G.K. Burkeyeva et al // Bulletin of University of Karaganda. Series Chemistry. – 2022. – Vol. 106, № 2. – P. 25-31. https://doi.org/10.31489/2022Ch2/2-22-22.
13. Development of Energy-Efficient Curing Method for Polypropylene Glycol Fumarate Using an Optimized Initiating System of «Cold» Curing / G.K. Burkeyeva et al // Eurasian Journal of Chemistry (Bulletin of University of Karaganda. Series Chemistry). – 2023. – Vol. 109, № 1. – P. 15-23. https://doi.org/10.31489/2023Ch1/1-23-10.
14. GOST 32317-2012 (EN 1297:2004, MOD). Roofing and waterproofing materials flexible bitumen-containing and polymeric (thermoplastic or elastomeric). Test method for aging under the influence of artificial climatic factors: UV radiation, elevated temperature and water. – M.: Standartinform, 2014. – 7 s. https://docs.cntd.ru/document/1200108098.
15. Bobrov T.B. Investigation of UV-irradiation effect on polymer degradation rate / T.B. Bobrov, S.D. Gafurov, F.H. Istamov // Applied Physics. – 2020. – № 5. – P. 93-96. URL: http://applphys.orion-ir.ru/appl-20/20-5/PF-20-5-93.pdf.
16. Thermal stability of unsaturated polyesters and copolymers based on them / S.V. Vinogradova et al // Polymer Science. – 1968. – Vol. 10, № 7. – P. 1757-1764. https://doi.org/10.1016/0032-3950(68)90368-7.
17. Influence of temperature and UV intensity on photo-polymerization reaction studied by photo-DSC / M.C. Rusu et al // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2012. – Vol. 110, № 1. – P. 287-294. https://doi.org/10.1007/s10973-012-2465-5.

Acknowledgment

This research is funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. AP23488036).

Г.К. Буркеева, А.К. Ковалева*, Н.М. Жұмабек, Ж.М. Ибраева
Карагандинский национальный исследовательский университет им. Е.А. Букетова,
100026, Республика Казахстан, Караганда, Университетская, 28
*e-mail: cherry-girl1899@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УФ-ОБЛУЧЕНИЯ НА НЕНАСЫЩЕННЫЕ ПОЛИЭФИРНЫЕ СМОЛЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ В ПРОЦЕССЕ «ХОЛОДНОГО» ОТВЕРЖДЕНИЯ АКРИЛОВОЙ КИСЛОТОЙ

Изучение влияния ультрафиолетового облучения на полимеры является важным и актуальным направлением науки и техники, поскольку позволяет разрабатывать новые подходы к созданию более долговечных и эффективных материалов. В данной работе рассматриваются изменения, происходящие в полимерах на основе ненасыщенных полиэфиров при длительном воздействии ультрафиолетового излучения. Целью исследования являлось изучение влияния продолжительного УФ-облучения на термическую стабильность полимерных материалов на основе полиэтиленгликольмалеината и полипропиленгликольмалеината, отвержденных акриловой кислотой при соотношении компонентов ~70:30 масс.%. Образцы исследовались методом микроскопии для выявления микротрещин, возникающих в результате воздействия УФ-излучения. Дополнительно проводилась визуальная оценка изменения окраски и появления мутности исследуемых материалов. Дополнительно для количественной оценки степени фотоокислительной деградации полимеров определялся карбонильный индекс. Данный показатель характеризует накопление карбонильных групп, образующихся в результате разрушения

полимерной цепи под действием ультрафиолетового излучения, и позволяет оценить глубину протекания процессов фотостарения материалов. Термическая стабильность сополимеров определялась методом термогравиметрического анализа путем установления температуры начала термической деформации до и после УФ-облучения образцов в течение 21 суток. Полученные результаты показали, что полимер, синтезированный на основе полиэтиленгликольмалеината, демонстрирует более выраженное снижение температуры начала термической деформации после УФ-облучения в сравнении с сополимером на основе полипропиленгликольмалеината, что свидетельствует о более высокой устойчивости последнего к деградации, обусловленной УФ-облучением.

Ключевые слова: *УФ-облучение, тепловая деформация, термическая стабильность, сополимеризация, «холодное» отверждение, ненасыщенные полиэфиры, полиэтиленгликольмалеинат, полипропиленгликольмалеинат.*

Г.К. Буркеева, А.К. Ковалева*, Н.М. Жұмабек, Ж.М. Ибраева
Академик Е.А. Бөкетов атындағы Қарағанды ұлттық зерттеу университеті,
100026, Қазақстан Республикасы, Қарағанды, Университетская к-сі, 28
*e-mail: cherry-girl1899@mail.ru

АКРИЛ ҚЫШҚЫЛЫМЕН «СУЫҚ» ҚАТАЮ ПРОЦЕСІНДЕ АЛЫНҒАН ҚАНЫҚПАҒАН ПОЛИЭФИРЛІ ШАЙЫРЛАРҒА УК-СӘУЛЕЛЕНУДІҢ ӘСЕРІН ЗЕРТТЕУ

Полимерлерге ультракүлгін сәулеленудің әсерін зерттеу ғылым мен техника саласындағы маңызды әрі өзекті бағыт болып табылады, себебі ол неғұрлым берік және тиімді материалдарды жасауға жаңа тәсілдерді әзірлеуге мүмкіндік береді. Бұл жұмыста ультракүлгін сәулеленудің ұзақ уақыт әсері кезінде қанықпаған полиэфирлер негізіндегі полимерлерде жүретін өзгерістер қарастырылды. Зерттеудің мақсаты – полиэтиленгликоль малеинаты мен полипропиленгликоль малеинаты негізінде акрил қышқылымен шамамен 70:30% массалық қатынаста алынған полимерлік материалдардың ұзақ мерзімді ультракүлгін сәулеленудің әсерінен термиялық тұрақтылығын зерттеу. Үлгілер ультракүлгін сәулеленудің әсерінен пайда болатын микрожарықшаларды анықтау үшін микроскопиялық әдіспен зерттелді. Сонымен қатар зерттелген материалдардың түсінің өзгеруі мен лайлану құбылысы визуалды түрде бағаланды. Сонымен қатар полимерлердің фотооксидтік деградация дәрежесін сандық тұрғыда бағалау мақсатында карбонил индексі анықталды. Бұл көрсеткіш ультракүлгін сәулеленудің әсерінен полимер тізбегінің ыдырауы нәтижесінде түзілетін карбонил топтарының жинақталуын сипаттайды және материалдардың фототозу процесінің тереңдігін бағалауға мүмкіндік береді. Сополимерлердің термиялық тұрақтылығы термогравиметриялық талдау әдісі арқылы, яғни үлгілерді 21 тәулік бойы ультракүлгін сәулеленуге ұшыратқанға дейін және кейін термиялық деформация басталу температурасын анықтау арқылы бағаланды. Алынған нәтижелер полиэтиленгликоль малеинаты негізінде синтезделген полимерде ультракүлгін сәулеленуден кейін термиялық деформация басталу температурасының анағұрлым айқын төмендейтінін көрсетті. Бұл көрсеткіш полипропиленгликоль малеинаты негізіндегі сополимермен салыстырғанда төмен, яғни соңғысы ультракүлгін әсерге анағұрлым жоғары төзімділік көрсетеді.

Түйін сөздер: *УК-сәулелену, жылу деформациясы, термиялық тұрақтылық, сополимерлеу, «суық» қатаю, қанықпаған полиэфирлер, полиэтиленгликолмалеинат, полипропиленгликолмалеинат.*

Сведения об авторах

Гульсым Кабаевна Буркеева – PhD, ассоц. профессор, Карагандинский национальный исследовательский университет имени академика Е.А. Букетова, Республика Казахстан; e-mail: guls_b@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1993-7648.

Анна Константиновна Ковалева* – PhD, ведущий научный сотрудник, Карагандинский национальный исследовательский университет имени академика Е.А. Букетова, Республика Казахстан; e-mail: cherry-girl1899@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9758-648X.

Нұркен Мейрамұлы Жұмабек – магистрант 2-го курса, Карагандинский национальный исследовательский университет имени академика Е.А. Букетова, Республика Казахстан; e-mail: zhumabek2003@list.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-5318-0110.

Жансая Мирханкызы Ибраева – ст. преподаватель, Карагандинский национальный исследовательский университет имени академика Е.А. Букетова, Караганда, Республика Казахстан; e-mail: zhansaya.ibraieva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1419-1384.

Авторлар туралы мәліметтер

Гульсым Кабаевна Буркеева – PhD доктор, қауымд. профессоры, академик Е.А. Бөкетов атындағы Қарағанды ұлттық зерттеу университеті, Қарағанды, Қазақстан Республикасы; e-mail: guls_b@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1993-7648.

Анна Константиновна Ковалева* – PhD доктор, жетекші ғылыми қызметкер, академик Е.А. Бөкетов атындағы Қарағанды ұлттық зерттеу университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: cherry-girl1899@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9758-648X.

Нұркен Мейрамұлы Жұмабек – 2-ші курс магистранты, академик Е.А. Бөкетов атындағы Қарағанды ұлттық зерттеу университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: zhumabek2003@list.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-5318-0110.

Жансая Мирханкызы Ибраева – Аға оқытушы, Академик Е. А. Бөкетов атындағы Қарағанды ұлттық зерттеу университеті, Қарағанды, Қазақстан Республикасы; e-mail: zhansaya.ibraieva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1419-1384.

Information about authors

Gulsym Kabayevna Burkeyeva – PhD, Associate Professor of Chemical Sciences, Karaganda National Research University named after academician Ye.A. Buketov, Republic of Kazakhstan; e-mail: guls_b@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1993-7648.

Anna Konstantinovna Kovaleva* – PhD, Lead researcher, Karaganda National Research University named after academician Ye.A. Buketov, Republic of Kazakhstan; e-mail: cherry-girl1899@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9758-648X.

Nurken Meiramuly Zhumabek – 2nd year master student, Karaganda National Research University named after academician Ye.A. Buketov, Republic of Kazakhstan; e-mail: zhumabek2003@list.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-5318-0110.

Zhansaya Mirkhankyzy Ibrayeva – Senior Lecturer, Karaganda National Research University named after academician Ye.A. Buketov, Karaganda, Republic of Kazakhstan; e-mail: zhansaya.ibraieva@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1419-1384.

Received 30.03.2026
Revised 15.05.2026
Accepted 18.05.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-71

IRSTI: 31.15.28

D.B. Karimova[1,2*], A.A. Vosmerikov[2], S.R. Konuspaev[3], L.N. Vosmerikova[2], A.V. Vosmerikov[2]
[1]Al-Farabi Kazakh National University,
050040, Al-Farabi Avenue, 71, Almaty, Kazakhstan
[2]Institute of Petroleum Chemistry, SB RAS,
634055, Academic Avenue 4, Tomsk, Russia
[3]A.B. Bekhturov Institute of Chemical Sciences,
050010, Sh.Ualikhanov str.,106, Almaty, Kazakhstan
*e-mail: dana.tleugabylova@mail.ru

INVESTIGATION OF CONVERSION OF N-BUTANE TO LIGHT OLEFINS ON CATALYSTS Pd/γ-Al_2O_3 AND Pd/SiO_2

Abstract: *The results of the conversion of n-butane on supported palladium catalysts in a stationary mode in the temperature range of 400-600 °C, at atmospheric pressure and a volumetric feed rate of n-butane of 250 h^{-1} are presented. The catalysts were obtained by the method of incipient wetness impregnation using γ-Al_2O_3 and SiO_2 (silica gel) as supports, the palladium loading was 1 and 3%. It was found that, along with the dehydrogenation of n-butane, cracking processes occur in parallel, leading to the formation of both olefins (ethylene, propylene) and alkanes (methane, ethane, propane), isomerization of n-butane to isobutane, and other reactions. Hydrogen contained in contact gases is equivalent to the amount of dehydrogenation and degradation products. In trace amounts, non-condensed liquid products such as pentane and aromatics are present in the gas phase. The catalysts were studied by SEM-EDS to determine the morphology of catalysts*

©D.B. Karimova, A.A. Vosmerikov, S.R. Konuspaev, L.N. Vosmerikova, A.V. Vosmerikov, 2026

and the elemental composition of individual sections of their surface, and the specific surface area of the catalysts was also determined.

Key words: *catalyst, palladium, alumina, silica, dehydrogenation, alkanes, n-butane, olefins.*

Introduction

Light alkanes are the main components of natural gas and crude oil. Despite the long-standing interest in hydrocarbon dehydrogenation reactions, the development of new active, selective, and energy-efficient catalysts remains an urgent problem. Catalytic dehydrogenation of light alkanes can effectively produce olefins and hydrogen. Light olefins, such as ethylene, propylene, and butenes, are bulk commodities and important building blocks for the production of value-added polymers [1, 2]. The demand for these olefins has been growing rapidly in recent years [3]. Today, this problem is especially due to the necessity of processing associated petroleum gases, which are still flared in large quantities in oil-producing regions. The processing of hydrocarbon gases can be carried out via two main routes: oxidative dehydrogenation, producing light olefins and water, and non-oxidative dehydrogenation, yielding light olefins and hydrogen. The last route is preferable, since both products are highly demanded by the petrochemical industry. In reviews [4, 5], existing dehydrogenation catalysts were reviewed; however, very limited information is available in the literature on the use of palladium catalysts in the non-oxidative dehydrogenation of light alkanes.

In a study [6], the addition of Ga to Pd/Al_2O_3 significantly affects palladium dispersion, catalytic activity, and selectivity in the n-butane dehydrogenation reaction at 500 °C. Ga changes the surface properties of Pd, inhibiting hydrogenolysis and carbon deposit coking, leading to higher selectivity for n-butenes compared to monometallic Pd catalysts.

Miller and co-workers conducted ethane and propane dehydrogenation on Pd intermetallic alloy catalysts: Pd-Zn [7], Pd-In [8], Pd-Fe [9]. All catalysts exhibited higher dehydrogenation activity, olefin selectivity, and stability compared to monometallic Pd catalysts. It was proposed that the high olefin selectivity arises from geometrically isolated Pd active sites located near inactive metallic promoters (geometric effect). At the same time, inactive metal changes the electronic structure of the Pd 4d orbital (electronic effect) [7-9]. In another study [10], well-dispersed Pd nanoparticles were prepared and encapsulated within IPC-2 and IPC-4 zeolites using the ADOR approach based on a 3D–2D–3D structural transformation. Pd nanoparticles inside zeolite channels prevent their agglomeration and sintering during the reaction of butane dehydrogenation, whereas Pd NPs in catalysts synthesized by the impregnation method tend to grow in size under reaction conditions [11]. A series of Pt-, Pd-, and Ru-based metals promoted by a second non-noble metal (Zn, Cu, Sn, or Fe) were synthesized and confined inside silicalite-1 crystals using a ligand-protected method. The second metal effectively stabilized and dispersed the noble metal atoms within the rigid S-1 zeolite framework via Si–O–M bonds, in this way enabling a reduction in the loading of expensive noble metals. The resulting bimetallic catalysts exhibited excellent performance in the non-oxidative propane dehydrogenation reaction.

Studies directly comparing $Pd/\gamma\text{-}Al_2O_3$ and Pd/SiO_2 catalysts in the non-oxidative dehydrogenation of n-butane under the same reaction conditions are still limited. In particular, there is insufficient information on how palladium dispersion, its real content on the support, and the distribution of metal particles affect the activity and selectivity of the reaction. For this reason, further investigation of the physicochemical properties of these catalysts and their behavior during the reaction is necessary.

The aim of this work is to study how the type of support and palladium loading influence the catalytic performance in non-oxidative n-butane dehydrogenation, with special attention to the relationship between metal dispersion, metal-support interaction, and the formation of C_2-C_4 olefins.

Materials and methods

The catalysts with a palladium content of 1 % and 3 % were synthesized on $\gamma\text{-}Al_2O_3$ and SiO_2 supports by the impregnation method, where a salt with the active metal is dissolved in water, with the solution volume equal to the pore volume of the support. The work began with the preparation of the supports: fractions with a size of 1.5-1.8 mm were selected by sieving and calcined in a muffle furnace at 400°C for 3 hours. Then, the pore volume of the prepared supports was determined. The support was impregnated with the resulting solution and left overnight. The process of n-butane conversion is carried out in a flow-reactor with a fixed bed catalyst. The volume of the catalyst was

5.2 ml. The experiment was carried out in the temperature range from 400 to 600 °C at atmospheric pressure, with a feed rate of 250 h^{-1}. Gas supply from the cylinder was carried out from top to bottom with flow control by means of a flow regulator. Uniform heating of the reaction zone was ensured by an electric furnace. At each temperature point, the process was maintained continuously for 30 minutes, and the composition of the reaction products was analyzed at fixed time intervals for all investigated catalysts. Under the conditions of the experiment, liquid products were absent. Gaseous products entered the analytical system and were analyzed by gas liquid chromatography (GLC) on a chromatograph “Chromatek Kristall 5000.2” with a flame ionization detector.

Scanning electron microscopy (SEM) was used to assess the uniformity of the distribution of the metal on the surface of the carrier and for the local determination of the elemental composition. Photomicrographs were obtained using an electron microscope JSM 6610LV. The accelerating voltage was 20 kV, with a resolution from 1 to 500 μm. This method is based on the registration of characteristic X-ray radiation generated by irradiation of the surface with an electron beam, which allows for the precise determination of the elemental composition at selected points of the sample.

The BET (Brunauer-Emmet-Teller) method was used to determine the specific surface area of the catalysts.

Results

The results of conversion of n-butane over Pd-containing catalysts supported on γ-Al_2O_3 are presented in Tables 1 and 2. As can be seen, from the data in Table 1, for the 1% Pd/γ-Al_2O_3 sample, an increase of both the conversion of n-butane and the yield of olefin hydrocarbons is observed with increasing temperature reaching 45 and 31%, respectively, at 600 ° C. The selectivity towards olefin formation in the studied temperature range varies from 68.9% to 76.3%.

Sample 3% Pd/γ-Al_2O_3 exhibits lower catalytic activity compared to sample 1% Pd/γ-Al_2O_3. Thus, the yield of olefins at 600 °C is 23.9%, which is 7.1% lower than for the 1% Pd/γ-Al_2O_3 sample.

Table 1 – Influence of temperature on the main indicators of the process of conversion of n-butane on Pd/γ-Al_2O_3 catalysts

Catalyst	T, °C	X, %	Y, %	S, %	Selectivity, %						
					Hydrogen	Alkanes C_1-C_2	Ethylene	Propylene	Butenes	Alkanes C_3-C_5	Arenes
1% Pd/γ-Al_2O_3	400	4	3.1	76,3	1,4	3,7	0,5	5,7	70,0	18,6	–
	450	3	2,5	73,0	1,6	3,6	0,9	5,1	67,0	21,7	–
	500	5	3,7	71,8	3,0	8,2	2,2	10,0	59,6	14,6	2,4
	550	16	12,3	78,4	3,2	12,1	5,5	13,0	59,9	5,0	1,3
	600	45	31,0	68,9	3,4	21,4	9,5	17,0	42,4	4,3	1,9
3% Pd/γ-Al_2O_3	400	7	4,7	68,0	1,8	13,3	0,2	6,4	61,4	16,9	–
	450	4	3,0	69,0	2,7	10,5	0,7	5,8	62,5	17,9	–
	500	6	4,2	73,3	2,8	7,0	1,2	5,5	66,6	13,3	3,6
	550	14	10,5	76,9	3,2	12,4	5,5	12,1	59,3	5,6	2,0
	600	36	23,9	67,0	3,9	23,4	9,9	19,5	37,6	3,8	1,9

Note: T – The reaction temperature; X – conversion; Y – yield of C_2-C_4 olefins; S – selectivity for the formation of C_2-C_4 olefins

Data on the composition of the products of n-butane conversion over 1% Pd/γ-Al_2O_3 and 3% Pd/γ-Al_2O_3 catalysts are given in Table 2. The main products are hydrogen, methane, ethane and olefins. Normal pentane and isopentanes are presented in small quantities and at a temperature of 500 °C and higher, the formation of aromatic hydrocarbons in small amounts (benzene, toluene) are observed. The obtained reaction products contain ethylene, propylene and butene isomers. The concentration of methane, ethane and olefins in the reaction products grows with increasing temperature of process, and the total content of C_3-C_5 alkanes decreases, mainly due to the conversion of n-butane. The concentration of aromatic hydrocarbons varies slightly with increasing temperature. The largest amount of olefin hydrocarbons is formed over the 1% Pd/γ-Al_2O_3 sample. At 600 °C, butenes (19%) prevail, while the yields of propylene are 7.7%, and ethylene is 4.3%.

Based on the experimental findings, the conversion of n butane is not limited to dehydrogenation. The reaction system also involves parallel cracking processes, leading to the formation of lower alkanes (CH_4, C_2H_6, C_3H_8), the isomerization of n butane isobutane, and a series

of consecutive reactions involving intermediate compounds, namely aromatization and dehydrocyclization.

Table 2 – The composition of the products of the conversion of n-butane on catalysts Pd/γ-Al_2O_3

Catalyst	T,°C	X,%	Yield of products,%							
			Hydrogen	Methane	Ethane	Ethylene	Propylene	Butenes	Alkanes C_3-C_5	Arenes
1% Pd/γ-Al_2O_3	400	4	0,06	0,1	0,04	0,02	0,2	2,9	96,7	–
	450	3	0,06	0,1	0,03	0,03	0,2	2,3	97,4	–
	500	5	0,15	0,3	0,12	0,11	0,5	3,0	95,6	0,1
	550	16	0,50	1,2	0,69	0,87	2,0	9,4	85,1	0,2
	600	45	1,52	5,6	3,97	4,28	7,7	19,0	57,0	0,9
3% Pd/γ-Al_2O_3	400	7	0,1	0,7	0,2	0,01	0,4	4,3	94,2	–
	450	4	0,1	0,4	-	0,03	0,3	2,7	96,4	–
	500	6	0,2	0,3	0,1	0,07	0,3	3,8	95,1	0,2
	550	14	0,4	1,1	0,6	0,7	1,6	8,1	87,2	0,3
	600	36	1,4	5,2	3,1	3,5	7,0	13,4	65,7	0,7
Note: T – Temperature of reaction; X – Conversion										

The results of n-butane conversion on SiO_2 samples containing 1 and 3% palladium are presented in Tables 3 and 4. According to Table 3, samples 1% Pd/SiO_2 and 3% Pd/SiO_2 are characterized by almost the same total catalytic (estimated by the degree of conversion of n-butane) and dehydrogenating activity. The conversion of n-butane at 600 °C for both catalysts is 23%, while the selectivity to olefin hydrocarbons on the 1% Pd/SiO_2 sample is slightly higher than for the 3% Pd/SiO_2 sample.

Table 3 – Influence of temperature on the main indicators of the process of conversion of n-butane on catalysts Pd/SiO_2

Catalyst	T, °C	X, %	Y, %	S, %	Selectivity, %						
					Hydrogen	Alkanes C_1-C_2	Ethylene	Propylene	Butenes	Alkanes C_3-C_5	Arenes
1% Pd/SiO_2	400	4	3,5	81,9	0,3	0,5	0,1	0,4	81,4	17,2	–
	450	4	3,6	82,1	0,3	0,6	0,2	0,5	81,4	17,1	–
	500	5	3,7	79,8	0,5	3,1	1,5	4,8	73,5	15,6	1,1
	550	7	5,5	75,0	0,5	13,4	8,1	21,8	45,1	10,0	1,1
	600	23	16,2	70,2	0,5	25,0	18,0	37,3	14,9	3,2	1,1
3% Pd/SiO_2	400	5	3,7	82,7	0,2	0,5	-	0,1	82,6	16,6	–
	450	4	3,6	82,2	0,4	0,7	0,1	0,4	81,7	16,8	–
	500	5	3,8	80,8	0,4	2,3	1,0	3,2	76,6	15,7	0,8
	550	7	4,7	71,4	2,2	13,1	6,4	19,8	45,2	11,6	1,7
	600	23	15,4	67,8	1,6	26,1	15,7	37,6	14,5	3,2	1,3
Note: T – Temperature of reaction; X – conversion; Y – yield of C_2-C_4 olefins; S – selectivity for the formation of C_2-C_4 olefins											

Analysis of the n-butane transformation process using 1% Pd/SiO_2 and 3% Pd/SiO_2 catalysts reveals a similar product profile for both systems. The principal reaction outputs are olefin hydrocarbons in the C_2-C_4 range and saturated hydrocarbons (alkanes) from C_3 to C_5. Secondary products, including hydrogen, methane/ethane (C_1-C_2 alkanes), and aromatic species, are present only in small quantities, as detailed in Table 4.

At the same time, it can be noted that significant differences are observed in the content of hydrogen, methane, ethane and olefins in gaseous products obtained on Pd-containing catalysts prepared on the carrier of γ-Al_2O_3 and SiO_2: over Pd/γ-Al_2O_3 samples more cracking products, especially at high temperature, while over Pd / SiO_2 catalysts show much higher selectivity to C_4 alkanes, meaning butenes are the dominant products (Tables 2 and 4).

Table 4 – The composition of the products of the conversion of n-butane on Pd/SiO_2

Catalyst	T, °C	X, %	Yield of products, %							
			Hydrogen	Methane	Ethane	Ethylene	Propylene	Butenes	Alkanes C_3-C_5	Arenes
1% Pd/SiO_2	400	4	0,01	0,01	0,01	-	0,02	3,5	96,4	–
	450	4	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	3,5	96,4	–
	500	5	0,02	0,09	0,05	0,07	0,22	3,4	96,1	0,05
	550	7	0,04	0,62	0,36	0,59	1,59	3,3	93,4	0,08
	600	23	0,12	3,73	2,05	4,16	8,61	3,4	77,6	0,26
3% Pd/SiO_2	400	5	–	–	–	–	–	3,7	96,2	–
	450	4	–	–	–	–	–	3,6	96,3	–
	500	5	–	0,1	–	–	0,2	3,6	96,0	–
	550	7	0,1	0,6	0,3	0,4	1,3	3,0	94,2	0,1
	600	23	0,4	3,8	2,1	3,6	8,6	3,3	78,0	0,3

Note: T – Temperature of reaction; X – Conversion

Figure 1 shows the comparative characteristics of the catalytic activity of the studied catalysts during the conversion of n-butane to C_2-C_4 olefin hydrocarbons at 600 ° C and a Weight Hourly Space Velocity (WHSV) of 250 h^{-1}. It can be seen that the 1% Pd/γ-Al_2O_3 has the highest activity and selectivity towards olefins. The n-butane conversion and the yield of olefin hydrocarbons on this sample are 45 and 31.0%, respectively. An increase in the concentration of palladium deposited on γ-Al_2O_3 leads to a decrease in catalytic activity and selectivity. The lowest activity in the process of n-butane dehydrogenation is shown for catalysts prepared on silica gel support. Moreover, the concentration of introduced palladium does not significantly affect the catalytic properties of samples based on SiO_2.

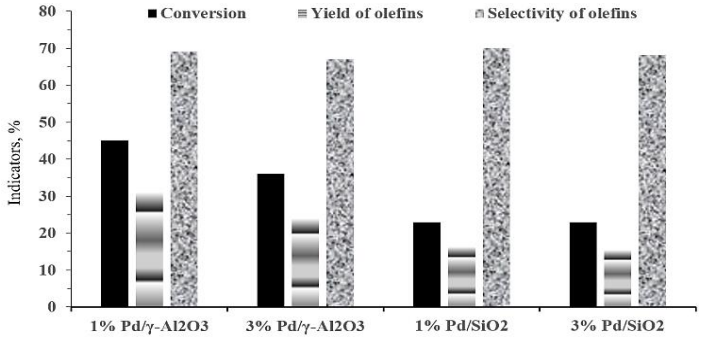


Figure 1 – Comparative activity of palladium-containing supported catalysts (T = 600 °C)

Table 5 shows the elemental composition at the selected sites for all Pd-containing catalysts. It can be seen that the samples supported on γ-Al_2O_3 are characterized by a uniform distribution of palladium with an average content of 1.23% for the 1% Pd/γ-Al_2O_3 sample and 3.18% for the 3% Pd/γ-Al_2O_3. The 1% Pd/SiO_2 catalyst is also presented in Table 5, loading of palladium is evenly distributed on the catalyst surface. Its average content is 0.86%, which is slightly less than the calculated amount of palladium. For the 3% Pd/SiO_2 catalyst, the elemental composition of three sections was also studied, the obtained data indicate that palladium on silica gel is not distributed evenly. The palladium content reaches 3.30% in some spots, while in others it is 2.11%. The average palladium content was found to be 2.58%, which is lower than the nominal value.

This heterogeneity in palladium distribution may be attributed to limitations of the impregnation procedure, local variations in the porosity of the SiO_2 support, and possible agglomeration of Pd species during drying and calcination. Such non-uniform distribution of the active metal may affect the local catalytic activity and overall performance of the catalyst.

Table 5 – Elemental composition for the selected sections of the catalysts Pd/γ-Al_2O_3

Section	Loading of Pd			
	1% Pd/γ-Al_2O_3	3% Pd/γ-Al_2O_3	1% Pd/SiO_2	3% Pd/SiO_2
1	1,14	3,29	0,94	3,30
2	1,28	3,08	0,84	2,32
3	1,26	3,18	0,81	2,11
average	1,23	3,18	0,86	2,58

Discussion

The summarized data on n-butane conversion over the studied catalysts, together with their elemental composition and specific surface area, are given in Table 6. As can be seen, the actual palladium content is slightly higher than the nominal value on γ-Al_2O_3, whereas in contrast, for silica gel samples, measured Pd concentration is lower than the calculated amount. This difference may be attributed to the special physicochemical properties of the supports. γ-Al_2O_3 contains a significant number of hydroxyl groups and coordinatively unsaturated Al^{3+} sites. As a result, palladium may be anchored more firmly to the surface of the support. Such interactions may conserve palladium and minimize metal loss during drying, calcination, and reduction steps. In addition, strong fixation of Pd species within the alumina surface layer may contribute to the slightly increased measured metal content. On the other hand, silica gel is chemically more inert and exhibits weaker metal-support interactions. Palladium precursor species may be less strongly bound to the SiO_2 surface, leading to partial metal loss during preparation steps. Furthermore, differences in pore structure and surface chemistry may result in non-uniform metal distribution, which could explain the lower experimentally determined palladium content compared to the nominal value.

Catalysts supported on γ-Al_2O_3 exhibit a relatively lower specific surface area compared to silica gel-based samples. For instance, the 1% Pd/γ-Al_2O_3 catalyst possesses a surface area of 232 m^2/g, which is 123 m^2/g lower than that of the corresponding 1% Pd/SiO_2 sample. Despite the lower surface area, the 1% Pd/γ-Al_2O_3 catalyst demonstrates the highest catalytic performance in the conversion of *n*-butane to C_2-C_4 olefins. At 600 °C, it achieves an olefin yield of 31.0% at an *n*-butane conversion of 45%. This suggests that the reaction is influenced more by metal-support interactions and electronic effects than simply by surface area. The enhanced performance of Pd/γ-Al_2O_3 can be attributed to stronger metal-support interactions and the acid-base properties of alumina. In addition, the presence of moderate Lewis acidity on γ-Al_2O_3 may promote β-H elimination and facilitate olefin desorption, thereby enhancing selectivity toward C_2-C_4 olefins while suppressing deep cracking and coke formation. In contrast, silica-supported catalysts, despite their higher surface area, exhibit weaker metal-support interactions, which can result in less stable active sites and slightly lower catalytic efficiency. The lower activity observed for the 3% Pd samples may be explained by the formation of larger palladium particles. As the particles grow, the number of well-dispersed active sites decreases, which can negatively affect selective dehydrogenation. The long-term stability and resistance to catalyst deactivation were not studied in detail in the present work, since the main focus was on the effect of the support type and palladium loading on the activity and selectivity in n-butane conversion. In addition, only trace amounts of aromatic compounds were detected, while heavy liquid products were not observed. This may suggest that the formation of coke precursors under the studied conditions was limited. However, a more reliable evaluation of catalyst stability requires longer catalytic tests together with characterization of the spent catalysts.

Despite the formation of by-products, the process shows relatively high efficiency toward the formation of valuable C_2-C_4 olefins. In particular, the 1% Pd/γ-Al_2O_3 catalyst provided 45% n-butane conversion and a 31% olefin yield at 600 °C. At the same time, the by-products formed during the reaction, including hydrogen and light alkanes, may also be considered useful for petrochemical and refining applications. It should also be noted that in industrial practice unreacted n-butane can be recycled back into the process, which makes it possible to increase the overall conversion of the feedstock while maintaining sufficiently high selectivity toward olefins.

Table 6 – The conversion of n-butane on palladium-containing catalysts (T = 600 °C) and their specific surface area

Catalyst	Actual content of Pd, %	Specific surface area, m^2/g	Conversion, %	Yield of olefins, %
1% Pd/γ-Al_2O_3	1,23	232	45	31,0
3% Pd/γ-Al_2O_3	3,18	221	36	23,9
1% Pd/SiO_2	0,86	355	23	16,3
3% Pd/SiO_2	2,58	322	23	15,5

Conclusion

The obtained results show that palladium catalysts can effectively convert n-butane into C_2-C_4 olefins. Their performance depends strongly on both the palladium loading and the type of

support. The 1% Pd catalysts demonstrate better activity and selectivity than the 3% Pd samples, mainly due to improved metal dispersion and a higher number of accessible active sites, while higher loading promotes particle aggregation and side reactions. Among the studied systems, Pd/γ-Al_2O_3 exhibits the best catalytic behavior, which can be attributed to stronger metal-support interactions and the contribution of surface acid-base sites to C-H bond activation. Overall, the 1% Pd/γ-Al_2O_3 catalyst provides the most balanced combination of activity and selectivity and appears promising for the efficient utilization of light alkanes as feedstock for petrochemical production. The obtained results contribute to the understanding of structure-performance relationships in Pd-based dehydrogenation catalysts and may serve as a basis for rational design of selective systems for light alkane.

References

1. Hu Z.P. State of the art catalysts for direct dehydrogenation of propane to propylene / Yang D., Wang Z., Yuan Z.Y. // Chinese Journal of Catalysis. – 2019. – Vol. 40, № 9. – P. 1233-1254. https://doi.org/10.1016/S1872-2067(19)63360-7.
2. Catalyst development and design in propane dehydrogenation / Li Q. et al // Chemical Research in Chinese Universities. – 2026. – Vol. 42, № 1. – P. 1-20. https://doi.org/10.1007/s40242-026-5294-y.
3. Global olefins market report // Data Bridge Market Research. – 2026. https://www.databridgemarketresearch.com/ru/reports/global-olefins-market (дата обращения: 12.02.2026).
4. He Z. Design of supported metal catalysts and systems for propane dehydrogenation / Yang J., Liu L. // JACS Au. – 2024. – Vol. 4. – P. 4084-4109. https://doi.org/10.1021/jacsau.4c00730.
5. Liu S. Metal-based catalysts for the non-oxidative dehydrogenation of light alkanes to light olefins / B. Zhang, G. Liu // Reaction Chemistry & Engineering. – 2021. – Vol. 6. – P. 9-26. https://doi.org/10.1039/D0RE00381F.
6. Rodríguez L. Dehydrogenation of n-butane over Pd–Ga/Al_2O_3 catalysts / Romero D. et al // Applied Catalysis A: General. – 2010. – Vol. 373, № 1-2. – P. 66-70. https://doi.org/10.1016/j.apcata.2009.10.040.
7. Structural evolution of an intermetallic Pd–Zn catalyst selective for propane dehydrogenation / Childers D.J. et al // Physical Chemistry Chemical Physics. – 2015. – Vol. 17. – P. 28144-28153. https://doi.org/10.1039/C5CP00222B.
8. Pd-In intermetallic alloy nanoparticles: highly selective ethane dehydrogenation catalysts / E.C. Wegener et al // Catalysis Science & Technology. – 2016. – Vol. 6. – P. 6965-6976. https://doi.org/10.1039/C6CY00491A.
9. Promotion of Pd nanoparticles by Fe and formation of a Pd_3Fe intermetallic alloy for propane dehydrogenation / C. Yang et al // Catalysis Today. – 2019. – Vol. 323. – P. 123-128. https://doi.org/10.1016/j.cattod.2018.07.043.
10. Sajad M. Direct dehydrogenation of propane over Pd nanoparticles encapsulated within IPC zeolites with tunable pore sizes / M. Sajad et al // Applied Materials Today. – 2022. – Vol. 29. – Art. 101644. https://doi.org/10.1016/j.apmt.2022.101644.
11. Bimetallic clusters confined inside silicalite-1 for stable propane dehydrogenation / X.E. Wei et al // Nano Research. – 2023. – Vol. 16. – P. 10881-10889. https://doi.org/10.1007/s12274-023-6052-9.

Д.Б. Каримова[1,2*], А.А. Восмериков[2], С.Р. Конуспаев[3], Л.Н. Восмерикова[2], А.В. Восмериков[2]

[1]Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті,
050040, Алматы, Қазақстан, аль-Фараби даңғылы, 71
[2]РҒА СБ Мұнай химиясы институты,
634055, Томск, Ресей, Академиялық даңғылы, 4
[3]Ә.Б. Бектұров атындағы Химия ғылымдары институты,
050010, Алматы, Қазақстан, Ш.Улиханов көшесі,106
*e-mail:dana.tleugabylova@mail.ru

Pd/γ-Al_2O_3 ЖӘНЕ Pd/ SiO_2 КАТАЛИЗАТОРЫ ҚАТЫСЫНДА Қ-БҰТАННЫҢ ТӨМЕНГІ ОЛЕФИНДЕРГЕ АЙНАЛУЫН ЗЕРТТЕУ

Мақалада н-бутанның палладийді тасымалдағышқа отырғызылған катализаторларында 400-600 °С температура аралығында, стационарлық жағдайда, атмосфералық қысымда, газдың көлемдік жылдамдығы 250 сағат$^{-1}$ н-бутанның өзгерісі келтірілген. Катализаторларды тасымалдағыштың ылғал сыйымдығы негізінде сіңіру әдісімен даярланды, палладий концентрациясы 1 мен 3%, тасымалдағыш ретінде γ-Al_2O_3 және SiO_2 (силикагель) алынды. Катализаторлар эксперимент алдында реакторда сутекпен тотықсыздандырылды. Н-бутан дегидрлеуімен бірге крекинг, изомерлену, ыдырау реакциялары жүреді, бұл түзілген олефиндермен (этилен, пропилен, бутен-1, цис- және транс-бутены-2) мен алкандармен (метан, этан, пропан, изобутан) дәлелденеді. Н-бутан изобутанға изомерленді, ал басқа реакциялардың көлемі аз. Контакт газдың құрамындағы анықталған сутектің көлемі дегидрлеу мен ыдырау өнімдеріне эквивалентті. Реакция өнімдерінің құрамында конденсацияланбаған сұйық пентан мен ароматты қосылыстардың ізі табылады. Катализаторлардың меншікті беті БЭТ әдісімен анықталып, СЭМ-ЭДС арқылы бетінің химиялық құрамы анықталды.

Түйін сөздер: *катализатор, палладий, алюминий оксиді, кремний оксиді, дегидрлеу, алкандар, қ-бутан, олефиндер.*

Д.Б. Каримова[1*], А.А. Восмериков[2], С.Р. Конуспаев[3], Л.Н. Восмерикова[2], А.В. Восмериков[2]
[1]Казахский национальный университет имени аль-Фараби,
050040, Алматы, Казахстан, проспект аль-Фараби, 71,
[2]Институт Химии Нефти СО РАН,
634055, Томск, Россия, проспект Академический, 4
[3]Институт химических наук имени А.Б. Бектурова,
050010, Алматы, Казахстан, улица Ш.Уалиханова,106
*e-mail:dana.tleugabylova@mail.ru.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ Н-БУТАНА В НИЗШИЕ ОЛЕФИНЫ НА КАТАЛИЗАТОРАХ Pd/γ-Al_2O_3 И Pd/SiO_2

Представлены результаты конверсии н-бутана на нанесенных палладиевых катализаторах в стационарном режиме в интервале температуры 400-600 °С, при атмосферном давлении и объемной скорости подачи н-бутана 250 ч$^{-1}$. Катализаторы получены методом пропитки по влагоемкости носителей, в качестве которых использовали γ-Al_2O_3 и SiO_2 (силикагель), концентрация палладия в них составляла 1 и 3%. Установлено, что наряду с дегидрированием н-бутана параллельно протекают процессы крекинга, приводящие к образованию как олефинов (этилен, пропилен), так и алканов (метан, этан, пропан), изомеризации н-бутана в изобутан и другие реакции. Водород, содержащийся в контактных газах, эквивалентен количеству продуктов дегидрирования и деструкции. В следовых количествах в газовой фазе присутствуют несконденсированные жидкие продукты, такие как пентан и ароматические соединения. Катализаторы исследованы методом СЭМ-ЭДС с определением элементного состава отдельных участков поверхности, а также определена площадь удельной поверхности методом БЭТ.

Ключевые слова: *катализатор, палладий, оксид алюминия, оксид кремния, дегидрирование, алканы, н-бутан, олефины.*

Сведения об авторах

Дана Бекмырзаевна Каримова* – докторант, КазНУ им.аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан; e-mail: dana.tleugabylova@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7013-7585.

Антон Александрович Восмериков – к.х.н., Институт химии нефти СО РАН, г. Томск, Россия; e-mail:antonvosmerikov@gmail.com. ORCID: http://orcid.org/0000-0003-2876-8647.

Сапаркали Ретаевич Конуспаев – д.х.н., профессор Института химических наук имени А.Б. Бектурова, г. Алматы, Казахстан; e-mail: srkonuspayev@mail.ru.

Людмила Николаевна Восмерикова – д.х.н., Институт химии нефти СО РАН, г. Томск, Россия; e-mail: lkplu@ipc.tsc.ru. ORCID: http://orcid.org/0000-0002-9436-6147.

Александр Владимирович Восмериков – д.х.н, профессор, директор Института химии нефти СО РАН г. Томск Россия; e-mail: pika@ipc.tsc.ru. ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7569-0902.

Information about the authors

Dana Bekmyrzaevna Karimova* – PhD student, al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: dana.tleugabylova@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7013-7585.

Anton Aleksandrovich Vosmerikov – Candidate of Chemical Sciences, Institute of petroleum chemistry, SB RAS, Tomsk, Russia; e-mail: antonvosmerikov@gmail.com. ORCID: http://orcid.org/0000-0003-2876-8647.

Saparcali Retaevich Konuspaev – Doctor of Chemical Sciences, Bekturov institute of chemical sciences, Almaty, Kazakhstan; e-mail: srkonuspayev@mail.ru.
Lyudmila Nikolaevna Vosmerikova – Doctor of Chemical Sciences, Institute of Petroleum Chemistry, SB RAS, Tomsk, Russia; e-mail: lkplu@ipc.tsc.ru. ORCID: http://orcid.org/0000-0002-9436-6147.
Aleksander Vladimirovich Vosmerikov – Doctor of Chemical Sciences, Institute of Petroleum Chemistry, SB RAS, Tomsk, Russia; e-mail: pika@ipc.tsc.ru. ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7569-0902.

Авторлар туралы мәліметтер
Дана Бекмырзаевна Каримова* – докторант, аль-Фараби ҚазҰУ,Алматы ,Қазақстан; e-mail: dana.tleugabylova@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7013-7585.
Антон Александрович Восмериков – Химия ғылымдарының кандидаты, РҒА мұнай химиясы институты, Томск, Ресей; e-mail: antonvosmerikov@gmail.com. ORCID: http://orcid.org/0000-0003-2876-8647.
Сапарғали Ретаевич Қоныспаев – Химия ғылымдарының докторы, А.Б. Бектұрова атындағы химия ғылымдары институтының профессоры, Алматы қаласы, Қазақстан Республикасы; e-mail: srkonuspayev@mail.ru.
Людмила Николаевна Восмерикова – Химия ғылымдарының докторы,РҒА мұнай химиясы институты, Томск қаласы, Ресей; e-mail: lkplu@ipc.tsc.ru. ORCID: http://orcid.org/0000-0002-9436-6147.
Александр Владимирович Восмериков – Химия ғылымдарының докторы, профессор, РҒА мұнай химиясы институтының директоры, Томск қаласы, Ресей; e-mail: pika@ipc.tsc.ru. ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7569-0902.

Received 13.04.2026
Revised 18.05.2026
Accepted 19.05.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-72

CC BY 4.0
Check for updates

ҒТАХР: 31.15.00

Р.Н. Ажигулова[1,2], Б.Х. Мусабаева[3], А.К. Жусупова[1,2], А.Темирова[1], А. Абылайхан[1,2]*
[1]Жану проблемалары институты,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Бөгенбай батыр көшесі, 172
[2]Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,
050040, Қазақстан Республикасы, Алматы қаласы, Әл-Фараби даңғылы, 71
[3]Астана халықаралық университеті,
Қазақстан Республикасы, Астана қаласы, Қабанбай батыр даңғылы, 8
*e-mail: akerkeabylaikhan2@gmail.com

ТАУ-КЕН ЖӘНЕ МЕТАЛЛУРГИЯ КЕШЕНІНІҢ ТЕХНОГЕНДІК ҚАЛДЫҚТАРЫН БИОЛОГИЯЛЫҚ ШАЙМАЛАУ ӘДІСІМЕН ӨҢДЕУ

Аңдатпа. *Бұл мақалада Қазақстан Республикасының тау-кен металлургия кешенінің техногендік қалдықтары түсті және сирек кездесетін металдардың перспективалы екінші реттік көзі ретінде қарастырылады. Зерттеу нысаны ретінде Балқаш байыту фабрикасының мыс кендерін байыту қалдықтары алынды, олар силикатты матрицамен (Si ≈ 36 %) және Cu (≈0,32 %) мен Zn (≈0,77 %) қалдық мөлшерлерінің болуымен сипатталады. ICP-OES әдісімен олардың химиялық, гранулометриялық және физика-химиялық құрамына кешенді талдау жүргізілді. Шикізатты дайындау процестері, оның ішінде ұсақтау, майдалау және жіктеу зерттелді, сондай-ақ майдалау режимдерінің оңтайландырылуы жүргізілді. Бөлшек өлшемін <40 мкм дейін азайту шаймалау тиімділігін арттырудың негізгі факторы екені көрсетілді. Микрофлюидтік бөлу мен биошаймалауды қамтитын интеграцияланған қайта өңдеу технологиясы ұсынылды. Микрофлюидтік бөлу процесі мақсатты фракцияда мыстың 0,52-0,58 %-ға дейін селективті концентрленуін және 70-75% деңгейінде алынуын қамтамасыз ететіні анықталды. Оңтайлы жағдайларда (pH 1,8-1,9; T ≈ 31-32°C) жүргізілген биологиялық шаймалау нәтижесінде металдарды бөліп алу дәрежесі Cu 60-63 %, Zn – 55-58 % дейін жететіні көрсетілді. Алынған нәтижелер*

©Р.Н. Ажигулова, Б.Х. Мусабаева, А.К. Жусупова, А.Темирова, А. Абылайхан, 2026

биологиялық шаймалау процесін техногендік қалдықтарды кешенді өңдеуде және оның қоршаған ортаға әсерін азайту үшін пайдалану мүмкіндігін дәлелдейді.

Түйін сөздер: *техногендік қалдықтар, биологиялық шаймалау, ұнтақтау, микрофлюидтік бөлу, металдар.*

Кіріспе

Жоғары сапалы минералдық ресурстардың жаһандық сарқылуы және түсті әрі сирек металдарға деген сұраныстың артуы жағдайында екінші реттік шикізат көздерін, соның ішінде тау-кен металлургия кешенінің техногендік қалдықтарын қайта өңдеуге тарту ерекше өзектілікке ие болып отыр. Соңғы зерттеулердің бағалауы бойынша, байыту қалдықтары мен металлургиялық қалдықтар құрамында құрамы кедей кендермен салыстыруға болатын бағалы компоненттердің едәуір мөлшері бар, бұл оларды металдардың перспективалы көзі ретінде қарастыруға мүмкіндік береді [1].

Қазіргі циркулярлық экономика тұжырымдамасы «өндіру-өңдеу-қалдық» сызықтық моделінен ресурстарды тұйық циклде пайдалануға көшуге негізделген. Осыған байланысты техногендік қалдықтар тиімді қайта өңдеу технологияларын енгізу жағдайында кейбір металдардың әлемдік өндірісінің 10-15 %-на дейін қамтамасыз ете алатын екінші реттік ресурстар ретінде қарастырылады [2].

Техногендік шикізатты қайта өңдеу мәселесі тау-кен металлургия өнеркәсібі дамыған елдер үшін ерекше маңызға ие, өйткені жинақталған қалдықтар қоршаған ортаға айтарлықтай теріс әсер етеді. Қалдық қоймалары мен шлак үйінділері топырақ пен судың ауыр металдармен ластану көзі болып табылады, сондай-ақ қышқылды дренаждың түзілуіне себеп болады [3].

Дәстүрлі пирометаллургиялық өңдеу әдістері жоғары энергия сыйымдылығымен және парниктік газдардың айтарлықтай шығарындыларымен сипатталады, бұл олардың төмен сұрыпты шикізатқа қолданылуын шектейді. Осыған байланысты жұмсақ жағдайларда металдарды алуға мүмкіндік беретін және қоршаған ортаға әсері төмен гидрометаллургиялық және биотехнологиялық әдістер кеңінен қолданылуда [4].

Биологиялық шаймалау техногендік қалдықтарды қайта өңдеудің ең перспективалы бағыттарының бірі болып табылады. Бұл процесс *Acidithiobacillus ferrooxidans* және *Leptospirillum ferrooxidans* сияқты ацидофильді микроорганизмдердің сульфидті минералдарды тотықтырып, металдарды ерігіш күйге ауыстыру қабілетіне негізделген [5].

Қазіргі зерттеулер биологиялық шаймалаудың құрамында металдар мөлшері төмен қалдықтарды, шлактарды және басқа техногендік материалдарды өңдеуде тиімді қолданылатынын көрсетеді [6].

Дамудың маңызды бағыттарының бірі – биологиялық шаймалауды физика-химиялық және гидрометаллургиялық процестермен біріктіру болып табылады. Мұндай кешенді технологиялар синергетикалық әсер есебінен металдарды алу дәрежесін айтарлықтай арттырып, процестің ұзақтығын қысқартуға мүмкіндік береді [7].

Техногендік шикізатты қайта өңдеу тиімділігін арттыруда математикалық модельдеу маңызды рөл атқарады. Ол сілтілеу кинетикасын сипаттауға, технологиялық параметрлердің әсерін ескеруге және процестің оңтайлы шарттарын анықтауға мүмкіндік береді. *Shrinking core* типіндегі модельдер мен биокинетикалық теңдеулерді қолдану эксперименттік зерттеулер көлемін едәуір қысқартып, болжау дәлдігін арттырады [8]. Техногендік қалдықтарды қайта өңдеу саласындағы елеулі жетістіктерге қарамастан, биосілтілеудің төмен жылдамдығы, процестерді масштабтаудың күрделілігі және қолданыстағы технологиялық схемалардың жеткіліксіз тиімділігі сияқты шешілмеген мәселелер сақталуда. Бұл физика-химиялық және биотехнологиялық әдістерді үйлестіретін интеграцияланған тәсілдерді әзірлеу қажеттілігін айқындайды.

Қазақстан Республикасының тау-кен металлургия кәсіпорындары құрамында түсті және сирек металдардың (Cu, Zn, Pb, Fe, REE) қалдық мөлшерлері бар қатты техногендік қалдықтардың (шаң, шлак, флотация қалдықтары) едәуір көлемін түзеді. Бұл материалдар күрделі химиялық және фазалық құрамымен сипатталады және қоршаған ортаға экологиялық жүктеме түсіре отырып, сонымен қатар әлеуетті екінші реттік ресурс болып табылады. Оларды тиімді қайта өңдеу технологияларын әзірлеу үшін химиялық, гранулометриялық және физика-

химиялық қасиеттерін кешенді талдау, сондай-ақ қайта өңдеудің оңтайлы параметрлерін болжау және экологиялық тәуекелдерді бағалау мақсатында деректерді жүйелеу қажет [9].

Балқаш байыту фабрикасындағы мыс кендерін байыту қалдықтары негізінен Жезқазған және Балқаш кен аудандарының карьерлерінен жеткізілетін мыс-порфирлі кендерді флотациялық өңдеу нәтижесінде қалыптасқан. Мыс концентраттары бөлінгеннен кейін қалған пульпа қалдық қоймаларына тасымалданып, онда қатты фазаның тұнуы мен жинақталуы жүреді [10]. Kazakh Research Institute of Mining and Metallurgy жүргізген геологиялық-минералогиялық зерттеулердің мәліметтері бойынша, Балқаш байыту фабрикасының қалдық қоймасы аумағында құрамында 0,1-0,4% мыс бар 630 млн тоннадан астам материал жинақталған.

Бұл қалдықтардағы мыстың жалпы геологиялық қоры шамамен 2 миллион тонна деп бағаланады. Осылайша, зауыттың қалдық қоймалары екінші реттік өңдеу үшін өнеркәсіптік әлеуеті бар ірі жасанды кен орны болып табылады. Қалдық – негізінен кварц, дала шпаты, хлорит, серпентин және саз минералдарынан тұратын ұсақ шашыраңқы, сұр-жасыл түсті материал. Сульфид фазалары (халькопирит, борнит және халькоцит) тау жыныстарын түзетін минералдардың түйіршіктерінде микродиссеминация ретінде пайда болады. Мыс құрамды минералды қоспалар әдетте 10-50 мкм-ден аспайды. Минералогиялық зерттеулер сульфидтердің мөлшері бойынша микроскопиялық екенін және біркелкі емес таралғанын, негізінен негізгі тау жыныстарының түйіршіктерінде екенін көрсетеді [11]. Бұл дәстүрлі әдістерді қолдана отырып, мысты қалпына келтірудің төмен жылдамдығын анықтайды және биологиялық шаймалау, микротолқынды белсендіру немесе гидротермиялық өңдеу сияқты балама технологияларды пайдалануды қажет етеді.

Физикалық қасиеттеріне сәйкес, қалдықтар қатты фазаның тығыздығы 2,6-2,9 г/см³, ылғалдылығы 35-40% және қоршаған ортаның бейтараптан аздап сілтілі реакциясымен (pH 7,0-8,5) сипатталады. Материал бірнеше картаға түсірілген қалдық қоймаларында жиналады; олардың кейбіреулері белсенді емес, ал басқалары жұмыс істеп тұр. Қалдықтар IV қауіптілік класына жатады; дегенмен, ұзақ мерзімді сақтау кезінде сульфидті минералдардың тотығу процестері және Cu^{2+}, Zn^{2+} және Pb^{2+} иондарының сүзгі суларына миграциясы мүмкін [12]. Сондықтан, Балқаш зауытының техногендік жинақталуы екі жақты маңызды нысан ретінде қарастырылады – экологиялық жауапкершілік және қайталама металл өндіруге арналған әлеуетті минералды шикізат;

Материалдар мен әдістер

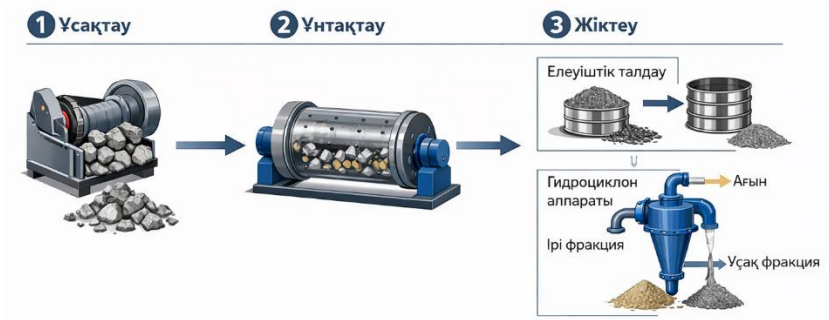
Бұл жұмыстың зерттеу нысаны Балқаш өңдеу зауытының қалдықтары болып табылады. Олар химиялық құрамының салыстырмалы түрде тар диапазонындағы вариациялары бар ұсақ дисперсті кварц-саз материалдар. Сынамалар алу стандартты төртке бөлу әдісін қолдана отырып жүргізілді, салмағы 5-10 кг болатын біріктірілген үлгілер жасалды. Содан кейін үлгілер 105°C температурада тұрақты салмаққа дейін кептіріліп, ұсақталып, зертханалық салмаққа дейін азайтылды.

Үлгіні дайындау зерттеудің маңызды кезеңі болды және біркелкі гранулометриялық құрамы мен көрсетілген сипаттамалары бар материалды алуға бағытталған ұсақтау, ұнтақтау және жіктеудің кезекті кезеңдерін қамтыды.

Бастапқы ұсақтау жақ ұсатқышта 5 мм-ден аз бөлшектердің өлшеміне дейін жүргізілді. Содан кейін ұсақтау Fritsch Pulverisette 5 Classic Line планеталық шарлы диірменінде қажетті бөлшектердің өлшеміне (D_{50} = 40-50 мкм) жеткенше жүргізілді.

Ұнтақтау режимдерін оңтайландыру ұнтақтау уақыты, диірменнің толтырылу дәрежесі және шарлардың материалға қатынасы (B/P) ескеріліп жүргізілді, бұл майдалау дәрежесі, энергия шығындары және өнімділік арасындағы оңтайлы компромистік жағдайларды анықтауға мүмкіндік берді. Ұнтақтаудан кейін үлгілер елек талдауы (>40 мкм бөлшектер үшін), тұндыру және лазерлік дифракция (ұсақ фракциялар үшін) арқылы өлшемі бойынша жіктелді. Нәтижесінде келесі жұмыс фракциялары алынды: <40 мкм (биосілтемелеу үшін), 40-100 мкм (салыстырмалы зерттеулер үшін) және >100 мкм.

Бөлшектердің өлшемінің таралуының біртектілігін қамтамасыз етуге ерекше назар аударылды. Ол үшін әрбір фракция қосымша араластырылып, төртке бөлінді. 1-суретте техногендік материалдарды қайта өңдеуге дайындау процесінің сызбасы көрсетілген, ол үш дәйекті кезеңді қамтиды: ұсақтау, ұнтақтау және жіктеу.



Сурет 1 – Техногендік материалдарды қайта өңдеуге дайындау процесінің сызбасы

Бірінші кезең бастапқы материалды механикалық ұсақтау жабдықтарын пайдаланып ұсақтауды қамтиды, бұл ірі кесектердің өлшемін кейінгі ұнтақтауға жарамды бөлікке дейін азайтады. Бұл кезең материалдың құрылымын алдын ала бұзуға және одан әрі өңдеуді жеңілдетуге бағытталған.

Екінші кезең шарлы диірменде ұнтақтауды қамтиды, мұнда ұнтақтаушы денелердің соққылы-үйкелісті әсері нәтижесінде бөлшектердің терең диспергирленуі жүреді. Нәтижесінде материалдың меншікті беті айтарлықтай артады, бұл гидрометаллургиялық және биологиялық шаймалау процестерін интенсификациялаудың аса маңызды факторы болып табылады.

Үшінші кезең жіктеу процесімен сипатталады, ол елеуіштік талдау және гидроциклондық бөлу әдістерін қолдану арқылы жүзеге асырылады. Елеуіштік талдау бөлшектерді ірілігі бойынша қажетті фракцияларға бөлуге мүмкіндік береді, ал гидроциклон орталықтан тепкіш күштердің әсерінен материалды құмдарға (ірі фракция) және ағымға (ұсақдисперсті фракция) тиімді бөледі.

Осылайша, ұсынылған схема шикізатты дайындаудың кешенді тәсілін көрсетеді және кейінгі технологиялық операциялар үшін оңтайлы сипаттамалары бар, гранулометриялық құрамы бойынша біртекті материал алуды қамтамасыз етеді.

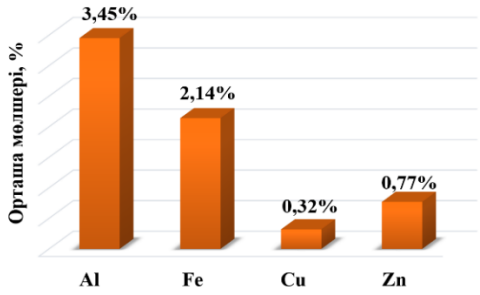
Аналитикалық деректерді верификациялау үшін тәуелсіз аспаптық әдіс – индуктивті байланысқан плазмамен атомдық-эмиссиялық спектрометрия (ICP-OES) қолданылды. Зерттеулер ICP-OES PerkinElmer Optima 8000 (PerkinElmer, АҚШ) аспабында жүргізілді. Талдау алдында барлық үлгілер 105 °C температурада тұрақты массаға дейін кептіріліп, <0,1 мм фракцияға дейін ұнтақталды. Одан әрі материалдың түріне және қолданылатын талдау әдісіне байланысты 0,1-0,5 г навескаларды бірнеше нұсқа бойынша қышқылдық ыдырату жүргізілді. Кремнезем, алюмосиликаттар және темір-силикат фазаларының жоғары мөлшерімен ерекшеленетін жатқызылған флотациялық хвосттар үшін HNO_3 + HF + HCl (1:1:1) қоспасы қолданылды. Үлгілер TANK-есо микротолқынды ыдырату қондырғысында 160-170 °C температурада 120 минут бойы толық ерігенге дейін қыздырылды. Суығаннан кейін ерітінділер дистилденген сумен 50 мл көлемге дейін жеткізіліп, сүзгіден өткізіліп, ICP-OES талдауына жіберілді.

Биологиялық шаймалау зертханалық жағдайда көлемі 1-ден 5 литрге дейінгі шыны топтамалы биореакторларды қолдану арқылы жүргізілді. Қоректік орта ретінде микроорганизмдердің өсуі мен метаболикалық белсенділігін қамтамасыз ететін макро- және микроэлементтерге бай стандартты 9K ортасы пайдаланылды. Тәжірибелер 30-35°C температурада және pH 1,5-2,0 мәндерінде жүргізілді, бұл ацидофильді хемолитотрофты бактериялардың дамуы үшін оңтайлы жағдайларға сәйкес келеді. Пульпа тығыздығы 5-10% аралығында ұсталды, бұл тиімді массалмасуды және микроорганизм жасушаларына оттегінің жеткізілуін қамтамасыз етті. Жүйені аэрациялау қарқындылығы 1–2 л/мин деңгейінде жүзеге асырылды, ал араластыру жылдамдығы 200-400 айн/мин болды, бұл қатты және сұйық фазалардың біркелкі таралуына және бөлшектердің тұнуының алдын алуға ықпал етті. Процестің ұзақтығы тәжірибе шарттарына және зерттелетін материалдың сипаттамаларына байланысты 5-тен 15 тәулікке дейін созылды. Биологиялық шаймалауды бастар алдында микроорганизмдерді зерттелетін субстратқа 3–5 тәулік бойы алдын ала бейімдеу жүргізілді, бұл олардың тұрақтылығын қамтамасыз етіп, металдарды кейінгі алу процесінің тиімділігін арттырды.

Нәтижелер және талқылаулар

Балқаш байыту фабрикасының мыс кендерін байыту қалдықтары силикатты типтегі ұсақдисперсті материал болып табылады. Олардың химиялық құрамының негізін кремнезем (Si ≈ 36 %) құрайды, сондай-ақ алюминий (≈ 3,4 %), темір (≈ 2,1 %), мыс (≈ 0,32 %) және мырыш (≈ 0,77 %) мөлшерлері кездеседі.

Материал бөлшектерінің орташа өлшемімен (D_{50} ≈ 45 мкм), жоғары ылғалдылығымен (35-40%) және ортаның әлсіз сілтілі реакциясымен (pH 7-8,5) сипатталады. Мыстың төмен мөлшері мен күрделі минералогиялық құрылымы дәстүрлі өңдеу әдістерінің тиімділігін шектейді, алайда биогидрометаллургиялық технологияларды, атап айтқанда биосілтілеуді қолдануға алғышарттар жасайды 2-суретте ICP-OES әдісімен талданған Балқаш байыту фабрикасының мыс кендерін байыту қалдықтарының 49 үлгісі бойынша алынған нәтижелер көрсетілген.



Сурет 2 – ICP-OES деректері бойынша Балқаш байыту фабрикасының мыс кендерін байыту қалдықтарындағы элементтердің орташа мөлшері

2-суретте ICP-OES әдісімен анықталған байыту қалдықтарындағы негізгі элементтердің орташа мөлшері көрсетілген. Алюминий мен темірдің мөлшері сәйкесінше 3,45% және 2,14% деңгейінде екені анықталды, бұл алюмосиликатты матрицаға тән. Түсті металдардың концентрациясы айтарлықтай төмен: мыстың орташа мөлшері шамамен 0,32 %, ал мырыш – 0,77%. Салыстырмалы түрде төмен мәндеріне қарамастан, бұл элементтерді өндіру тұрғысынан практикалық қызығушылық тудырады. 1-кестеде майдалау параметрлерінің процесс көрсеткіштеріне әсері келтірілген.

Кесте 1 – Ұнтақтау параметрлерінің процесс көрсеткіштеріне әсері

Параметр	Жағдай	D50, мкм	Энергия, кВт сағ/т	Өнімділік, кг/сағ
Уақыт	5-15 мин	57-135	7.5-26.9	136-442
Жүктелу	25-35%	57-135	7.5-26.9	136-442
B/P	3:1-7:1	57-135	7.5-26.9	136-442

2-кесте ұнтақтау уақытының 5-тен 15 минутқа дейін артуы D_{50} көрсеткішінің 135-тен 57 мкм-ге дейін төмендеуіне әкелетінін көрсетеді. Сонымен қатар, меншікті энергия шығыны 7,5-тен 26,9 кВт·сағ/т дейін артады, ал өнімділік 442-ден 136 кг/сағ дейін төмендейді. Жүктемені 35 %-ға дейін арттыру өнімділікті 442 кг/сағ дейін көбейтеді және энергия шығынын 7,5 кВт·сағ/т дейін төмендетеді, алайда бөлшектердің іріленуімен (135 мкм дейін) қатар жүреді. B/P қатынасын 7:1 дейін арттыру неғұрлым ұсақ ұнтақтауды (57-111 мкм) қамтамасыз етеді, бірақ энергия тұтынудың өсуіне (26,9 кВт·сағ/т дейін) алып келеді. Ұнтақтау кезеңінен кейін барлық үлгілер бөлшектердің өлшемі сілтілеу процестерінің кинетикасына әсерін болдырмау және тар фракциялар алу мақсатында ірілігі бойынша жіктелді. Биологиялық шаймалау үшін <40 мкм фракциясы оңтайлы екені анықталды, өйткені ол өзара әрекеттесу бетінің дамуы есебінен металдарды максималды дәрежеде алуды қамтамасыз етеді.

Өнеркәсіптік қалдықтарды микрофлюидтік әдіспен бөлу

Микрофлюидтік жүйелер реагенттер мен энергия шығынын барынша азайта отырып, бөлшектерді жоғары дәлдікпен бөлуге мүмкіндік береді, бұл оларды техногендік және минералдық суспензияларды өңдеуде тиімді құрал етеді [13-16]. Бұл жүйелер дара фракцияларды бөліп алуға, бөлшектердің өлшемі мен тығыздығы бойынша таралуын бақылауға, сондай-ақ аналитикалық тұрғыдан таза үлгілер алуға мүмкіндік береді. Аталған тәсіл әсіресе ұсақ дисперсті материалдар (күл қалдықтары, шламдар, катализаторлар, «қара

масса») үшін өзекті, себебі дәстүрлі әдістер бұл жағдайда көп еңбек талап етеді және тиімділігі төмен болады.

Мыс кендерін байыту қалдықтарын бөлу үшін микроканалдық реактор әзірленді – шыны пластиналар мен қалыңдығы 150-200 мкм желімдік қабықша негізінде жасалған сэндвич-түріндегі микрофлюидтік ұяшық. Құрылғы арналар жүйесінен тұрады (3 кіріс, фокустау аймағы, 3 шығыс). Реактор ішінде бөлшектер ламинарлық ағын және арна геометриясының әсерінен таралады. Ағынды фокустау бүйірлік ағындар есебінен жүзеге асырылады, ал бөлшектердің бөлінуі инерциялық және гидродинамикалық әсерлер нәтижесінде жүреді, бұл олардың арна ені бойынша таралуына және кейін жеке шығыс арналары арқылы шығарылуына мүмкіндік береді.

Кесте 3 – Бөлу өнімдерінің салыстырмалы сипаттамалары

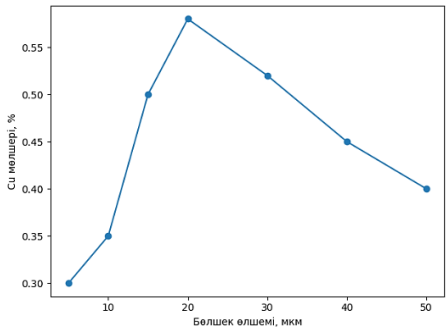
Параметр	Бастапқы материал	Орталық ағын	Бүйірлік ағын
Cu құрамы, %	0,28	0,52-0,58	0,12-0,18
Cu экстракциясы, %	-	70-75	25-30
Өнімнің өнімділігі, %	100	40-42	58-60
Бөлшектердің өлшемі, мкм	5-50	15-30	<15 және >30

3 кестеде келтірілген деректер микрофлюидтік бөлу кезінде пайда болған орталық және бүйірлік ағындар арасындағы негізгі айырмашылықтарды көрсетеді. Орталық өнімдегі мыс мөлшері 0,39-0,52% аралығында жоғары болатыны анықталды, ал бүйірлік ағындағы Cu концентрациясы едәуір төмен және 0,11-0,23% құрайды. Орташа мәндер (тиісінше ~0,45% және ~0,18 %) ағындар арасында металдың таралуында тұрақты градиенттің бар екенін дәлелдейді.

Анықталған айырмашылықтар бөлудің физика-гидродинамикалық механизмдерімен түсіндіріледі. Орталық ағын негізінен мыс құрамды, тығыздығы жоғары және ірі бөлшектермен байытылған, олар инерциялық күштердің әсерінен арнаның осьтік аймағында шоғырланады. Ал бүйірлік ағын тұрақтандырушы ағындардың әсерімен шығарылатын жеңіл және ұсақдисперсті силикатты матрицамен сипатталады.

Осылайша, кесте микрофлюидтік бөлудің жоғары селективтілігін көрсетеді, бұл бөлшектерді олардың физикалық сипаттамалары бойынша кеңістіктік тұрғыдан бөлуге және мыс құрамды фракцияны орталық өнімде тиімді шоғырландыруға мүмкіндік береді.

Тәжірибе нәтижелері микрофлюидті бөлу қалдық бөлшектерінің мөлшері мен тығыздығы бойынша селективті таралуын тиімді түрде қамтамасыз ететінін көрсетті. Бөлшектердегі мыс мөлшерінің олардың ірілігіне едәуір тәуелді екені және 15–30 мкм аралығында айқын максимумға ие болатыны анықталды. Бұл 3-суретте көрсетілген графикалық тәуелділікпен расталады: бөлшек өлшемі аталған диапазонға дейін артқан сайын Cu концентрациясы өседі, одан кейін оның мәні төмендейді.



Сурет 3 – Микрофлюидтік бөліну кезінде бөлшек өлшеміне байланысты Cu мөлшерінің тәуелділігі

3-суретте мыс мөлшерінің бөлшек өлшемі артқан сайын өсіп, 15-30 мкм аралығында максимумға жететіні, одан кейін біртіндеп төмендейтіні көрсетілген. Мұндай тәуелділік мыс негізінен орташа өлшемді бөлшектерде шоғырланатынын дәлелдейді. Ал ұсақ фракциялар дисперсті табиғатына байланысты металдың төмен мөлшерімен сипатталады, ал ірі бөлшектерде бұл силикатты матрицаның болуына байланысты байқалады.

Бұл әсер материалдың минералогиялық ерекшеліктерімен түсіндіріледі: мыс негізінен орташа өлшемді бөлшектерде шоғырланған, ал ұсақ фракциялар силикатты матрицаның үлесінің жоғары болуымен және сәйкесінше металдың төмен мөлшерімен сипатталады. Ірі бөлшектер өз кезегінде бос жыныс қосындылары бар агрегаттар болып табылады, бұл да Cu концентрациясының төмендеуіне әкеледі.

Бөлу механизмі микроканалдағы ламинарлық ағын жағдайларымен анықталады, мұнда инерциялық және гидродинамикалық күштердің әсерінен әртүрлі физикалық сипаттамалары бар бөлшектер ағын бойында әртүрлі позицияларды алады. Бүйірлік ағындарды пайдалану суспензияның шоғырлануын қамтамасыз етеді, ал кейінгі арна тармақталуы байытылған және сарқылған фракцияларды бөлуге мүмкіндік береді.

Осылайша, микрофлюидтік технология мыстың дара бөлшектер өлшемі диапазонында тиімді концентрациялауға мүмкіндік береді. Ол аналитикалық таза фракциялардың өндірілуін қамтамасыз етеді және кейінгі өңдеуге жіберілетін материал көлемін азайтуға көмектеседі.

Өнеркәсіптік қалдықтарды биологиялық шаймалау

Балқаш байыту фабрикасынан алынған биосілтемелеу қалдықтарының эксперименттік зерттеулері металл алу тиімділігі процестің параметрлерінің үйлесіміне айтарлықтай байланысты екенін көрсетті. 24 тәжірибенің нәтижелері бойынша мыс алу жылдамдығы 38-63%, мырыш 34-58% және темір 19-43% аралығында болды.

Балқаш байыту фабрикасының қалдықтарын биологиялық шаймалау бойынша жүргізілген тәжірибелік зерттеулер нәтижесінде металдарды алу тиімділігі процестің технологиялық параметрлерінің жиынтығына айтарлықтай тәуелді екенін көрсетті. 4-кестеде мысты бөліп алу дәрежесінің жүргізілген 24 тәжірибесінің орташа диапазоны көрсетілген. нәтижелері бойынша мыс алу дәрежесі 38-63%, мырыш – 34-58%, ал темір – 19-43% аралығында өзгеретіні анықталды.

Кесте 4 – Процесс жағдайларына байланысты биосілтеме тиімділігі

Металл	Орташа экстракция диапазоны, %	Процесс сипаттамалары
Cu	38-63	Аэрация жеткіліксіз, pH ≥ 2.0
Zn	34-58	Орташа процесс жағдайлары
Фе	19-43	Оңтайлы параметрлер (pH 1,8–1,9, T ≈ 32 °C)

24 тәжірибе нәтижелері бойынша мысты бөліп алу дәрежесі 38-63%, мырыш – 34-58%, ал темір – 19-43% аралығында өзгеретіні анықталды. Тәжірибелік деректерді талдау (4-кесте) металды қалпына келтірудің жоғарылауына pH мәнін 1,8-ге дейін төмендету, температураны 32°C-қа дейін көтеру және аэрацияны және инокулят үлесін (7-10%) арттыру арқылы қол жеткізілетінін көрсетеді. Бұл ацидофильді микроорганизмдердің белсенділігіне байланысты: *Acidithiobacillus ferrooxidans* Fe^{2+}*-ны* Fe^{3+}- ға дейін тотықтырады, ол сульфидті минералдардың негізгі тотықтырғышы ретінде әрекет етеді және Cu мен Zn-нің еруін қамтамасыз етеді.

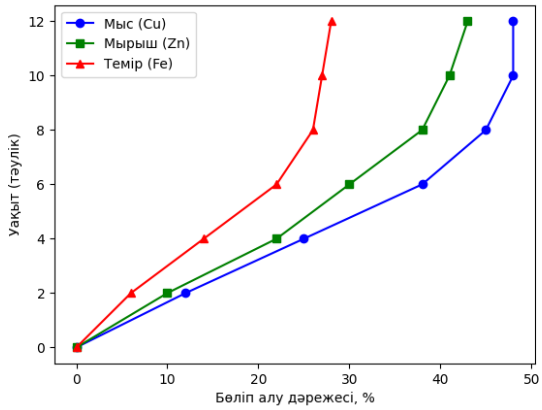
Сонымен қатар, *A. thiooxidans* күкіртті күкірт қышқылына дейін тотықтырады, pH төмен деңгейін сақтайды және бөлшектер бетінің пассивтенуіне жол бермейді. Температура мен аэрацияның жоғарылауы Fe^{2+} /Fe^{3+} жүйесіндегі тотығу-тотықсыздану процестерін жеделдетеді , бұл Eh жоғарылауына және шаймалаудың күшеюіне әкеледі.

Пульпа тығыздығы екіжақты әсер етеді: 12-15 % кезінде металдардың қолжетімділігі артады, алайда массаалмасу нашарлайды. Ең жоғары бөліп алу көрсеткіштері (Cu – 63%, Zn – 58%, Fe – 43%) биологиялық белсенділігі жоғары жағдайларда, әсіресе № 16 тәжірибеде айқын байқалды.

Керісінше, жұмсақ жағдайларда (pH ≥ 2,0, температура ≤ 28-29 °C, аэрация төмен және инокулюм 5 %) процестің тиімділігі айтарлықтай төмендейді: Cu алу 38-45 %-дан аспайды, Zn – 34-40%, Fe – 19-25%. Бұл ортаның қышқылдығы мен биологиялық тотығу қарқындылығының шешуші рөл атқаратынын көрсетеді.

Процестің тиімділігіне технологиялық параметрлердің әсерін талдау үшін базалық ретінде барлық өзгермелі факторлардың орташа мәндерімен сипатталатын № 5 тәжірибе таңдалды (пульпа тығыздығы 12%, pH = 1,9, температура 30 °C, ауа шығыны 0,7 л/мин, инокулюм 7 %). Бұл режим биологиялық шаймалау үдерісінің типтік жағдайларын көрсетеді және репрезентативті деп қарастырылуы мүмкін, өйткені алынған Cu, Zn және Fe шығару мәндері тәжірибелер сериясы бойынша орташа көрсеткіштерге жақын.

Процесті күшейтудің әсерін бағалау үшін бастапқы режим (№ 5 жұмыс) мен мәжбүрлі режим (№ 16 жұмыс) арасында салыстыру жүргізілді, бұл микробтық белсенділік үшін қолайлы жағдайларды ұсынады. Осы жағдайларда металл алудың салыстырмалы талдауы тиісті диаграммада айқын көрсетілгендей, биологиялық шаймалау тиімділігінің артуына негізгі параметрлердің (pH, температура, аэрация және инокулят концентрациясы) қосқан үлесін көрсетеді. 4-суретте биологиялық шаймалау кезінде (№5 жұмыс) ерітіндіде уақыт өте келе Cu, Zn және Fe жиналуы көрсетілген. Биологиялық шаймалау (№5 тәжірибе) Тәжірибелер әртүрлі негізгі процесс параметрлерімен жүргізілді: пульпа тығыздығы (10-15%), pH (1,8-2,0), температура (28-32°C) және ауа ағыны (0,5-1,0 л/мин). Инокулят фракциясы 5-10% құрады, ал эксперименттер 10-14 күнге созылды. Таңдалған жағдайлар әртүрлі режимдерді қамтиды, бұл бізге процесс факторларының металл алу тиімділігіне әсерін бағалауға мүмкіндік береді.



Сурет 4 – Уақытқа бөліп алу дәрежесінің тәуелділік графигі

Fe^{2+} және күкірт құрамдас қосылыстардың микробиологиялық тотығуының белсенді фазасынан туындаған Cu, Zn және Fe концентрацияларының тез артуы тіркеледі, содан кейін минералданған матрицаның бұзылуы орын алады. 10 күннен кейін Cu концентрациясы ≈155 мг/л деңгейінде тұрақтанады, бұл оңай еритін фазалардың сарқылуын және диффузиямен шектелген режимге өтуді көрсетеді. Cu-тан айырмашылығы, Zn және Fe концентрациялары тәжірибе аяқталғанға дейін (сәйкесінше 376,7 және 705,6 мг/л дейін) артады, бірақ жинақталу жылдамдығы айтарлықтай төмендейді.

5-кестеде әртүрлі биологиялық шаймалау режимдерінде (№ 5 және № 16 тәжірибелер) Cu, Zn және Fe экстракциялау дәрежесінің салыстырмалы көрсеткіштері көрсетілген.

Кесте 5 – Әртүрлі биологиялық шаймалау режимдері кезінде металдарды алудың салыстырмалы тиімділігі

Металл	№ 5 тәжірибе (негізгі режим), %	№ 16 тәжірибе (қарқынды режим), %
Cu	48	63
Zn	43	58
Фе	28	43

Орташа жағдайлардан (№ 5 тәжірибе) күшейтілген жағдайларға (№ 16 тәжірибе) ауысу зерттелген барлық металдардың экстракция жылдамдығының артуымен қатар жүрді. Cu үшін жылдамдық 48-ден 63%-ға дейін, Zn үшін 43-тен 58%-ға дейін және Fe үшін 28-ден 43%-ға дейін өсті. Бұл байқалған әсер ортаның тотығу-тотықсыздану потенциалының артуына және температураның, аэрация қарқындылығының және инокулят фракциясының жоғарылауымен микробиологиялық тотығу процестерінің жеделдеуіне байланысты.

Биологиялық шаймалау кезінде Cu және Zn-нің қалпына келуі олардың минералогиялық формасымен және еру механизмдерімен анықталады. Мыс негізінен сульфидті фазаларда болады, оның еруі Fe^{3+} қатысатын тотығу механизмімен басқарылады, бұл жоғары Eh және ацидофильді микроорганизмдердің жоғары белсенділігін қажет етеді. Сондықтан Cu-ның қалпына келуі температураға, pH-ға, аэрацияға және инокулят концентрациясына сезімтал.

Ал мырыш, керісінше, негізінен мобильді формалардың қышқылдық еруі арқылы сілтісізденеді және тотығу потенциалына аз тәуелді. Оның қалпына келуі төмен pH деңгейін сақтау арқылы анықталады және pH жоғарылауымен және пульпа тығыздығы артуымен ықтимал тұнбамен шектеледі. Оңтайлы жағдайларда мысты қалпына келтіру 60-63%-ға дейін және мырышты қалпына келтіру 55-58%-ға дейін жетеді.

Темір ерітіндіге Fe^{2+}-ден Fe^{3+}-ге микробтық тотығу арқылы да енеді , бірақ нысана компоненті емес. Оның артық жиналуы жағымсыз, себебі ол беттік пассивацияны тудыруы және түсті металдардың бөлінуін нашарлатуы мүмкін. Fe ең жоғары мәндері (≈40-43%) күшейтілген жағдайларда байқалады, ал жұмсақ жағдайларда оның концентрациясы төмен, бұл технологиялық тұрғыдан тиімдірек.

Алынған нәтижелер Балқаш байыту фабрикасының қалдықтары үшін биологиялық шаймалау процесінің негізгі технологиялық параметрлерге жоғары сезімталдығын көрсетеді. Оңтайлы жағдайларда (pH 1,8-1,9; температура 31-32°C; аэрация 0,9-1,0 л/мин; инокулят 8-10%; пульпа тығыздығы 12-15%), максималды экстракция жылдамдығына қол жеткізіледі: Cu – 60-63%, Zn – 55-58%, Fe – 40-43%. Жұмсақ жағдайларға ауысқанда (pH ≥ 2,0; температура ≤ 29 °C; аэрация мен инокуляттың шамамен 5% төмендеуі), процестің тиімділігі айтарлықтай төмендейді, ал қалпына келтіру Cu үшін 38-48%, Zn үшін 34-43% және Fe үшін 19-28% құрайды.

Қорытынды

Жүргізілген зерттеулер нәтижесінде Балқаш байыту зауытының байыту қалдықтары, олардың құрамындағы Cu ≈ 0,3%, Zn ≈ 0,7% және күрделі минералогияға қарамастан, түсті металдарды өндірудің перспективалы нысаны болып табылатыны анықталды.

Өңдеу тиімділігі шикізатты дайындау кезеңіне айтарлықтай байланысты екені көрсетілген. Ұнтақтау параметрлерін оңтайландыру бөлшектердің өлшемін 57 микронға дейін азайтуға мүмкіндік береді, бұл реактивті беттік ауданды арттырады және шаймалау процестерін күшейтеді.

Микрофлюидті бөлу бөлшектердің селективті таралуын және орталық ағындағы мыс концентрациясын 0,52-0,58%-ға дейін, қалпына келтіруді 70-75%-ға дейін қамтамасыз ететіні анықталды. Биологиялық шаймалау процесс параметрлеріне жоғары сезімталдық көрсетті: оңтайлы жағдайларда мысты қалпына келтіру 60-63%, мырышты 55-58% және темірді 40-43% деңгейінде жүзеге асырылды.

Осылайша, ұсынылған тәсілдер, микрофлюидтік бөлу және биологиялық шаймалау, металды бөліп алудың тиімділігін арттырады және қоршаған ортаға түсетін ауыртпалықты азайта отырып, жасанды қалдықтарды өңдеу үшін ұсынылуы мүмкін.

Әдебиеттер тізімі

1. Lottermoser B.G. Mine Wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts / B.G. Lottermoser // Springer, Berlin. – 2010. https://doi.org/10.1007/978-3-642-12419-8
2. A review of circular economy strategies for mine tailings / K. Paivi et al // Cleaner Engineering and Technology. – 2022. – № 8. – P. 100499. https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100499.
3. Cacciuttolo C. Socio-Environmental Risks Linked with Mine Tailings Chemical Composition: Promoting Responsible and Safe Mine Tailings Management Considering Copper and Gold Mining Experiences from Chile and Peru / C. Cacciuttolo, D. Cano, M. Custodio // Toxics. – 2023. – № 11(5). – P. 462. https://doi.org/10.3390/toxics11050462.
4. Peeyush P. A scientometrics study of advancing sustainable metal recovery from e-waste: processes, challenges, and future directions / P. Peeyush, K. Sushil, Meher Wan // RSC Sustainability. – 2025. – № 3. – P. 2434-2454. https://doi.org/10.1039/d5su00049a.
5. Unveiling the Bioleaching Versatility of Acidithiobacillus ferrooxidans / L. Tonietti et al // Microorganisms. – 2024. – № 12(12). – P. 2407. https://doi.org/10.3390/microorganisms12122407.
6. Johnson D.B. Biomining-biotechnologies for extracting and recovering metals from ores and waste materials / D.B. Johnson // Current Opinion in Biotechnology. – 2014. – P. 24-31. https://doi.org/10.1016/j.copbio.2014.04.008.
7. Current scenario of chalcopyrite bioleaching: A review on the recent advances to its heap-leach technology / S. Panda et al // Bioresource Technology Reports. – 2015. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.064.
8. Bioleaching Modeling – A Review / M. Saldaña et al // Materials. – 2023. – № 16. – P. 3812. https://doi.org/10.3390/ma16103812.

9. Recovery of Secondary Metals and Concrete Modification from Recycled PC Electronic Waste / N. Kulenova et al // Recycling. – 2026. – № 11. – P. 39. https://doi.org/10.3390/recycling11020039.
10. Environmental Impact Variability of Copper Tailing Dumps in Fushe Arrez (Northern Albania): The Role of Pyrite Separation during Flotation / G. Grieco et al // Sustainability. – 2021. – № 13. – P. 9643. https://doi.org/10.3390/su13179643.
11. Gümüşsoy A. Economic potential and environmental impact of metal recovery from copper slag flotation tailings / A. Gümüşsoy, M. Başyiğit, E.U. Kart // Resources Policy. – 2023. – Т. 80. – P. 103232. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.103232.
12. The Challenges and Prospects of Recovering Fine Copper Sulfides from Tailings Using Different Flotation Techniques: A Review / M. Bilal et al // Minerals. – 2022. – № 12. – P. 586. https://doi.org/10.3390/min12050586.
13. Song W. Mine-on-a-chip: megascale opportunities for microfluidics in critical materials and minerals recovery / W. Song // Lab on a Chip. – 2025. – Т. 25, № 18. – P. 4461-4472. https://doi.org/10.1039/D5LC00387C.
14. Critical elements: opportunities for microfluidic processing and potential for ESG-powered mining investments / T.N.Q. Le et al // Green Chemistry. – 2022. – Т. 24, № 23. – P. 8879-8898. https://doi.org/10.1039/D2GC02214A.
15. Size-based separation of fine mineral particles using inertial microfluidics: A case of jarosite and anglesite / X. Liu et al // Chemical Engineering Journal. – 2024. – Т. 500. – P. 157509. https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.157509.
16. Production of high purity silica by microfluidic-inclusion fracture using microwave pre-treatment / A.J. Buttress et al // Minerals Engineering. – 2019. – Т. 131. – P. 407-419. https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2019MiEng.131..407B/doi:10.1016/j.mineng.2018.11.025.

Қаржыландыру

Жұмыс BR28712667 «Қоршаған ортаға әсерді азайту және тиімділікті арттыру үшін тау-кен металлургия өнеркәсібінің өндірістік қалдықтарын өңдеудің инновациялық технологияларын дамыту» жоба аясында орындалды.

Р.Н. Ажигулова[1,2], Б.Х. Мусабаева[3], А.К. Жусупова[1,2], А. Темирова[1], А. Абылайхан[1,2*]
[1]Институт проблем горения,
Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Богенбай батыра, 172
[2]Казахский национальный университет имени аль-Фараби,
050040, Республика Казахстан, Алматы, пр. Аль-Фараби, 71
[3]Международный университет Астана,
Республика Казахстан, г. Астана, проспект Кабанбай батыра, 8
*e-mail: akerkeabylaikhan2@gmail.com

ПЕРЕРАБОТКА ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА МЕТОДОМ БИОВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ

В работе рассмотрены техногенные отходы горно-металлургического комплекса Республики Казахстан как перспективный вторичный источник цветных и редких металлов. Объектом исследования являлись хвосты обогащения медных руд Балхашской обогатительной фабрики (ОФ), характеризующиеся силикатной матрицей (Si ≈ 36 %) и наличием остаточных количеств Cu (≈0,32 %) и Zn (≈0,77 %). Проведён комплексный анализ их химического, гранулометрического и физико-химического состава с использованием метода ICP-OES. Изучены процессы подготовки сырья, дробление, измельчение и классификацию, а также выполнена оптимизация режимов измельчения. Показано, что уменьшение размера частиц до <40 мкм является критическим фактором повышения эффективности выщелачивания. Предложена интегрированная технология переработки, включающая микрофлюидное разделение и биовыщелачивание. Установлено, что микрофлюидное разделение обеспечивает селективное концентрирование меди до 0,52-0,58 % в целевой фракции при извлечении 70-75 %. Биовыщелачивание при оптимальных условиях (pH 1,8-1,9; T ≈ 31-32 °C) обеспечивает извлечение Cu до 60-63 %, Zn – до 55-58 %. Полученные результаты подтверждают перспективность применения процесса биовыщелачивание для комплексной переработки техногенных отходов и снижения их экологической нагрузки.

Ключевые слова: *техногенные отходы, биовыщелачивание, измельчение, микрофлюидное разделение, металлы.*

R.N. Azhigulova[1,2], B.X. Musabayeva[3], A.K. Zhusupova[1,2], A. Temirova[1], A. Abylaikhan[1,2]*
[1]Institute of Combustion Problems,
Republic of Kazakhstan, Almaty, Bogenbai Batyr St., 172
[2]Al-Farabi Kazakh National University,
050040, Republic of Kazakhstan, Almaty, Al-Farabi, 71
[3]Astana International University,
Republic of Kazakhstan, Astana, Kabanbai Batyr, 8
*e-mail: akerkeabylaikhan2@gmail.com

PROCESSING OF TECHNOGENIC WASTE FROM THE MINING AND METALLURGICAL COMPLEX BY BIOLEACHING

The study considers technogenic waste from the mining and metallurgical complex of the Republic of Kazakhstan as a promising secondary source of non-ferrous and rare metals. The object of investigation was copper ore tailings from the Balkhash Concentration Plant, characterized by a silicate matrix (Si ≈ 36%) and the presence of residual amounts of Cu (≈0.32%) and Zn (≈0.77%). A comprehensive analysis of their chemical, granulometric, and physicochemical composition was carried out using the ICP-OES method. The processes of raw material preparation, including crushing, grinding, and classification, were studied, and the grinding conditions were optimized. It was shown that reducing the particle size to <40 μm is a critical factor for enhancing leaching efficiency. An integrated processing technology combining microfluidic separation and bioleaching is proposed. It was established that microfluidic separation provides selective concentration of copper up to 0.52-0.58% in the target fraction with a recovery of 70-75%. Bioleaching under optimal conditions (pH 1.8-1.9; T ≈ 31-32 °C) ensures copper recovery up to 60-63% and zinc recovery up to 55-58%. The obtained results confirm the potential of bioleaching for the integrated processing of technogenic waste and the reduction of its environmental impact.

Key words: *technogenic waste, bioleaching, grinding, microfluidic separation, metals.*

Авторлар туралы мәліметтер

Рыскуль Ниниловна Ажигулова – х.ғ.к., Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ физикалық химия, катализ және мұнайхимия кафедрасының аға оқытушысы; e-mail: azhigulova.ryskul@kaznu.kz. ORCID: https://orcid.org/ 0000-0003-4498-8439 .

Бинур Хабасовна Мусабаева – х.ғ.к., профессор, Астана Халықаралық университеті, e-mail: mussabayevabinur@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2209-1209.

Айсулу Каиргельдиновна Жусупова – х.ғ.к., физикалық химия, катализ және мұнайхимия кафедрасының қауымдастырылған профессоры; e-mail: Zh.aisulu@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3012-0145.

Айман Темирова – PhD, Жану проблемалары институты жетекші ғылыми қызметкері; e-mail: aika179@mail.ru.

Ақерке Абылайхан* – х.ғ.к., Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ Жаңа химиялық технологиялар мен материалдар ғылыми-зерттеу институты жетекші ғылыми қызметкері; e-mail: akerkeabylaikhan2@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1489-9603.

Сведения об авторах

Рыскуль Ниниловна Ажигулова – к.х.н., старший преподаватель кафедры физической химии, катализа и нефтехимии КазНУ им. аль-Фараби; e-mail: azhigulova.ryskul@kaznu.kz. ORCID: https://orcid.org/ 0000-0003-4498-8439 .

Бинур Хабасовна Мусабаева – к.х.н., профессор, Международный университет Астана; e-mail: mussabayevabinur@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2209-1209.

Айсулу Каиргельдиновна Жусупова – х.ғ.к., физикалық химия, катализ және мұнайхимия кафедрасының қауымдастырылған профессоры; e-mail: Zh.aisulu@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3012-0145.

Айман Темирова – PhD, Жану проблемалары институты жетекші ғылыми қызметкері; e-mail: aika179@mail.ru.

Акерке Абылайхан* – к.х.н., ведущий научный сотрудник научно-исследовательского института новых химических технологий и материалов КазНУ им. аль-Фараби; e-mail: akerkeabylaikhan2@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1489-9603.

Information about the authors

Ryskul Azhigulova – PhD, Senior Lecturer at the Department of Physical Chemistry, Catalysis and Petrochemistry, Al-Farabi Kazakh National University; e-mail: azhigulova.ryskul@kaznu.kz. ORCID: https://orcid.org/ 0000-0003-4498-8439 .

Binur Mussabayeva – PhD, Professor, Astana International University; e-mail: mussabayevabinur@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2209-1209.

Aisulu Zhussupova – PhD, Associate Professor at the Department of Physical Chemistry, Catalysis and Petrochemistry, Al-Farabi Kazakh National University; e-mail: Zh.aisulu@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3012-0145.

Aiman Temirova – PhD, Leading Researcher at Institute of Combustion Problems; e-mail: aika179@mail.ru.

Akerke Abylaykhan* – PhD, Leading Researcher at Scientific Research Institute for New Chemical Technologies and Materials at Al-Farabi KazNU; e-mail: akerkeabylaikhan2@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1489-9603.

Редакцияға енуі 02.04.2026
Өңдеуден кейін түсуі 30.04.2026
Жариялауға қабылданды 04.05.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-73

МРНТИ: 61.53.19, 61.45.31, 87.15.09

А.Н. Сабитова, Ж.Ш. Шарипхан, Б.Б. Баяхметова, Ә.Қ. Қабылқақов, Н.Н. Нургалиев*
Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, Семей, ул.Глинки, 20
*e-mail: n.nurgaliyev@shakarim.kz

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЧИСТКИ И УТИЛИЗАЦИИ ОТРАБОТАННЫХ МОТОРНЫХ МАСЕЛ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕНТОНИТОВЫХ СОРБЕНТОВ

Аннотация: *В работе рассмотрены современные подходы к регенерации масел, включая физические, химические и сорбционные методы, и обоснован выбор адсорбционной очистки как экологически безопасной и технологически простой альтернативы. Разработан эффективный метод очистки и утилизации отработанных моторных масел с использованием природных и модифицированных бентонитовых сорбентов. Объектами исследования являлись отработанное моторное масло KIXX 10W-40, бентониты П1Т1А и «13 горизонт», а также их модифицированные формы, полученные методами кислотной и перекисной активации. Экспериментальные исследования проводились с применением вакуумной маслоочистительной установки и сорбционной фильтрации. Для оценки эффективности очистки использованы методы FTIR-спектроскопии, термогравиметрического анализа (TGA) и ICP-MS.Результаты показали значительное снижение содержания воды, продуктов окисления, серосодержащих соединений и металлических примесей. Наибольшая эффективность достигнута при использовании модифицированного бентонита П1Т1А, обеспечивающего максимальное снижение концентрации загрязнений. Установлено, что модификация повышает удельную поверхность и сорбционную ёмкость, что способствует более эффективному протеканию процессов адсорбции. Предложенный метод отличается простотой реализации, экономичностью и возможностью масштабирования. Он не образует вторичных токсичных отходов и пригоден для промышленного внедрения, обеспечивая снижение экологической нагрузки.*

Ключевые слова: *отработанные моторные масла, бентонитовые сорбенты, сорбционная очистка, регенерация масел, модифицированные глины, вакуумная дегазация, экологическая безопасность.*

Введение

Проведён анализ современных направлений в области очистки и утилизации отработанных моторных масел, а также обоснован выбор эффективного метода регенерации

©А.Н. Сабитова, Ж.Ш. Шарипхан, Б.Б. Баяхметова, Ә.Қ. Қабылқақов, Н.Н. Нургалиев, 2026

с использованием бентонитовых сорбентов. Рассмотрены существующие технологии, представлены методические подходы и результаты применения модифицированных глинистых материалов для повышения степени очистки.

Обзор и обоснование выбора подхода

Отработанные моторные масла представляют собой значительный экологический риск, поскольку образуются в больших объёмах и содержат широкий спектр токсичных компонентов. В их составе накапливаются продукты разложения присадок, включая соединения тяжёлых металлов (Zn, Pb и др.), а также устойчивые органические загрязнители – полициклические ароматические углеводороды, фенолы и хлорорганические соединения. Эти вещества обладают высокой токсичностью, включая канцерогенные и мутагенные свойства, и характеризуются низкой биодеградацией.

Попадание отработанных масел в окружающую среду приводит к длительному загрязнению почвы и водных объектов. Даже незначительные количества способны формировать устойчивую плёнку на поверхности воды, нарушая естественные процессы газообмена и функционирование экосистем. В связи с этим разработка эффективных методов их переработки и повторного использования является актуальной задачей.

Существующие технологии регенерации отработанных масел включают физические, химические и комбинированные методы. К физическим методам относятся отстаивание, фильтрация, центрифугирование и вакуумная дегазация, позволяющие удалять воду и механические примеси. Однако данные методы недостаточно эффективны в отношении растворённых органических соединений.

Химические методы, такие как кислотная и щелочная обработка, экстракция растворителями и гидрогенизация, обеспечивают более глубокую очистку, однако сопровождаются образованием вторичных загрязняющих отходов, высокой энергоёмкостью и значительными затратами реагентов. В современных технологических схемах часто используется комбинация нескольких стадий очистки.

В связи с ограничениями традиционных подходов возрастает интерес к сорбционным технологиям, основанным на применении природных и модифицированных материалов. Эти методы отличаются экологической безопасностью, экономической доступностью и высокой эффективностью удаления различных загрязнений.

Особое внимание уделяется бентонитовым глинам, содержащим монтмориллонит. Благодаря развитой пористой структуре, высокой удельной поверхности и ионообменным свойствам они способны эффективно адсорбировать полярные соединения, включая кислоты, влагу и ионы металлов.

Для повышения сорбционных характеристик применяются различные способы модификации бентонитов. Кислотная активация увеличивает площадь поверхности и пористость, органическая модификация повышает способность к адсорбции неполярных соединений, а введение магнитных компонентов упрощает процесс отделения сорбента.

Таким образом, использование модифицированных бентонитов является перспективным направлением в области регенерации отработанных масел, обеспечивающим эффективную очистку при минимальном воздействии на окружающую среду.

Выбор метода сорбционной очистки

В процессе разработки технологии очистки отработанных моторных масел были рассмотрены различные методы, включая физические, химические и физико-химические подходы. Физические методы позволяют эффективно удалять воду и механические загрязнения, однако не обеспечивают устранения растворённых органических веществ и продуктов окисления.

Химические методы характеризуются высокой степенью очистки, но сопровождаются образованием вторичных отходов и требуют значительных затрат реагентов и энергии.

С учётом необходимости повышения экологической безопасности и упрощения технологического процесса в данной работе был выбран сорбционный метод очистки с использованием бентонитовых материалов. Данный подход отличается простотой реализации, низкой энергоёмкостью, возможностью повторного использования сорбента и отсутствием образования токсичных побочных продуктов.

В качестве сорбентов применялись бентониты марок П1Т1А и «Горизонт 13», относящиеся к монтмориллонитовому типу. Для повышения их эффективности использовались методы химической модификации, включая кислотную активацию и

обработку пероксидом водорода. Эти методы способствуют увеличению удельной поверхности, развитию пористой структуры и формированию дополнительных активных центров.

Применение модифицированных бентонитов обеспечивает эффективное удаление как полярных функциональных групп (O-H, C=O, S=O), так и неполярных углеводородных соединений, что способствует восстановлению эксплуатационных характеристик очищаемых масел.

Объекты исследования

В качестве объекта исследования использовалось отработанное моторное масло марки KIXX 10W-40 (SAE 10W-40, API SL/CF), представляющее собой полусинтетическое масло на основе минеральных базовых компонентов с добавлением комплекса функциональных присадок. Данный тип масла широко применяется в двигателях внутреннего сгорания и характеризуется кинематической вязкостью порядка 15 мм²/с при 100°C и температурой вспышки около 246°C.

В качестве сорбционных материалов использовались природные бентонитовые глины марок П1Т1А и «Горизонт 13». Согласно данным инфракрасной спектроскопии, оба образца относятся к монтмориллонитовому типу. Их спектры характеризуются наличием полос валентных колебаний гидроксильных групп (3600-3200 $см^{-1}$), а также полос Si-O (1030, 915, 520 $см^{-1}$), характерных для структуры бентонита.

Для сравнительного анализа исследовались как исходные, так и модифицированные формы сорбентов. Кислотная активация (обработка растворами серной или соляной кислоты) приводит к увеличению удельной поверхности и формированию развитой мезопористой структуры. Обработка пероксидом водорода способствует окислению примесей и улучшению гидрофильных свойств, что в целом повышает эффективность адсорбции загрязняющих веществ.

Экспериментальная часть

Очистка масла проводилась с использованием многофункциональной вакуумной маслоочистительной установки (рис. 1). Принцип её работы основан на различии температур кипения воды и масла: при понижении давления до вакуумного состояния вода закипает при более низкой температуре, тогда как масло сохраняет жидкую фазу.



Рисунок 1 – Вакуумный маслоочиститель

В состав установки входят масляный насос, нагревательный блок (камера подогрева), вакуумная распылительная камера, конденсатор, а также фильтры грубой и тонкой очистки. Рабочий процесс организован следующим образом: масло из резервуара с помощью насоса проходит через фильтр грубой очистки и поступает в нагреватель. При создании разрежения (~40-50 кПа) подогретое до 40-75°C масло подается в вакуумную камеру, где распыляется. В этих условиях содержащаяся в масле вода и растворённые газы интенсивно испаряются и удаляются вакуумным насосом в конденсатор, где пары охлаждаются и переходят обратно в жидкое состояние.

После этого очищенное и обезвоженное масло проходит через фильтр тонкой очистки и возвращается в систему под давлением. Таким образом обеспечивается удаление механических примесей, влаги и газов. Существенным преимуществом вакуумной технологии

является возможность проведения процесса при сравнительно низких температурах (20-60°C при остаточном давлении 160-260 мм рт. ст.), что позволяет снизить риск термического разложения масла.

Все элементы установки, включая насосы, фильтры, конденсатор и систему управления, объединены в единую циркуляционную схему, обеспечивающую непрерывную рециркуляцию масла через зоны вакуумной дегазации и адсорбционной очистки.

Процедура сорбционной фильтрации

Отработанное масло предварительно нагревали до температуры 80-120°C с целью снижения вязкости и повышения активности адсорбента. Затем в цилиндрическую ёмкость, содержащую 500 мл масла, вводили рассчитанное количество бентонита (как правило, 2-7 % от объёма масла). Полученную смесь выдерживали при постоянной температуре (например, 120°C) при непрерывном перемешивании либо в режиме рециркуляции в течение 1-2 часов.

После стадии контакта проводили разделение фаз: нагретую суспензию помещали в центрифугу и обрабатывали при скорости около 3000 об/мин в течение примерно 10 минут (при ~80°C), что обеспечивало осаждение бентонита с адсорбированными загрязнениями. Очищенное масло отделяли методом декантации, после чего дополнительно фильтровали через плотный тканевый или стекловолоконный фильтр при температуре около 80°C для удаления остаточных взвешенных частиц.

Для оценки эффективности очистки фиксировали объём и степень прозрачности полученного масла. В качестве контрольного эксперимента исходное масло также пропускали через фильтр при аналогичных условиях.

Материалы и методы

FTIR-анализ

Для исследования химического состава применяли метод инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье (FTIR). Спектры бентонитовых образцов (в виде порошка или таблеток с KBr), а также образцов масла регистрировали на ИК-Фурье-спектрометре (например, PerkinElmer или Bruker) в диапазоне 4000-400 $см^{-1}$ с разрешением порядка 4 $см^{-1}$ (при 64 накоплениях).

Подготовка проб бентонита осуществлялась либо прессованием с KBr, либо методом ATR (нанесение порошка на алмазный кристалл). Образцы масла анализировали в тонкослойных кюветах либо в смеси с порошком KBr. Использование детекторов типа DTGS или MCT обеспечивало регистрацию даже слабых полос поглощения.

Выбранный спектральный диапазон позволяет фиксировать основные колебательные полосы функциональных групп (O-H, C-H, C=O, Si-O и др.), что делает метод чувствительным к изменениям структуры вещества после очистки.

Термогравиметрический анализ (TGA)

Термогравиметрические исследования природных и модифицированных бентонитов, а также образцов масла проводили с использованием термоанализатора (например, TA Instruments или Netzsch STA). Нагрев осуществляли от комнатной температуры до ~1000°C в атмосфере азота или воздуха (чаще N 2) со скоростью около 10 °C/мин.

Такие условия позволяют отслеживать последовательные стадии потери массы: удаление адсорбционной влаги (до~200°C), межслойной воды, процессы дегидроксилирования (300-600°C), а также разложение органических компонентов. Масса образцов составляла 10-20 мг, измерения проводили с точностью до 0,1 мг. При необходимости дополнительно регистрировали состав выделяющихся газов.

Полученные TG/DTG-кривые использовали для оценки термической устойчивости, степени гидратации бентонитов и содержания летучих компонентов в масле.

Элементный анализ (EDS)

Определение элементного состава осуществляли методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии в сочетании с растровой электронной микроскопией. Объектами анализа служили частицы бентонита после взаимодействия с маслом, а также остатки масла, нанесённые на подложку.

Под действием электронного пучка регистрировали характеристическое рентгеновское излучение, по энергии которого идентифицировали элементы (Al, Si, Fe, Ca и др.), а по интенсивности – оценивали их относительное содержание. Метод позволяет анализировать микроскопические объёмы вещества (порядка нескольких $мкм^3$).

Данный подход использовали для контроля удаления металлических примесей (Fe, Cu, Cr и др.) из отработанного масла, их переноса на поверхность бентонита, а также выявления возможных загрязнений, связанных с самим адсорбентом.

Результаты и обсуждение

Характеристика сорбентов

Природные бентониты (например, образцы П1Т1А и «13 горизонт») представляют собой тонкодисперсные глинистые материалы, относящиеся преимущественно к смектитовой группе минералов, где основным компонентом является монтмориллонит. Эти материалы характеризуются однородной мягкой структурой, пластичностью и способностью к значительному набуханию при взаимодействии с водой.

Цвет бентонитов обычно варьируется от светло-серого до бежевого, однако наличие примесей оксидов железа может придавать им зеленоватые или красноватые оттенки.

К основным физическим характеристикам относятся: плотность в пределах 2,0-2,7 г/см³, крайне малый размер частиц (часто менее 1-2 мкм), высокая удельная поверхность (более 100-200 м^2/г), а также способность удерживать значительное количество влаги (до 10-40%).

Совокупность этих свойств определяет высокую ионообменную и адсорбционную активность бентонитов.

FTIR-анализ

На рисунке 2 приведены ИК-спектры природных бентонитов демонстрируют характерные полосы поглощения, соответствующие основным функциональным группам. В частности, интенсивные полосы в области 3620-3650 см$^{-1}$ связаны с валентными колебаниями гидроксильных групп (Al-Al-OH, Al-Mg-OH) в структуре минерала.

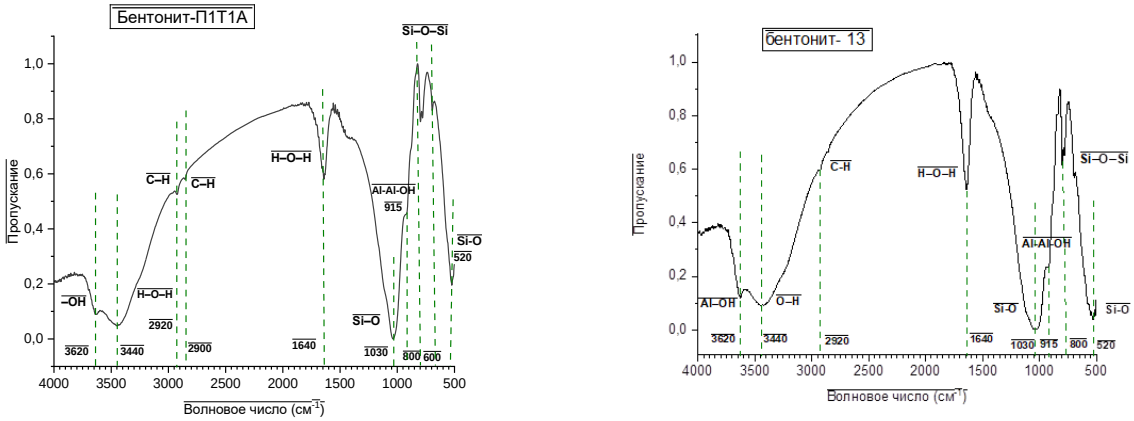


Рисунок 2 – ИК спектр бентонитов

Полоса около 1630-1635 см$^{-1}$ обусловлена деформационными колебаниями молекул воды в межслоевом пространстве. Сильный пик в диапазоне 980-1000 см$^{-1}$ относится к колебаниям связей Si-O-Si в кремнекислородных тетраэдрах. Дополнительно наблюдаются полосы около 908 см$^{-1}$ (Al-Al-OH) и ~700 см$^{-1}$ (Al-Mg-OH), а также низкочастотные колебания (600-500 см$^{-1}$), соответствующие связям Si-O-Al и Si-O-Mg.

После химической модификации (например, кислотной активации) отмечается снижение интенсивности полос, связанных с межслоевой водой (3420-3440 и 1630 см$^{-1}$), а также усиление сигналов в области 800-1000 см$^{-1}$, что свидетельствует о формировании аморфных кремнеземистых структур.

Сорбционная ёмкость

Сорбционная ёмкость сорбента (q) характеризует количество адсорбированного вещества (металлов или органических соединений), приходящееся на единицу массы сорбента. Данный параметр рассчитывается по выражению:

где C0 и Ce – начальная и равновесная концентрации вещества в растворе (мг/л),

V – объём раствора (л),

m – масса сорбента (г) [15].

Таким образом, сорбционная ёмкость выражается в мг адсорбированного вещества на 1 г сорбента. Установлено, что различные методы модификации, в частности кислотная активация и функционализация, способствуют увеличению данного показателя за счёт роста удельной поверхности и количества активных центров. По литературным данным, значение q после кислотной обработки может возрастать на 50-100 %.

Термогравиметрический анализ

Термогравиметрический анализ природных бентонитов (рис. 3) показывает наличие двух характерных стадий потери массы. Первая, низкотемпературная стадия связана с удалением адсорбированной и межслойной воды. В диапазоне температур до 100–150°C фиксируется снижение массы примерно на 8-12%, что обусловлено испарением связанной влаги [13, 14]. Вторая стадия обусловлена процессом дегидроксилирования структурной воды монтмориллонита. При нагревании в интервале 400-600 °C наблюдается дополнительная потеря массы порядка 4-6%, связанная с разложением гидроксильных групп [15, 16]. Указанные температурные интервалы и величины изменения массы хорошо согласуются с данными, представленными в научной литературе.

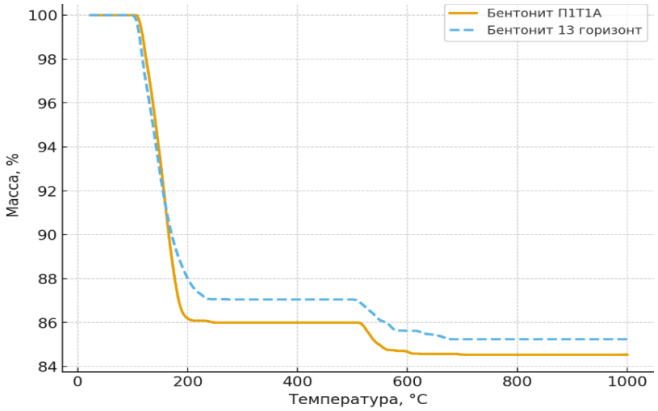


Рисунок 3 – ТГА анализ бентонитов

В качестве исходного образца использовалось моторное масло марки KIXX 10W-40. Образцы обозначены следующим образом:

Процесс очистки проводили при комнатной температуре при постоянном перемешивании. Соотношение масло: сорбент составляло примерно 10:1 по массе, а время контакта – 15-30 минут. Модифицированные сорбенты получали путём кислотной активации природных глин, что позволило повысить их адсорбционные свойства.

Таблица 1 – Сорбционная ёмкость бентонитов

Образец	V_1 (мл)	V_2 (мл)	Адсорбция, X (%)
Бентонит П1Т1А	7.85	7.05	10.16
Бентонит 13 горизонт	7.85	7.20	8.26

Процесс очистки осуществляли при комнатной температуре в условиях постоянного перемешивания. Массовое соотношение масло: сорбент составляло приблизительно 10:1, а продолжительность контакта находилась в пределах 15-30 минут. Модифицированные сорбенты получали путём кислотной активации природных глин с целью повышения их адсорбционной эффективности.

FTIR-анализ масел

На рисунке 4 представлены совмещённые инфракрасные спектры всех исследованных образцов масла. В спектрах отчётливо наблюдаются характерные полосы алифатических C-H связей (около 2920 и 2850 $см^{-1}$), полоса карбонильной группы (~1700 $см^{-1}$), обусловленная продуктами окисления углеводородов и компонентами присадок, широкая полоса O-H (~3400 $см^{-1}$), а также полоса S=O (1100-1150 $см^{-1}$), связанная с серосодержащими соединениями.

Наибольшая интенсивность всех указанных полос характерна для исходного масла (m0). После фильтрации наблюдается их постепенное снижение, наиболее выраженное при использовании бентонитовых сорбентов. В частности, значительное уменьшение полосы O-H свидетельствует об удалении влаги и кислородсодержащих соединений.

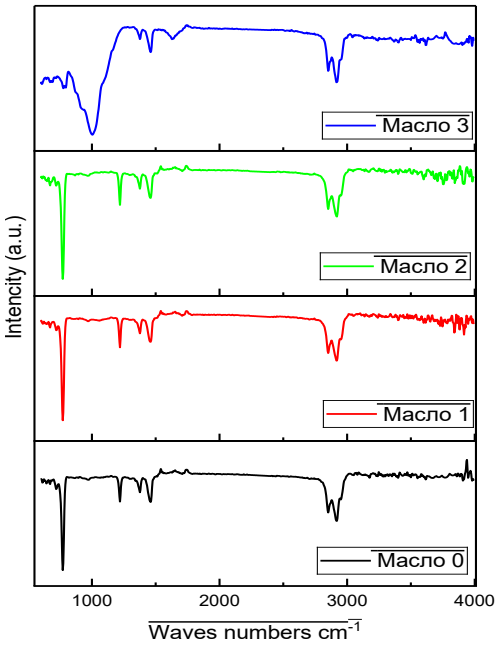


Рисунок 4 – ИК-спектры образцов моторных масел до и после фильтрации (m0-m3)

Аналогично, ослабление полос алифатических C-H (2922 и 2854 $см^{-1}$) указывает на снижение содержания органических примесей. Уменьшение интенсивности карбонильной полосы (~1700 $см^{-1}$) в образцах m2 и m3 подтверждает удаление продуктов окисления масла, таких как кислоты и кетоны.

Снижение интенсивности полос S=O (~1120-1180 $см^{-1}$) свидетельствует об эффективной адсорбции серосодержащих соединений. Кроме того, полосы, характерные для ароматических структур и лёгких углеводородов (в области 700-900 $см^{-1}$), после обработки бентонитами практически исчезают, что указывает на удаление топливных и ароматических примесей.

Сравнительный анализ показал, что бумажная фильтрация (m1) обеспечивает лишь частичное удаление механических загрязнений и практически не влияет на химический состав масла. В то же время обработка бентонитами (m2, m3) приводит к значительному снижению интенсивности большинства полос, что свидетельствует об эффективном удалении как механических, так и химических примесей.

Наиболее выраженный эффект наблюдается при использовании бентонита П1Т1А (m2), для которого зафиксировано максимальное ослабление ключевых полос поглощения. Бентонит «Глина 13» (m3) также демонстрирует заметный очищающий эффект, однако в меньшей степени.

В целом результаты FTIR-анализа подтверждают, что применение бентонитовых сорбентов значительно повышает эффективность регенерации отработанных масел за счёт удаления влаги, продуктов окисления, серосодержащих соединений и углеводородных примесей.

Элементный анализ масел

Определение элементного состава отработанных масел до и после очистки проводилось методом индуктивно-связанной плазменной масс-спектрометрии (ICP-MS) в соответствии с требованиями ГОСТ ISO 17294-2-2019. Аналитические исследования выполнялись в аккредитованной лаборатории ТОО «НИЦ EventumLab».

В анализ были включены следующие образцы: исходное отработанное масло (m0), масло после фильтрации через бумажный фильтр (m1), а также образцы, прошедшие обработку природными и модифицированными бентонитовыми сорбентами (m2-m5).

Результаты количественного определения концентраций ключевых элементов, характеризующих степень загрязнения масла продуктами износа, металлическими примесями и компонентами присадок, представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Содержание элементов в образцах масел до и после фильтрации, мг/кг (г/т)

Элемент	m0 (исх.)	m1 (ф.бумага)	m2 (П1Т1А)	m3 (13 гор.)	m4 (П1Т1А мод.)	m5 (13 гор. мод.)
Al	5000	23000	п/о	3300	21000	4500
Ca	47000	70000	п/о	2400	62000	53000
Cr	340	280	п/о	68	740	140
Cu	79	61	п/о	п/о	п/о	63
Fe	3200	4200	п/о	1900	5400	3600
K	1000	5700	п/о	150	3000	12000
Mg	1600	18000	п/о	700	2400	2200
Mn	<п.о.	18000	п/о	16	93	35
Na	4300	17000	п/о	1500	8900	12000
Zn	35000	58000	п/о	1300	23000	46000

Результаты ICP-MS анализа показали, что концентрации металлов (Fe, Cu, Cr, Zn), а также щелочноземельных элементов (Ca, Mg) существенно снижаются после проведения фильтрации, особенно при использовании бентонитовых сорбентов – как природных, так и модифицированных.

Так, содержание цинка, являющегося типичным компонентом антиокислительных и противоизносных присадок, в образце m3 уменьшается более чем в 25 раз, тогда как концентрация железа, связанного с процессами износа, снижается почти вдвое. В образце m2 концентрации всех исследуемых элементов оказались ниже предела обнаружения, что свидетельствует о высокой эффективности адсорбционных свойств сорбента П1Т1А.

Дополнительно зафиксировано снижение содержания натрия, калия и марганца, что указывает на удаление водорастворимых загрязнений, накопленных в процессе эксплуатации масла.

Полученные результаты согласуются с данными зарубежных исследований, согласно которым глинистые материалы характеризуются высокой сорбционной способностью по отношению к металлическим и органическим примесям, особенно после химической модификации. При этом элементный состав масла может рассматриваться как косвенный показатель степени износа двигателя и деградации смазочного материала, а его восстановление способствует снижению рисков при повторном использовании.

Сравнение эффективности сорбентов

Визуальная оценка показала существенные различия между исходным и очищенными образцами масла. После проведения адсорбционной обработки с использованием бентонитов наблюдается выраженное осветление и повышение прозрачности масла.

Наиболее заметный эффект достигнут для образца m4 (модифицированный П1Т1А), который характеризуется высокой степенью прозрачности и практически полным отсутствием видимых взвешенных частиц. Это свидетельствует о высокой эффективности данного сорбента в удалении как механических, так и коллоидных загрязнений.

В целом, применение бентонитовых материалов обеспечивает значительное улучшение оптических характеристик масла, что косвенно подтверждает его очистку от примесей.

Выводы

В рамках данного исследования была подтверждена эффективность использования природных и модифицированных бентонитов (П1Т1А и «13 горизонт») для очистки отработанных моторных масел марки KIXX 10W-40.

Проведённый комплекс исследований включал физико-химическую характеристику сорбентов (методы FTIR и TGA), оценку сорбционной ёмкости, а также анализ очищенных образцов масла с использованием инфракрасной спектроскопии и ICP-MS. Результаты FTIR-анализа показали значительное снижение интенсивности полос, соответствующих полярным соединениям и продуктам окисления (O-H, C=O, S=O), что свидетельствует об эффективном удалении влаги, кислотных соединений и смолистых компонентов, особенно при применении активированного бентонита П1Т1А. Термогравиметрический анализ подтвердил термическую стабильность исследуемых сорбентов и их пригодность для использования в условиях фильтрации.

Установлено, что модифицированные бентониты обладают более высокой сорбционной ёмкостью по сравнению с природными аналогами, что обусловлено увеличением удельной поверхности и числом активных центров. Результаты элементного анализа продемонстрировали существенное снижение концентраций металлов (Fe, Zn, Cr), щелочноземельных элементов (Ca, Mg) и других примесей после обработки масла. Наиболее высокую эффективность показал модифицированный сорбент П1Т1А, при использовании которого содержание большинства элементов снижалось до уровня ниже предела обнаружения.

Таким образом, разработанный подход к регенерации моторных масел с применением природных и активированных бентонитов позволяет значительно повысить степень очистки от воды, органических и неорганических загрязнений. Полученные результаты подтверждают перспективность внедрения сорбционно-фильтрационных технологий в процессы переработки и повторного использования технических масел.

Список литературы

1. Ассоциация «Ресурс». 2023. РЭО: лишь 25% от 2 млн тонн отработанных смазочных масел собирается для утилизации в России. https://reo.ru.
2. Vazquez-Duhalt R. Environmental impact of used motor oil / R. Vazquez-Duhalt // Science of the Total Environment. – 1989. – № 79(1). – P. 1-23. https://doi.org/10.1016/0048-9697(89)90049-1.
3. GlobeCore. (n.d.). Regeneration of used oil: reality and perspectives. Retrieved from https://globecore.com/publications/regeneration-used-oil/.
4. Advancing sustainable lubricating oil management: Re-refining techniques, market insights, innovative enhancements, and conversion to fuel / M.R.I. Sazzad et al // Heliyon. – 2024. – № 10(20). https://doi.org/ 10.1016/j.heliyon.2024.e39248.
5. European Commission. 2023. Technical report: Waste oils management in the EU (C.OM(2023) 670 final). https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52023DC0670.
6. Rajaković-Ognjanović V. Governing factors for motor oil removal from water with different sorption materials / V. Rajaković-Ognjanović, G. Aleksić, Lj. Rajaković // Journal of Hazardous Materials. – 2008. – № 154(1-3). – P. 558-563. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.10.066.
7. Enhanced removal of diesel oil using new magnetic bentonite-based adsorbents combined with different carbon sources / D. Ewis et al // Water, Air, & Soil Pollution. – 2022. – № 233, Article 195. https://doi.org/ 10.1007/s11270-022-05662-2.
8. Teneqja V. Activation of Kosovo bentonite with sulphuric acid for recycling of used motor oils / V. Teneqja, S. Drushku // Journal of International Environmental Application & Science. – 2015. – № 10(4). – P. 408-413. https://izlik.org/JA33PY39PX.
9. Syrmanova K.K. Chemistry and recycling technology of used motor oil / K.K. Syrmanova, A.Y. Kovaleva, Zh. Kaldybekova // Oriental Journal of Chemistry. – 2017. – № 33(6). – P. 3195-3199. https://doi.org/ 10.13005/ojc/330665.
10. Cheon Y. Effects of thermal treatment on bentonite stability and europium(III) leachability / Y. Cheon, S. Kim, H.Y. Jeong // Journal of Analytical Science and Technology. – 2025. – № 16(1). – P. 6. https://doi.org/10.1186/s40543-025-00645-2.
11. Unlocking the energy potential of Moroccan bentonite clay: structural, optical, and thermal insights for advanced applications / N.E. Ghoubali et al // Discover Applied Sciences. – 2025. – № 7. – P. 887. https://doi.org/10.1007/s42452-025-08787-2.
12. Removal of metal ions and humic acids through polyetherimide membrane with grafted bentonite clay / R.S. Hebbar et al // Scientific Reports. – 2018. – № 8(1). – P. 4939. https://doi.org/10.1038/s41598-018-23225-3.
13. Acid activation of bentonite clay for recycled automotive oil purification / J. Aguilar et al // E3S Web of Conferences. – 2020. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019103002.
14. Singh H. Regeneration of used lubricating oil by novel clay-based adsorbents: A comparative FTIR study / H. Singh, R. Gupta, A. Singh // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2022. https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.106987.
15. 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. – № 37(1). – P. 105. https://doi.org/10.1186/s12302-025-00798-4.
16. Removal of metal ions and humic acids through polyetherimide membrane with grafted bentonite clay / R.S. Hebbar et al // Scientific Reports. – 2018. – № 8(1). – P. 4939. https://doi.org/10.1038/s41598-018-23225-3.

17. Acid activation of bentonite clay for recycled automotive oil purification / J. Aguilar et al // E3S Web of Conferences. – 2020. – № 191. – P. 03002. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019103002.
18. Singh H. Regeneration of used lubricating oil by novel clay-based adsorbents: A comparative FTIR study / H. Singh, R. Gupta, A. Singh // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2022. – № 10(1). – P. 106987. https://doi.org/ 10.1016/j.jece.2022.106987.
19. Wolak A. FTIR analysis and monitoring of used synthetic oils operated under similar driving conditions / A. Wolak, W. Krasodomski, G. Zając // Friction. – 2020. – № 8. – P. 995-1006. https://doi.org/10.1007/s40544-020-0343-2.
20. Onukwuli O.D. Metal ions adsorption from used lubricating oil using modified clays / O.D. Onukwuli, L.N. Emembolu // Chemical Engineering Communications. – 2017. – № 204(9). – P. 1063-1073. https://doi.org/ 10.1080/00986445.2017.1281845.
21. Oliveira A.A. Adsorption of metals and organics from spent oils using peroxide-activated bentonites / A.A. Oliveira, M.L. da Silva, W.T.P. Dos Santos // Environmental Technology. – 2021. – № 42(1). – P. 82-92. https://doi.org/ 10.1080/09593330.2020.1714567.
22. Sharma B.K. Used lubricating oil regeneration using advanced clay treatment / B.K. Sharma, M. Rashid // Journal of Environmental Management. – 2016. – № 181. – P. 806-813. https://doi.org/ 10.1016/j.jenvman.2016.07.029.

Благодарность

Работа проведена при финансовой помощи Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан, грант BR24993178 «Разработка инновационной технологии переработки вторичных ресурсов – отходов металлургических производств, побочных продуктов нефтепереработки и нефтедобычи».

А.Н. Сәбитова, Ж.Ш. Шәріпхан, Б.Б. Баяхметова, Ә.Қ. Қабылқақов, Н.Н. Нұрғалиев*
Шәкәрім университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей, Глинки көшесі, 20
*e-mail: n.nurgaliyev@shakarim.kz

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН МОТОР МАЙЛАРЫН БЕНТОНИТТІ СОРБЕНТТЕРДІ ҚОЛДАНУ АРҚЫЛЫ ТАЗАРТУ ЖӘНЕ КӘДЕГЕ ЖАРАТУ ӘДІСІН ӘЗІРЛЕУ

Бұл жұмыста майларды регенерациялаудың заманауи тәсілдері, соның ішінде физикалық, химиялық және сорбциялық әдістер қарастырылып, адсорбциялық тазарту экологиялық қауіпсіз әрі технологиялық тұрғыдан қарапайым балама ретінде негізделді. Табиғи және модификацияланған бентонитті сорбенттерді қолдану арқылы пайдаланылған мотор майларын тиімді тазарту және кәдеге жарату әдісі әзірленді. Зерттеу нысандары ретінде KIXX 10W-40 пайдаланылған мотор майы, П1Т1А және «13 горизонт» бентониттері, сондай-ақ олардың қышқылдық және пероксидтік активация арқылы алынған түрлері қолданылды. Эксперименттік зерттеулер вакуумдық май тазарту қондырғысы мен сорбциялық сүзу әдістерін пайдалану арқылы жүргізілді. Тазарту тиімділігін бағалау үшін FTIR-спектроскопия, термогравиметриялық талдау (TGA) және ICP-MS әдістері қолданылды.Зерттеу нәтижелері май құрамындағы су, тотығу өнімдері, күкіртті қосылыстар мен металл қоспаларының айтарлықтай азайғанын көрсетті. Ең жоғары тиімділік модификацияланған П1Т1А бентонитін қолданғанда байқалды. Модификация сорбенттің меншікті беті мен сорбциялық сыйымдылығын арттырып, адсорбция процесінің тиімділігін жоғарылатады. Сонымен қатар, бұл әдіс энергия шығынын азайтып, экономикалық тиімділікті арттыруға мүмкіндік береді. Ұсынылған тәсіл қарапайым, үнемді, масштабтауға қолайлы және екінші реттік улы қалдықтар түзбейді, сондықтан оны өнеркәсіпте кеңінен қолдануға болады.

Түйін сөздер: *пайдаланылған мотор майлары, бентонитті сорбенттер, сорбциялық тазарту, майларды регенерациялау, модификацияланған саздар, вакуумдық дегазация, экологиялық қауіпсіздік.*

A.N. Sabitova, Zh.Sh. Sharipkhan, B.B. Bayakhmetova, A.K. Kabylkakov, N.N. Nurgaliyev*
Shakarim University,
071412, Republic of Kazakhstan, Semey, Glinki street, 20
*e-mail: n.nurgaliyev@shakarim.kz

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR PURIFICATION AND UTILIZATION OF USED MOTOR OILS USING BENTONITE SORBENTS

The study examines modern approaches to oil regeneration, including physical, chemical, and sorption methods, and substantiates the choice of adsorption purification as an environmentally safe and technologically simple alternative. An effective method for the purification and utilization of used motor oils using natural and modified bentonite sorbents has been developed. The research objects included used KIXX 10W-40 motor oil, P1T1A and «13 Horizon» bentonites, as well as their modified forms obtained through acid and peroxide activation methods. Experimental studies were carried out using a vacuum oil purification unit and sorption filtration techniques. The purification efficiency was evaluated using FTIR spectroscopy, thermogravimetric analysis (TGA), and ICP-MS methods. The results demonstrated a significant reduction in water content, oxidation products, sulfur-containing compounds, and metal impurities. The highest efficiency was achieved with modified P1T1A bentonite, ensuring maximum contaminant removal. It was established that modification increases specific surface area and sorption capacity, enhancing adsorption processes. The proposed method is simple, cost-effective, scalable, and does not generate secondary toxic waste, making it suitable for industrial application while reducing environmental impact.

Key words: *used motor oils, bentonite sorbents, sorption purification, oil regeneration, modified clays, vacuum degassing, environmental safety.*

Авторлар туралы мәліметтер

Альфира Нұржанқызы Сәбитова – PhD, қауымдастырылған профессор, Шәкәрім университеті, Химия және экология кафедрасы меңгерушісі; e-mail: a.sabitova@shakarim.kz. ORCID: https:orcid.org/ 0000-0002-3360-7998.

Жанна Шәріпханқызы Шәріпхан – докторант, Шәкәрім университеті, Химия және экология кафедрасы; e-mail: j.shariphan@shakarim.kz. ORCID: https:orcid.org/ 0000-0002- 2484-7287.

Бұлбұл Баяхметқызы Баяхметова – х.ғ.к., қауымдастырылған профессор, Шәкәрім университеті, Химия және экология кафедрасы; e-mail:b.baiahmetova@shakarim.kz. ORCID: https:orcid.org/ 0000-0002-5663-5107.

Әміржан Қуанышұлы Қабылқақов – студент, Шәкәрім университеті, Химия және экология кафедрасы; e-mail: amir.kabyl@mail.ru.

Нұржан Нұрлыбекұлы Нұрғалиев* – PhD, доцент-зерттеуші, Шәкәрім университеті, Химия және экология кафедрасы; e-mail: n.nurgaliyev@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003 1216-7150.

Сведения об авторах

Альфира Нұржановна Сабитова – PhD, ассоциированный профессор, Шәкәрім университет, заведующий кафедры химии и экологии; e-mail: a.sabitova@shakarim.kz. ORCID: https:orcid.org/ 0000-0002-3360-7998.

Жанна Шарипхановна Шарипхан – докторант, Шәкәрім университет, кафедра химии и экологии; e-mail: j.shariphan@shakarim.kz. ORCID: https:orcid.org/ 0000-0002- 2484-7287.

Булбул Баяхметовна Баяхметова – к.х.н., ассоциированный профессор, Шәкәрім университет, кафедры химии и экологии; e-mail:b.baiahmetova@shakarim.kz. ORCID: https:orcid.org/ 0000-0002-5663-5107.

Әміржан Қуанышұлы Қабылқақов – студент, Шәкәрім университет, кафедры химии и экологии; e-mail: amir.kabyl@mail.ru.

Нуржан Нурлыбекович Нургалиев* – PhD, доцент-исследователь, Шәкәрім университет, кафедры химии и экологии; e-mail: n.nurgaliyev@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003 1216-7150.

Information about the authors

Alfira Nurzhanovna Sabitova – PhD, associate professor, Shakarim University, Head of the Department Chemistry and Ecology; e-mail: a.sabitova@shakarim.kz. ORCID: https:orcid.org/ 0000-0002-3360-7998.

Zhanna Sharipkhankyzy Sharipkhan – PhD -student, Shakarim University, Department Chemistry and Ecology; e-mail: j.shariphan@shakarim.kz. ORCID: https:orcid.org/ 0000-0002- 2484-7287.

Bulbul Bayakmetkyzy Bayakhmetova – Cand. Chem.Sci., associate, Shakarim University, Department Chemistry and Ecology; e-mail:b.baiahmetova@shakarim.kz. ORCID: https:orcid.org/ 0000-0002-5663-5107.

Amirzhan Kuanyshuly Kabylkakov – stundent, Shakarim University, Department Chemistry and Ecology; e-mail: amir.kabyl@mail.ru.

Nurzhan Nurlybekuly Nurgaliyev* – PhD, associate professor-researcher, Shakarim University, Department of Chemistry and Ecology; e-mail: n.nurgaliyev@shakarim.kz, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1216-7150.

Поступила в редакцию 29.03.2026
Поступила после доработки 15.05.2026
Принята к публикации 16.05.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-74

IRSTI: 61.51.31

M. Kunarbekova[1]*, A.A. Kanykeshova[1], K. Laszlo[2], Zh.M. Zhandosov[3], S. Azat[1]
[1]Satbayev University,050013, Республика Казахстан, г. Алматы, , ул.Сатпаева 22
[2]Budapest University of Technology and Economics,
Műegyetem rakpart 3., 1111 Budapest, Hungary
[3]Institute of Proglem Combustion, Bogenbay Batyr 172, Almaty, Kazakhstan
*e-mail: m.kunarbekova@satbayev.university

COFFEE-GROUND–DERIVED HYDROTHERMALLY ACTIVATED CARBON: SYNTHESIS, CHARACTERIZATION, AND ADSORPTION PERFORMANCE TOWARD METHYLENE BLUE

Abstract: *Spent coffee grounds (SCGs), an abundant lignocellulosic agro-industrial residue, were valorized into porous carbonaceous adsorbents through hydrothermal carbonization (HTC) followed by alkaline activation, aiming at the efficient removal of methylene blue (MB) from aqueous solutions. HTC was conducted under subcritical water conditions at temperatures of 180-220 °C and residence times of 2-6 h, producing hydrochars with tunable physicochemical properties. The obtained hydrochars were subsequently activated using potassium hydroxide in a microwave reactor to enhance surface functionality and porosity. The structural, textural, and chemical characteristics of the materials were comprehensively analyzed by N_2 physisorption (BET surface area and pore size distribution), FTIR spectroscopy, SEM, XRD/Raman spectroscopy, and elemental analysis (XRF/EDX).*

Batch adsorption experiments were performed to evaluate the adsorption kinetics, equilibrium isotherms, and thermodynamic behavior toward methylene blue. The activated coffee-ground-derived carbons exhibited rapid adsorption kinetics and significantly enhanced adsorption capacities compared to non-activated hydrochars. The improved performance was attributed to the synergistic effects of developed micro- and mesoporous structures and abundant oxygen-containing surface functional groups. Mechanistic analysis indicated that methylene blue uptake was governed by a combination of pore filling, electrostatic attraction, π–π electron donor–acceptor interactions between the aromatic carbon surface and dye molecules, hydrogen bonding, and intraparticle diffusion.

The results demonstrate that hydrothermal carbonization coupled with mild alkaline activation provides an effective and sustainable route for converting spent coffee grounds into high-performance adsorbents. This study elucidates the relationships between synthesis conditions, surface chemistry, textural properties, and adsorption performance, highlighting the potential of SCG-derived activated carbon for practical wastewater treatment applications.

Key words: *Hydrothermal carbonization; Spent coffee grounds; Activated carbon; Methylene blue adsorption; Water purification.*

1. Introduction

Coffee is among the largest commodities in the world, which generates 2 billion tons of waste annually, and most of which remains unutilized [1]. One of the biggest problems facing modern society is the contamination of natural resources, especially water. The anthropogenic discharge of dye-contaminated effluents from textile, printing, leather, and pharmaceutical industries constitutes a significant environmental hazard to aquatic ecosystems and poses substantial risks to public health. Despite being a sign of global economic advancement, the growing demand for industrial processes contributes significantly to the spread of pollutants that endanger human health and the ecosystem by degrading the environment [2]. Synthetic dyes exhibit high chemical stability, complex polycyclic aromatic structures, and recalcitrance to biodegradation, rendering conventional biological treatment processes largely ineffective. Among these contaminants, methylene blue (MB), a thiazine-class cationic dye, is extensively utilized in industrial applications and is frequently detected in wastewater streams at concentrations exceeding regulatory thresholds. At even trace concentrations, MB attenuates photosynthetic light penetration in aquatic environments and demonstrates cytotoxic, mutagenic, and carcinogenic potential, thereby necessitating the development of efficient and sustainable remediation technologies. Inadequate management of pollutants produced by industrial and agricultural processes results in serious water pollution, which damages the ecosystem and has an impact on human and other living things' health [3]. For instance,

©M. Kunarbekova, A.A. Kanykeshova, K. Laszlo, Zh.M. Zhandosov, S. Azat, 2026

dye, once it has been used and discharged into the waterway, not only alters the quality of the environment but also causes the loss of aesthetic value due to the high color content that it has [4]. Over 7×10^5 tons of over 100,000 different kinds of chemical dyes are manufactured annually for commercial use [5].

Globally, both coffee production and consumption are rising. The market for coffee shops has grown significantly during the 2000s due to the popularity of coffee-drinking culture and the rising demand for different kinds of coffee goods [6]. As a result, the quantity of spent coffee grounds (SCGs), which are byproducts produced following the extraction of coffee, has also been steadily rising. Although some SCGs are used as compost, most are disposed of through incineration and landfills [7]. Because of this, there has been an increase in the amount of interest in technology that make use of SCGs as a source of renewable energy [6]. Pent coffee grounds (SCGs) represent an abundant and underutilized lignocellulosic biomass residue, with an estimated global annual production exceeding 6 million metric tons from domestic, commercial, and industrial coffee processing operations. Compositionally, SCGs are rich in cellulose, hemicellulose, lignin, and lipophilic extractives, rendering them a promising carbonaceous precursor for the synthesis of functionalized carbon materials. The valorization of SCGs into activated carbon adsorbents not only mitigates the environmental burden associated with landfill disposal and greenhouse gas emissions but also aligns with circular economy principles by transforming waste biomass into high-value materials for environmental remediation applications [8].

Hydrothermal reactions exploit the strong dissolution capability of subcritical water in a high-pressure reactor to produce finer particles by turning organic polymers into low-molecular-weight compounds [9]. Hydrothermal carbonization (HTC) has garnered considerable interest as a thermochemically sustainable conversion pathway for the transformation of wet biomass into carbonaceous materials under subcritical water conditions (typically 180–250°C, autogenous pressure). Unlike conventional pyrolysis, which necessitates elevated temperatures (>400°C) and anhydrous feedstocks, HTC proceeds via dehydration, decarboxylation, and condensation reactions in the aqueous phase, obviating energy-intensive pre-drying requirements and rendering it particularly advantageous for high-moisture-content substrates such as coffee grounds. The resultant hydrochar is characterized by abundant oxygen-containing surface functional groups (carboxyl, hydroxyl, carbonyl), which facilitate electrostatic and hydrogen-bonding interactions with cationic dye molecules. Subsequent physicochemical or chemical activation processes further enhance textural properties through the development of hierarchical micro- and mesoporous networks, thereby substantially augmenting adsorptive capacity and mass transfer kinetics [10].

Despite the proliferation of research on biomass-derived carbonaceous adsorbents, systematic investigations elucidating the structure–property–performance relationships of hydrothermally synthesized coffee-ground-derived activated carbon for methylene blue sequestration remain scarce. Specifically, the correlations between synthesis parameters (temperature, residence time, activation agent), surface chemistry (functional group distribution, surface charge density), textural characteristics (specific surface area, pore size distribution), and adsorption efficacy require comprehensive elucidation. A mechanistic understanding of the governing adsorption phenomena—including electrostatic interactions, π–π electron donor-acceptor complexation, hydrogen bonding, and intraparticle diffusion-is imperative for rational material design and optimization of adsorbent performance in practical wastewater treatment applications [11].

In particular, hydrochar generated from SCGs has demonstrated excellent efficacy in the removal of heavy metals, organic dyes, and medicines from wastewater [12]. Nevertheless, hydrochars often exhibit limited surface areas, laying a key importance on the surface functions to supply adsorption sites for the pollutants. Depending on the HTC temperature and residence time, HTC was found to affect the presence of functional groups on the material surface, such as by causing the loss of oxygen-containing functional groups [13]. Therefore, chemical/physical activation is often needed to change the surface functioning and boost the adsorption capability of the generated hydrochar [14]. Chemical activation entails treating the hydrochar with activating chemicals such as potassium hydroxide or phosphoric acid, which not only enhance the surface area but also introduce additional functional groups on the surface, further improving the material's potential to collect pollutants [13].

The adsorption capability of hydrochars made from HTC of SCGs at various temperatures is examined in this work. The physical/chemical properties and adsorption potential of HTC products

and raw feedstock are examined in order to remove MB from water. The effect of gentle alkaline activation on enhancing the adsorption capacity of the SCG-derived hydrochar is further examined. To the best of our knowledge, dye adsorption on SCG hydrochars was not systematically explored in prior studies; in this investigation, MB is employed as a model dye to elucidate adsorption of raw and minimally activated SCG hydrochars. The effects of initial MB concentration and temperature are explained, along with the process's kinetics, isotherms, and thermodynamics.

2. Experimental part

2.1 Materials and method

Spent coffee grounds (SCGs) were procured from the Satbayev University café facility as post-extraction solid residue. The feedstock originated from Brazil Mogiana (Coffea arabica) beans processed under standardized espresso extraction parameters: water temperature of 90-94 °C and extraction pressure of approximately 9 bar (0.9 MPa), as specified by the manufacturer protocol for the Nuova Simonelli commercial espresso system. Analytical-grade potassium hydroxide (KOH, ≥97% purity, CAS: 1310-58-3) was procured from Sigma-Aldrich Corporation. Deionized water (electrical resistivity up to 18.2 MΩ·cm) was obtained from a laboratory water purification system (Basic-Q15-II, LabSoul, China).

Thermal activation procedures were executed in a programmable microreactor system (PR 250, LabSoul Technology, China) under controlled temperature and atmospheric conditions. Microwave-assisted activation was performed using a multimode microwave reactor (YMW-HP80, LabSoul Technology, China) operating at a frequency of 2.45 GHz with adjustable power output, enabling rapid volumetric heating and enhanced activation kinetics.

2.2 Synthesis of coffee hydrochar

Spent coffee grounds were dried at 110°C in a drying oven for 24 h. Subsequently, 50 g of the dried material was mixed with 150 mL of deionized water and loaded into a high-pressure microreactor (PR-250, LabSoul, China). Hydrothermal carbonization was carried out at 180, 200, and 220 °C with residence times of 2 and 6 h.

The optimal mass ratio of coffee grounds to water was determined experimentally. In total, six biochar samples were obtained under different reaction conditions, as summarized in Table 1. The biochar yield ranged from 62 to 73 wt%.

Table 1. Hydrothermal carbonization conditions and yields of biochar samples derived from spent coffee grounds.

№	Sample	Time (h)	Temperature (°C)	Ration (mass of raw coffee to DI)	Steering	Pressure, MPa	Yield (%)	Mass, g	Surface area, m^2/g
1	HTK180/2	2	180	(50:150)	300	1.17	73.2	36.60	0,80
2	HTK180/6	6	180	(50:150)	300	1.16	70.56	35.28	2,6
3	HTK200/2	2	200	(50:150)	300	2.19	69.7	34.85	2,4
4	HTK200/6	6	200	(50:150)	300	2.43	68.34	34.17	3,2
5	HTK220/2	2	220	(50:150)	300	2.23	61.6	30.80	3,9
6	HTK220/6	6	220	(50:150)	300	3.86	62.92	31.46	5,9

The change in the ratio in the microreactor is shown using the example of HTK 220/6 in Figure 1, and the maximum value produced in the reactor is shown in Figure 1.

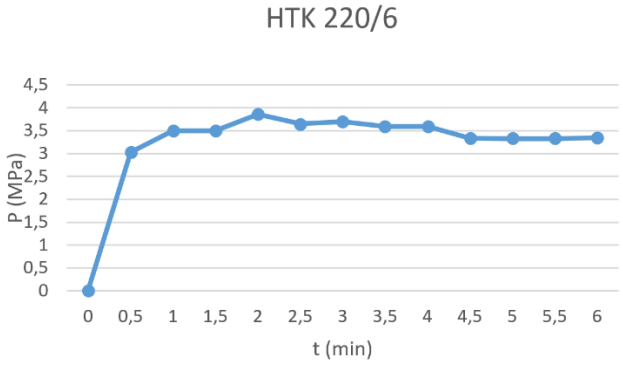


Figure 1 – Pressure–time profile for HTK 220/6 in the microreactor

The activated samples obtained in the microreactor were thoroughly washed with 100 mL of deionized water, subsequently filtered using a Büchner funnel, and dried at 110°C in a laboratory drying oven (DHG-9145A, LabSoul, China).

Subsequently, microwave-assisted activation of the HTK 220/6 sample was carried out using potassium hydroxide (KOH) in an aqueous solution with a concentration of 2 M, as HTK 220/6 exhibited the most optimal specific surface area among the obtained samples. The activation temperature was varied within the range of 80-160 °C in order to investigate the effect of KOH on the composition and structure of the material.

For this purpose, after hydrothermal carbonization of the coffee residue, the samples were additionally treated with a 2 M KOH solution (Figure 2) in a microwave reactor, which was expected to promote surface modification, chemical activation of the carbon matrix, and partial pore development, leading to further enhancement of textural properties.



Figure 2 – Schematic illustration of carbon material synthesis from coffee waste

The evolution of temperature and pressure as a function of reaction time during microwave-assisted hydrothermal carbonization of spent coffee grounds is illustrated in Figure 3. As can be observed, both temperature and pressure increased with increasing residence time, reflecting the progressive heating of the reaction medium and the corresponding build-up of autogenous pressure inside the sealed reactor. The pressure development is attributed to water vapor generation and the formation of gaseous decomposition products during hydrothermal reactions. The simultaneous increase in temperature and pressure confirms stable operation of the microwave reactor under subcritical water conditions throughout the experiment.

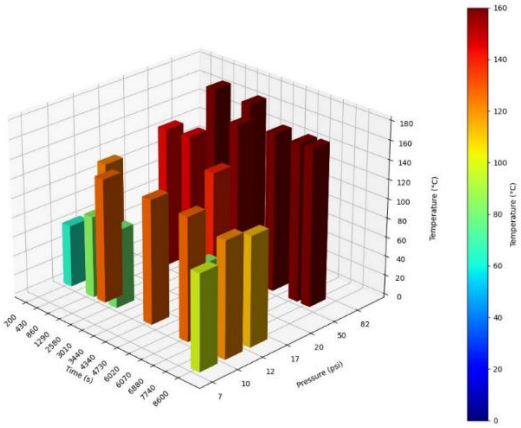


Figure 3 – Time–pressure–temperature profiles during microwave-assisted hydrothermal carbonization of spent coffee grounds

2.3 pH analysis of carbon samples

pH analysis is used to evaluate the acid-base properties of carbon materials and to characterize the nature of their surface functional groups. The pH value reflects the presence of

acidic (e.g., carboxylic, phenolic) or basic sites on the carbon surface, which play a key role in adsorption processes. This parameter is particularly important for understanding the interaction between adsorbents and aqueous pollutants, as it influences surface charge, ion exchange behavior, and overall adsorption efficiency.

The pH measurements were carried out by contacting 50 mg of carbon samples with 50 mL of 0.1 M KCl solution for 72 h at 20 °C under static conditions. After equilibration, the pH of the suspensions was measured.

2.4 Infrared spectroscopy (FTIR) and interpretation of the obtained spectra

Fourier-Transform Infrared (FTIR) spectroscopy is a widely used analytical technique based on the absorption of infrared radiation by molecules at specific frequencies corresponding to the vibrations of chemical bonds. The technique gives a substance's "molecular fingerprint" and makes it possible to identify functional groups. By examining the location, strength, and form of distinctive absorption bands in relation to wavenumber, the spectra can be interpreted to determine the sample's molecular makeup and structure.

2.5 Scanning Electron Microscopy (SEM) analysis and interpretation of the obtained images

Scanning Electron Microscopy (SEM) analysis provides high-resolution imaging of a sample's surface by scanning it with a focused electron beam and detecting the emitted secondary or backscattered electrons. When using backscattered electron detection, compositional differences are frequently revealed through variations in brightness. The resulting grayscale images, where contrast arises from surface topography and material composition, allow for the interpretation of morphological features such as grain structure, particle size, surface roughness, and defect distribution.

2.6 Ultraviolet–visible spectroscopy (UV–Vis) technique for studying adsorption kinetics and isotherms

UV–visible spectrophotometry (UV–Vis) was used to measure the amount of methylene blue in aqueous solutions (λ = 664 nm) both before and after adsorption. The residual adsorbate concentration in the solution can be quantitatively determined using this method, which is based on measuring the optical density of the solution at the dye's distinctive absorption wavelength.

Solution samples were collected during the adsorption process at predetermined intervals in order to conduct kinetic tests. Under controlled experimental settings, a series of solutions with varying initial methylene blue concentrations were utilized to create adsorption isotherms. The samples were extracted from the solid phase and subjected to spectrophotometric analysis prior to measurement.

The adsorption capacity of the sorbent at time t was calculated using the material balance equation:

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t)V}{m} \quad (1)$$

where, q_t – adsorption capacity at time t (mg·g⁻¹), C_0 and C_t – initial and current adsorbate concentrations (mg·L⁻¹), V – solution volume (L), m – adsorbent mass (g).

3 RESULTS

3.1 pH analysis of carbon samples

The initial 0.1 M KCl solution showed a slightly acidic pH of 5.96. After interaction with pristine HTK 220/6, the pH slightly increased to 6.02, indicating weakly basic surface properties.

Further treatment was applied to the HTK 220/6 sample under different conditions. As shown in Table X, the sample obtained at 80°C exhibited the highest pH (7.80), while increasing the treatment temperature (100-160°C) resulted in lower pH values (6.79-7.02), approaching neutral conditions. This trend indicates changes in surface functional groups of the carbon material.

Table 1 – Effect of treatment conditions on pH of HTK 220/6 carbon samples

Sample	pH	Mass of carbon, mg
MilliQ water	5,53	
0,1 M KCl	5,96	
0,1 M KCl and HTK 220/6	6,02	50,3
0,1 M KCl and HTK 220/6 MV 80/2	7,80	50,2
0,1 M KCl and HTK 220/6 MV 100/2	6,79	50,2
0,1 M KCl and HTK 220/6 MV 120/2	7,02	50,2

0,1 M KCl and HTK 220/6 MV 140/2	6,91	50,3
0,1 M KCl and HTK 220/6 MV 160/2	6,93	50,0

3.2 Results of Infrared Spectroscopy (FTIR)

The infrared spectra of HTK samples obtained at temperatures of 80-160°C are shown in the figure. Spectral analysis allows the identification of the main functional groups present on the surface of the carbon materials obtained.

The spectra of all samples show a band in the 3000-2900 cm^{-1} range, which corresponds to the valence vibrations of (CH) bonds in aliphatic structures. These bands are characteristic of carbon materials obtained from biomass and are associated with residual organic components of the raw material.

The absorption band in the range of 1700-1600 cm^{-1} refers to carbonyl groups (C=O). The presence of these bands indicates the formation of an aromatic carbon structure and the presence of oxygen-containing functional groups on the surface of the material.

In the 1500-1400 cm^{-1} range, bands are observed that are caused by C–H deformation vibrations in aromatic structures. These peaks confirm the formation of condensed carbon fragments during the thermal treatment of coffee residues.

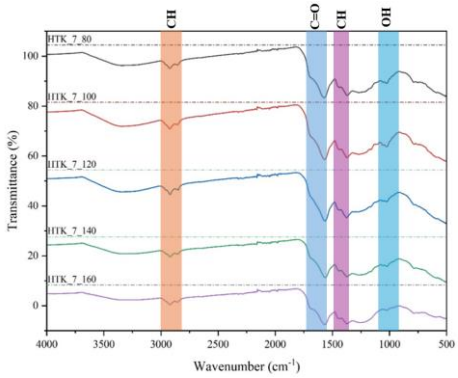


Figure 4 – FT-IR functional group analysis

Also, in the range of 1100-1000 cm^{-1}, there are bands associated with the vibrations of C–O and O–H groups, which are characteristic of phenolic, alcohol, and ether compounds. The presence of these functional groups indicates the presence of active centers on the surface of the carbon material.

The results of FTIR analysis show that as the processing temperature increases, the chemical structure of the material changes and a functionalized carbon surface is formed. Such surface groups can play an important role in the adsorption of pollutants.

3.3 Scanning Electron Microscopy (SEM) results

The morphology of the hydrothermally carbonized and KOH-activated carbon materials derived from spent coffee grounds was examined by scanning electron microscopy (SEM) (Fig. 5 a-e). The micrographs reveal a clear evolution of surface structure as a function of hydrothermal carbonization (HTC) severity and subsequent microwave-assisted activation.

For the HTK220/6 sample, the effect of microwave-assisted activation temperature (80-160 °C) on surface morphology was systematically evaluated. At 80°C (Fig. 5a), a relatively compact surface with poorly developed porosity is observed. Increasing the temperature to 100 °C (Fig. 5b) results in slight surface roughening and the appearance of initial structural heterogeneities.

At 120°C (Fig. 5c), partial fragmentation of the carbon matrix and the formation of irregular voids are detected, indicating the onset of effective activation. A further increase to 140 °C (Fig. 5d) leads to the development of a more open structure with visible cavities and increased surface roughness. At 160°C (Fig. 5e), a highly porous, sponge-like morphology with an interconnected framework is formed. This structural evolution is attributed to enhanced KOH-induced activation under microwave irradiation, resulting in progressive carbon matrix etching and pore development. Increasing activation temperature is therefore directly associated with the formation of a more accessible porous structure.

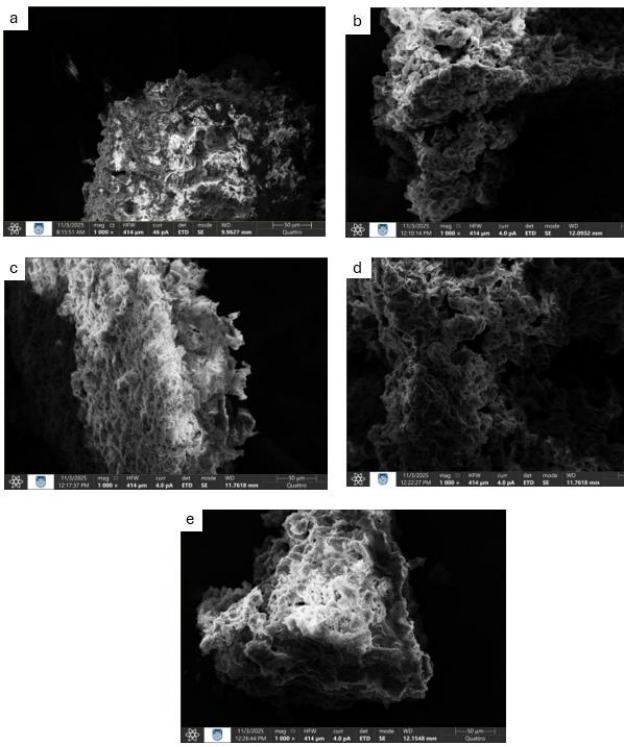


Figure 5 – SEM images of HTK220/6 at different activation temperatures:
(a) 80 °C, (b) 100 °C, (c) 120 °C, (d) 140 °C, (e) 160 °C.

In summary, SEM analysis demonstrates that increasing the microwave-assisted activation temperature from 80 to 160°C leads to a progressive transformation of the HTK220/6 morphology from a compact structure to a highly porous, interconnected framework. This evolution confirms the critical role of activation temperature in governing pore development and structural accessibility, which is expected to enhance the material's adsorption performance.

3.4 Sorption study

The adsorption behavior of methylene blue on the synthesized sorbents is presented as a function of equilibrium concentration. The results demonstrate a typical increase in the adsorbed amount with increasing equilibrium concentration, indicating progressive occupation of available active sites on the sorbent surface.

At lower concentrations, a sharp increase in adsorption capacity is observed, suggesting a high affinity between MB molecules and the sorbent surface, likely driven by electrostatic interactions and π–π stacking. As the concentration increases, the adsorption tends to approach a plateau, indicating partial saturation of active sites.

The differences between the two datasets (blue and orange points) suggest variations in sorption performance, which may be attributed to differences in surface functional groups, porosity, or modification of the sorbents. The higher adsorption capacity observed for the modified samples indicates enhanced interaction mechanisms, possibly due to increased surface heterogeneity and the presence of additional binding sites.

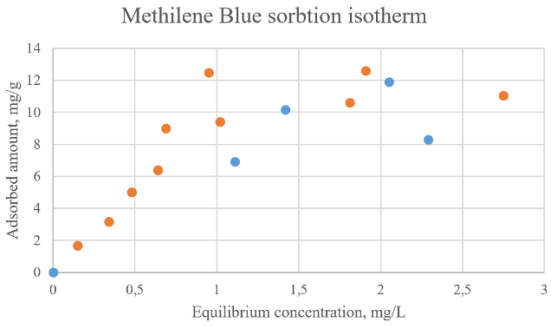


Figure 6 – Adsorption isotherms of methylene blue onto the prepared sorbents

Overall, the obtained isotherm profiles are consistent with Langmuir- or Freundlich-type adsorption behavior, confirming the suitability of the developed materials for dye removal applications.

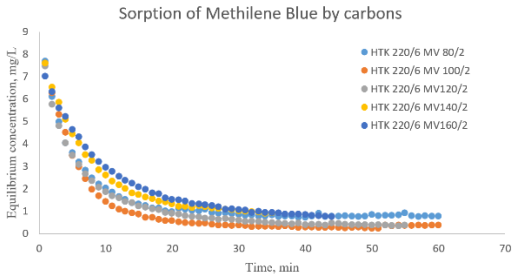


Figure 7 – Adsorption kinetics of methylene blue onto activated carbon samples under different modification conditions

The adsorption kinetics of methylene blue on the synthesized carbon materials are presented as the variation of residual concentration with contact time. A rapid decrease in MB concentration is observed during the initial stage (0-10 min), indicating fast adsorption driven by the abundance of available active sites on the sorbent surface.

As the contact time increases, the rate of adsorption gradually slows down, approaching equilibrium after approximately 30-40 min. This behavior suggests a transition from external surface adsorption to intraparticle diffusion and pore filling mechanisms.

Among the studied samples, noticeable differences in adsorption rates and equilibrium concentrations are observed. Samples treated under different modification conditions (e.g., varying MV ratios) exhibit distinct kinetic profiles, reflecting the influence of surface chemistry and pore structure on adsorption performance. The sample HTK 220/6 MV 100/2 demonstrates the fastest removal and lowest residual concentration, indicating superior adsorption efficiency, while other samples show slightly slower kinetics and higher equilibrium concentrations.

The overall kinetic behavior is consistent with pseudo-second-order kinetics, suggesting that chemisorption plays a dominant role in the adsorption process. These results confirm that the modification conditions significantly affect both the adsorption rate and capacity of the carbon materials.

Conclusion

The present study successfully demonstrates the valorization of spent coffee grounds (SCGs) into high-performance activated carbon adsorbents via hydrothermal carbonization followed by microwave-assisted alkaline activation. The developed materials exhibited a hierarchical porous structure and a rich surface chemistry, which were critical for the efficient removal of methylene blue from aqueous solutions.

From the perspective of water purification, the findings highlight the potential of SCG-derived carbons as a sustainable and cost-effective alternative to commercial activated carbon. The synergistic effect of pore filling, electrostatic attraction, and π–π interactions enabled rapid adsorption kinetics and high uptake capacity, making the process viable for treating dye-laden wastewater. Furthermore, the mild activation conditions employed in this work offer an energy-efficient route for scaling up production, aligning with the principles of the circular economy by transforming an abundant agro-industrial waste stream into a functional material for environmental remediation.

References

1. Miron-Merida, V.A. Valorization of agri-food wastes and by-products / V.A. Miron-Merida et al // Elsevier. – 2021. – P. 173-198.
2. Bharagava R.N. Environmental pollutants and their bioremediation approaches / R.N. Bharagava. – Boca Raton : CRC Press, 2017. – 412 p.
3. Preparation and characterization of activated carbon from wild olive cores (oleaster) by H3PO4 for the removal of Basic Red 46 / F. Kaouah et al // Journal of Cleaner Production. – 2013. – 1 September.

4. Adsorption of methylene blue onto activated carbon developed from biomass waste by H2SO4 activation: kinetic, equilibrium and thermodynamic studies / A.H. Jawad et al // Desalination and Water Treatment. – 2016. – November.
5. Adsorption isotherms and kinetic modeling of methylene blue dye onto a carbonaceous hydrochar adsorbent derived from coffee husk waste / T.H. Tran et al // Science of the Total Environment. – 2020. – 10 July.
6. Kim H.-J. Hydrothermal carbonization of spent coffee grounds / H.-J. Kim, S.-C. Oh // Journal of Material Cycles and Waste Management. – 2021.
7. Fast pyrolysis of coffee grounds: characteristics of product yields and biocrude oil quality / J.P. Bok et al // Energy. – 2012.
8. Franca A.S. Potential uses of spent coffee grounds in the food industry / A.S. Franca, L.S. Oliveira // Foods. – 2022. – Vol. 11, № 14. – Art. 2064.
9. Hydrothermal liquefaction of sewage sludge to produce bio-oil: effect of co-pretreatment with subcritical water and mixed surfactants / T. Yang et al // The Journal of Supercritical Fluids. – 2019. – Vol. 144. – P. 28-38.
10. Kruse A. Hydrothermal conversion of biomass to fuels and energetic materials / A. Kruse, A. Funke, M.-M. Titirici // Current Opinion in Chemical Biology. – 2013. – Vol. 17, Issue 3. – P. 515-521.
11. Hydrochar from spent coffee ground as a sustainable adsorbent for dye removal from water: adsorption characterization and improvement via soft alkaline activation / G. Pace et al // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2026. – 7 January.
12. A review: hydrochar as potential adsorbents for wastewater treatment and CO2 adsorption / M. Jalilian et al // Science of the Total Environment. – 2024.
13. The impact of hydrothermal carbonization on the surface functionalities of wet waste materials for water treatment applications / M. Niinipuu et al // Environmental Science and Pollution Research. – 2020.
14. Hydrothermal carbonization of biomass residuals: a comparative review of the chemistry, processes and applications of wet and dry pyrolysis / J.A. Libra et al // Biofuels. – 2011.

Acknowledgment: *This research was funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. BR28712925).*

М.С. Кунарбекова[1]*, А.А. Қанықешова[1], К. Лазло[2], Ж.М. Жандосов[3], С. Азат[1]
[1]Satbayev University, 050013, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Сәтпаев к-сі 22
[2]Будапешт технология және экономика университеті,
Műegyetem rakpart 3., 1111 Будапешт, Венгрия
[3]Жану проблемалары институты , Богенбай батыра 172, Алматы, Казахстан
*e-mail: m.kunarbekova@satbayev.university

КОФЕ ҚАЛДЫҚТАРЫНАН АЛЫНҒАН ГИДРОТЕРМИЯЛЫҚ АКТИВТЕЛГЕН КӨМІР: СИНТЕЗІ, СИПАТТАМАСЫ ЖӘНЕ МЕТИЛЕН КӨГІНЕ ҚАТЫСТЫ АДСОРБЦИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІ

Пайдаланылған кофе ұнтағы (WCG), мол лигноцеллюлозалық агроөнеркәсіптік қалдық, гидротермиялық көміртек адсорбенттеріне айналдырылды, содан кейін сілтілі активация арқылы су ерітінділерінен метилен көкті (MB) тиімді түрде кетіру үшін. Гидротермиялық көміртектеу (HTC) 180-220°C температурада және 2-6 сағат тұру уақытында судың аса маңызды емес жағдайында жүргізілді, нәтижесінде реттелетін физика-химиялық қасиеттері бар көмірсутектер алынды. Алынған гидрокарбондар кейіннен беттік функционалдылық пен кеуектілікті жақсарту үшін микротолқынды реакторда калий гидроксидін пайдаланып белсендірілді. Материалдардың құрылымдық, текстуралық және химиялық сипаттамалары N_2 физисорбциясын (BET беттік ауданы және кеуек өлшемінің таралуы), Фурье түрлендіру инфрақызылын (FTIR), сканерлеуші электронды микроскопияны (SEM), рентгендік дифракция/Раман спектроскопиясын және элементтік талдауды (XRF/EDX) қолдану арқылы жан-жақты талданды.

Метилен көкке қатысты адсорбция кинетикасын, тепе-теңдік изотермаларын және термодинамикалық мінез-құлықты бағалау үшін партиялық адсорбция тәжірибелері жүргізілді. Кофе ұнтағынан алынған белсендірілген көміртектер белсендірілмеген көмірсутектермен салыстырғанда жылдам адсорбция кинетикасын және адсорбция сыйымдылығын айтарлықтай арттырды. Бұл жақсартылған өнімділік дамыған микро- және мезокеуекті құрылымдардың синергетикалық әсерлеріне және бетіндегі оттегі бар функционалды топтардың көптігіне байланысты болды. Механикалық талдау метилен көк адсорбциясының кеуектерді толтыру,

электростатикалық тартылыс, хош иісті көміртек беті мен боялыш молекулалары арасындағы π–π донор-акцепторлық өзара әрекеттесулер, сутектік байланыс және кеуекішілік диффузияның үйлесімі арқылы жүзеге асатынын көрсетті.

Нәтижелер гидротермиялық көміртектенудің жұмсақ сілтілі активациямен біріктірілуі пайдаланылған кофе ұнтағын жоғары тиімді адсорбенттерге айналдырудың тиімді және тұрақты жолын қамтамасыз ететінін көрсетеді. Бұл зерттеу синтез жағдайлары, беттік химия, текстуралық қасиеттер және адсорбция тиімділігі арасындағы байланысты анықтайды, пайдаланылған кофе ұнтағынан алынған белсендірілген көмірдің ағынды суларды тазартуда практикалық қолдану әлеуетін көрсетеді.

Түйін сөздер: *Гидротермиялық көміртектену; Пайдаланылған кофе ұнтағы; Белсендірілген көміртек; Метилен көк адсорбциясы; Суды тазарту.*

М.С. Кунарбекова[1]*, А.А. Каныкешова[1], К. Лазло[2], Ж.М. Жандосов[3], С. Азат[1]
[1]Satbayev University,050013, Республика Казахстан, г. Алматы, , ул.Сатпаева 22
[2]Будапештский технологический и экономический университет,
Műegyetem rakpart 3., 1111 Будапешт, Венгрия
[3]РГП «Институт проблем горения», Богенбай батыра 172, Алматы, Казахстан
*e-mail: m.kunarbekova@satbaev.university

ГИДРОТЕРМАЛЬНО АКТИВИРОВАННЫЙ УГЛЕРОД ИЗ КОФЕЙНОЙ ГУЩИ: СИНТЕЗ, ХАРАКТЕРИСТИКА И АДСОРБЦИОННАЯ СПОСОБНОСТЬ ПО ОТНОШЕНИЮ К МЕТИЛЕНОВОМУ СИНЕМУ

Использованные кофейные гущи (УКГ), обильный лигноцеллюлозный агро-промышленный остаток, были превращены в пористые углеродные адсорбенты через гидротермальную карбонизацию (ГТК), за которой следовала щелочная активация, с целью эффективного удаления метиленового синего (МС) из водных растворов. Гидротермальная карбонизация (ГТК) проводилась в условиях подсуперкритической воды при температурах 180–220 °C и времени пребывания 2–6 ч, что привело к получению гидрокарбонов с настраиваемыми физико-химическими свойствами. Полученные гидрочар были впоследствии активированы с использованием гидроксида калия в микроволновом реакторе для улучшения поверхностной функциональности и пористости. Структурные, текстурные и химические характеристики материалов были всесторонне проанализированы с помощью физисорбции N_2 (площадь поверхности BET и распределение размеров пор), Фурье-спектроскопии ИК (FTIR), сканирующей электронной микроскопии (SEM), рентгеновской дифракции/Раман-спектроскопии и элементного анализа (XRF/EDX).

Пакетные эксперименты по адсорбции были проведены для оценки кинетики адсорбции, равновесных изотерм и термодинамического поведения по отношению к метиленовому синему. Активированные углероды, полученные из кофейной гущи, продемонстрировали быструю кинетику адсорбции и значительно повышенные адсорбционные способности по сравнению с неактивированными гидрокарбонами. Улучшенная производительность была обусловлена синергетическими эффектами развитых микро- и мезопористых структур и обилием кислородсодержащих функциональных групп на поверхности. Механистический анализ показал, что поглощение метиленового синего было обусловлено сочетанием заполнения пор, электростатического притяжения, π–π донорно-акцепторных взаимодействий между ароматической углеродной поверхностью и молекулами красителя, водородных связей и внутрипористой диффузии.

Результаты показывают, что гидротермальная карбонизация в сочетании с мягкой щелочной активацией обеспечивает эффективный и устойчивый путь для преобразования использованной кофейной гущи в высокоэффективные адсорбенты. Это исследование разъясняет взаимосвязи между условиями синтеза, поверхностной химией, текстурными свойствами и адсорбционной эффективностью, подчеркивая потенциал активированного угля, полученного из использованной кофейной гущи, для практических приложений в очистке сточных вод.

Ключевые слова: *Гидротермальная карбонизация; использованная кофейная гуща; активированный уголь; адсорбция метиленового синего; очистка воды.*

Information about the authors

Makhabbat Kunarbekova* – Researcher at the Engineering Laboratory, Satbayev University; e-mail: m.kunarbekova@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8640-0667.

Akerke Almaskyzy Kanykeshova – Researcher at the Engineering Laboratory, Satbayev University; e-mail: a.aslmasovna@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-6517-6933.

Krisztina László – Department of Physical Chemistry and Materials Science, Budapest University of Technology and Economics; e-mail: laszlo.krisztina@vbk.bme.hu. ORCID: https://orcid.org/ 0000-0003-4499-3983 . https://orcid.org/0000-0003-4499-3983

Zhakpar Maratovich Zhandosov – Candidate of Chemical Sciences, Researcher at the Institute of Combustion Problems; e-mail: jandosovj@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3842-4397.
Seitkhan Azat – PhD, professor; Head of the Laboratory of Engineering Profile, Satbayev University, e-mail: s.azat@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4131-0905.

Авторлар туралы мәліметтер

Махаббат Сейт-Задаевна Кунарбекова* – философия докторы, Инженерлік-бейінді зертханасының ғылыми қызметкері, Сәтбаев Университеті; e-mail: m.kunarbekova@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8640-0667.
Ақерке Алмасқызы Қанықешова – Инженерлік-бейінді зертханасының ғылыми қызметкері, Сәтбаев Университеті; e-mail: a.aslmasovna@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-6517-6933.
Krisztina László – Физикалық химия және материалтану кафедрасы, Будапешт технология және экономика университеті; e-mail: laszlo.krisztina@vbk.bme.hu. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4499-3983.
Жакпар Маратович Жандосов – Химия ғылымдарының кандидаты, Жану мәселелері институтының ғылыми қызметкері; e-mail:jandosovj@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3842-4397.
Сейтхан Азат – PhD, профессор, Инженерлік-бейінді зертханасының жетекшісі, Сәтбаев Университеті; e-mail: s.azat@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4131-0905.

Сведения об авторах

Махаббат Сейт-Задаевна Кунарбекова*– доктор философии, научный сотрудник лаборатории инженерного профиля, Сатбаев Университет; e-mail: m.kunarbekova@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8640-0667.
Акерке Алмаскызы Каныкешова – научный сотрудник лаборатории инженерного профиля, Сатбаев Университет; e-mail: a.aslmasovna@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-6517-6933.
Krisztina László – кафедра физической химии и материаловедения, Будапештский университет технологии и экономики; e-mail: laszlo.krisztina@vbk.bme.hu. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4499-3983.
Жакпар Маратович Жандосов – ВНС, Институт проблем горения; e-mail:jandosovj@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3842-4397.
Сейтхан Азат – PhD, профессор, руководитель лаборатории инженерного профиля, Сатбаев Университет; e-mail: s.azat@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4131-0905.

Received 30.03.2026
Revised 25.05.2026
Accepted 26.05.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-75

ҒТАХР: 31.17.15

CC BY 4.0
Check for updates

Т. Мұқатаева[1], А. Нұршәріп[2], А. Сатаева[2], Ж. Жандосов[3], А. Байменов[2]*
[1]Farabi University,
050040, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Әл-Фараби даңғылы,71.
[2]Satbayev University,
050013, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Сатпаев көшесі, 22.
[3]Жану Мәселелері Институты,
050012,Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Бөгенбай батыр көшесі, 172.
*e-mail: alzhan.baimenov@satbayev.university

СУДАҒЫ АУЫР МЕТАЛЛ ИОНДАРЫН ТАЗАЛАУҒА АРНАЙЫ MXENE ВАКАНСИЯЛЫҚ ИНЖЕНЕРИЯСЫ: МЕХАНИЗМ, СИНТЕЗ ЖӘНЕ ҚОЛДАНЫСЫ

Аңдапа: *Ауыр металдардан ластанған су ресурстары қазіргі замандағы ең ауқымды мәселесіне айналған, сол үшін ауыр металдарды судан тазартуға арналған жаңа және эффективті материалдарды ойлап табу керек болады. Ғалымдар екі өлшемді өтпелі металл карбидтері мен нитридтерін (MXenes) жақсы адсорбент санағанымен, бұл материалдың бастапқы үлгілерінде табиғи құрылымдық дефектілер жиі кездеседі. Материалдың толық потенциалын ашуға кедергі жасап отыған – нанопарақтардың бір-біріне жақын орналасып қабаттасуы және бетіндегі активті*

©Т. Мұқатаева, А. Нұршәріп, А. Сатаева, Ж. Жандосов, А. Байменов, 2026

орталықтардың аз болуы. Осы мақалада вакансиялық инженерияның металл (VM), көміртек/азот (VX) және беткі терминалдық вакансиялардың (VTx) ауыр металдарды тазалау кезіндегі рөлі мен механизмін ашып айтамыз. Атомдардың байланысы мен электрондық құрылымын арнайы модификациялау арқылы біз вакансиялық дефектілерді қабаттардың жабысуын азайтуға ғана емес активті термодинамикалық тұзақ ретінде жұмыс істетуге де болады. Қолдан жасалған атомдық дефектілер электрондардың бір жерге топтасып қайта таралуына әкеледі және бұл құбылыс ауыр металдармен байланыс орнатудағы Гиббс энергиясы айтарлықтай азайтады. Осындай қолдан жасалған дефектілер материалды актиытендіріп оның адсорбциялық қабілетін бірнеше есе арттырады(мысалы, Pb^{2+} үшін >400 мг/г) және судағы Cr^{6+} сияқты ауыр металдардың өздігінен тотықсызданауына әкеледі. Біз бұл мақалада құрылымдық ақауларды дәл енгізетін жаңа синтездеу технологияларын егжей-тегжейлі талқыладық. Зерттеу соңында өнеркәсіптік үлкен көлемдік шығару мен ұзақ уақытқа сақталу мәселелерін ескерте отырып таза су сүзгілеріне арналған жаңа буын MXene материалдарын жасап шығарудың стратегиялық бағытын ұсынамыз.

Түйін сөздер: *MXene, ауыр металл, адсорбция, вакансиялық инженерия , су тазарту.*

1. Кіріспе

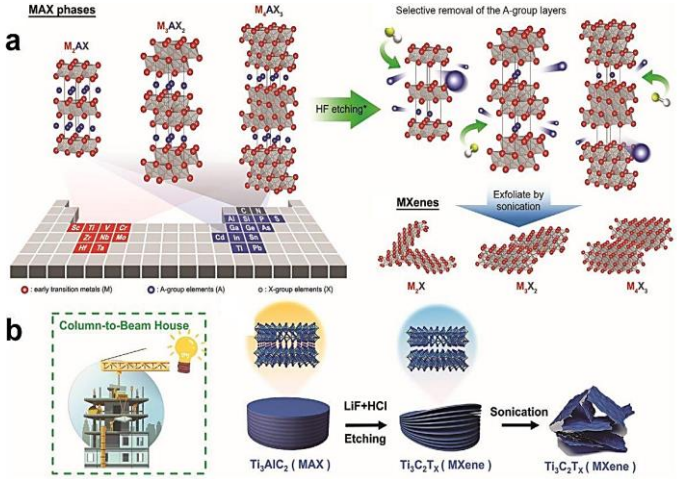
Ауыл шаруашылығы және өнеркәсіп дамуынаның кесірінен әлемдегі су ресурстары ауыр металдармен қатты ластанып жатыпр, бұл табиғаттағы жануарлар үшін де және адам денсаулығына да қатты қауіп төндіреді.[1]. Гидросфераны 1 жылда шамамен 2,4 миллион тоннадай әр түрлі ауыр металлдар ластайды оның ішінде әсіресе As, Cd, Pb және Hg сияқты ауыр металдарды айтуға болады [2, 3].Осындай ауыр металдар табиғи жолмен ыдырамайды және теңізге жақын аудандарда биомагнификация құбылысы пайда болады [4, 5]. Мысалы қауіпті нейротоксин болып саналатын қорғасынның мөлшері 5 мкг/л (5 ppb) төмен болсада да балаларда қайтымсыз неврологиялық ауруларға шалдықтыруы мүмкін, ал ересектерде жүрек қантамырларының созылмалы ауруларына шалдықтыруы мүмкін, сондықтан ауыр металдардың концентрациясын төмендететін заманауи шешімдер табу қазіргі өзеті тақырыптардың бірін [9, 10].

Химиялық тұндыру, ион алмасу және кері осмос сияқты тазарту әдістерінің жұмыс істеу уақыты және құны жоғары сияқты көптеген шектеулері мен проблемалар бар [11, 12]. Төменгі концентрациялы ластауыштары бар ағынды сулардың ірі көлемін өңдеу кезінде осы әдістердің тиімділігі айтарлықтай төмендейді, сонымен қатар бұл энергия шығыны, қалдық тұнбаларының артуы және көп иондық ортадағы сорбенттердің селективтілігінің әлсіреуі сияқты проблемалар тудырады [11-13]. Қазіргі уақытта коммерциялық активтендірілген көмірлер Pb^{2+} иондарын адсорбциялау кезінде орташа сыйымдылығы (шамамен 80-120 мг/г) мен масса алмасу кинетикасының баяу болуы себебінен су сапасына қойылатын талаптарды толық қамтамасыз ете алмайды [11, 14]. Осы технологиялық кемшіліктердің салдарынан жоғары сорбциялық қасиетке ие 2D наноматериалдарды зерттеу жұмыстарына ғалымдар көп қызығушылық танытып жатыр, себебі олар табиғатты қалпына келтіру жұмыстарына атомдық деңгейде тиімді шешімдер ұсынады [11, 12].

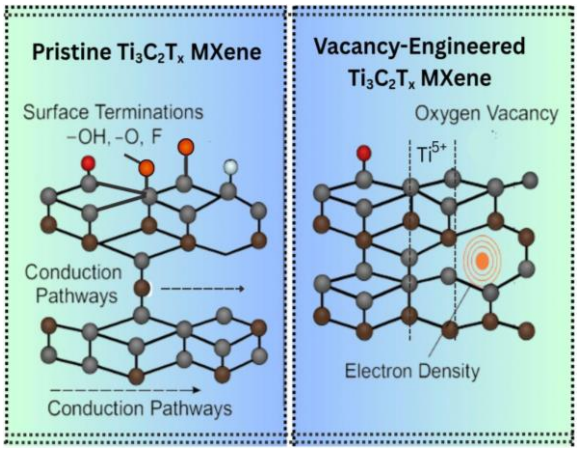
2011 жылы MXenes (өтпелі металл карбидтері/нитридтері формуласы $M_{n+1}X_nT_x$) материалының ашылуы су тазалау саласында көптеген жаңалықтар әкелді [15-17]. Сурет-1де көрсетілгендей, жоғарыдан төменге (top-down әдісі) қарай синтездеу тәсілі ең алдымен фторсутек қышқылын (HF) (1a) немесе in situ фторсутек қышқылы (HF) (1b) түзуші реактивті қолдана отырып, бастапқы MAX фазасынан A қабаттарын ерітіп алып содан кейін 2D наноқабықшаларға бөлуге арналған ультрадыбыстық деламинация процесі көрсетілген. Бұл қосылыстар кәдімгі металдарға тән жоғары электрөткізгіштік (Ti3C2Tx үшін >20 000 См/см), табиғи гидрофильділік және де бірнеше түрлі беткі терминациялармен (−O, −OH, −F) ерекшеленеді [16, 18-20]. MXene-дердің қабатты құрылымы иондық байланыстар үшін өте үлкен беттік ауданды қамтамассыз етеді, олардың теориялық беткі ауданы мен ион алмасу қабілеттері дәстүрлі көміртекті немесе минералды сорбенттерге қарағанда әлде қайда жақсырақ болып келеді [21-23]. Дегенмен, бастапқы MXene-дерді тәжірибеде қолданудың өзіндік қиындықтары да бар, мысалы ішкі активті центрлерді бітеп тастайтын наноқабықшалардың қайта жабысып қалуы [15, 18, 24, 25], соған ұқсас олардың тотығуға төзімсіздігі сулы ортада тұрақты жұмыс жасауына кедергі келтіреді [18, 26, 27].

Осы кедергілерді жеңудің бірде бір жолы арнайы вакансиялық ақаударды кіріктіру, бұл MXene кристал торындағы атомдарды жасанды түрде алып тастау сияқты амалдар жасау[30]. Металл (VM) немесе көміртек/азот түйіндеріне (VX), бос орындарды енгізу арқылы ғалымдар

қалыптасқан электрондық тепе-теңдікті бұза отырып иондық қақпа деп аталатын координациялық қанықпаған аймақтар жасайды [31]. Бұндай ауытқулар активті орталарды арттыра түсіреді [32]. Осылайша жасанды вакансиялармен модифткацияланған MXene-дер қарапайым MXene-дерге қарағанда селективтілігі артады [30, 32]. Сурет-2де арнайы вакансиямен модификацияланған және қарапайым MXene-дердің құрылымдық сызбалары көрсетілген.



Сурет 1 – a) Әртүрлі құрамдағы MAX-фазаларынан алынған MXene наноқабықтар синтездеудің дәстүрлі әдісі [1]; b) Ti3C2Tx мембранасын алу процесі [2]



Сурет 2 – Қарапайым (pristine) және вакансиялық Ti3C2Tx MXene-дерінің құрылымдық сызбалары. [3]-әдебиеттен бейімделіп алынды

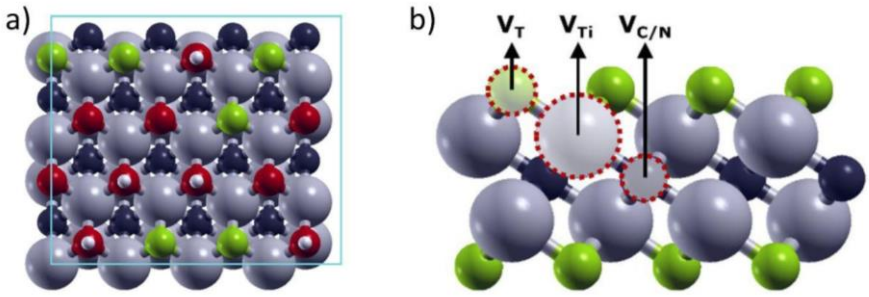
Бұл мақалада ауыр металл иондарының адсорбциясына арналған модификацияланған MXene материалдарындағы белсенді центрлерді дизайндеу мен қолданудағы соңғы жетістіктер талданады [34, 35]. Олардың ішкі құрылымдары, қасиеттер және өнімділігі арасындағы байланыстарға талдау жасалды. Әсіресе, d-белдеуі мен оқшауланған электростатикалық градиенттерді баптау сияқты атомдық деңгейдегі механизмдеріне дейін зерттелді [36]. Одан бөлек құрылымдық дефектілер топологиясын басқарудаға синтездеу әдістердің потенциалы қарастырылды. Нақты результаттарды теориялық модельдеумен байланыстыра отырып [1] бұл мақалада MXene негізіндегі сорбенттерді нақты дизайндеудің фундаментін қалауды көздейді. Нәтижесінде қоршаған ортаны қалпына келтірудегі мәселелерді шешудегі және болашақ бағыттарын көрсетеді.

2. MXene Және Вакансия Инженерия негіздері

2.1 MXene құрылымы және химиялық қасиеті

MXenes – A қабатын (әдетте Al немесе Si) еріту арқылы MAX фазадан ($M_{n+1}AX_n$) алынатын 2D өтпелі металл карбидтері мен нитридтері [37]. Олардың жалпы формуласы $M_{n+1}X_nT_x$ (n=1-4) ішінде өтпелі металл (M) қабаттары (Ti,V,Nb,Mo және т.б.) және функционалды топтары бар (Tx=−O,−OH,−F) (Сурет-3a), сондай-ақ көміртек/азот (X) тізбектері өзара байланысып сэндвичтік құрылым түзеді. Сыртқы пішіні баян аспабындай көпқабатты

морфологиясы 0,4 нм-ден 1.2 нм-ге дейінгі ара қашықтықта болады. Иондарды тасымалдауға идеалды каналдары бар және ластаушы заттарды тиімді фильтрлеуге болады [38].



Сурет – 3: a) функционалды топтары бар MXene; b) негізгі атомдық ақаулардың сызба-нұсқасы: функционалды топтар (VT), титан (VTi) және көміртегі/азот (VC/N) вакансиялары [4]. Ti-сұр, C-қара, F-жасыл, O-қызыл, H-ақ

MXene-нің беттік химиялық қасиеттері оның ауыр металдарды ұстап алу қабілеті үшін маңызды, себебі теріс зарядталған оттек тобы катиондардың (Pb^{2+}, Cd^{2+}, Cu^{2+}) физикалық сорбциясына жағдай жасайды[38]. MXene ішіндегі өтпелі металдардың (Ti, V, Cr) бос d-орбитальдары ауыр металдармен берік координациялық қосылыстар түзе алады және олардың байланыс энергиясы өтпелі металдың қаситіне қарай өзгереді [3].Мәселен, тығыздық функционалы теория (DFT) зерттеу нәтижелеріне сүйенсек зарядты тасымалдау қабілетінің күшеюі Cr2C(-2,10 эв) қосылысының Ti2C (-1,98 эв) материалымен салыстырғанда Cd^{2+} ионының адсорбциялық қасиетін күшейте түскен [40]. Сонымен қатар MXene материалы келесі ерекше қасиеттерге ие: өзгермелі беттік топтар, механикалық икемділік және гидрофильділік, осылардың бәрі оның су тазалау кезіндегі идеалды көпфункционалды материал болуына жағдай жасайды [37, 38].

2.2 Вакансиялардың сипаттамасы мен жіктелуі

Өтпелі металдардың ішкі кристалдық торындағы бос орындары тікелей құрылымдық ақауларды басқарады, ал метал вакансиялары(VM) электрон тасымалын және беттік химосорбцияны қолдайды. Ti3C2Tx және Ti2CTx MXene-дердегі VTi негізінен HF қышқылымен жоғары қышқылдық ортада өңдеу кезінде немесе синтезден кейін жоғары температурада күйдіру кезінде пайда болады. Бұл вакансия орталықтарда электрондары аз болғандықтан, металл-тірек әрекеттесу (Metal-support interaction) арқылы жалғыз атомды катализаторларды (Single-atom catalysts) жақсы бекітеді[41]. Бұндай құбылыс Mo мен V жүйесінде байқалады: металл атомдары мезокеуекті құрылым түзе отырып катиондар концентрациясын арттырады, соның нәтижесінде материалдың псевдосыйымдылығы өседі [42]. VM-дан бөлек көміртек немесе азот қабаттарына аниондық вакансиялар (VX) материалдың физикалық қасиеттерін басқарудағы орны ерекше болып келеді. Nb2C және Ti3C2Tx MXene-дердегі көміртекті вакансиялары (VC) электрөткізгіштікті арттыратынын есептеулер мен тәжірибелер арқылы дәлелденді [43]. Ферми деңгейінің маңайында шоғырланған жеке күйлерді қоздыру нәтижесінде пайда болған аниондық ауытқулар электрохимиялық циклдің заряд тасымалдау жылдамдығын арттыруға көмектеседі [43].

Ішкі кристалдық тордан тыс беттік терминалдық вакансиялар (VTx) оттек, гидроксил немесе галоген топтары кез келген комбинациясынан тұрады, немесе оны қолдан жасап мақсатты түрде алып тастауға болады [44].Оттек вакансиялары (VO) жоғары тотығу процестері (AOP) және фотокатализдегі орны бөлек. Себебі олар активті молекулалардың тұрақтануы үшін идеалды орындар дайындап береді сонымен қатар тыйым салынған аймақты кішірейтіп жарықтың жұтылуына жағдай жасайды [30].i-MXene атты материалда рандомды ерітуден пайда болған ретсіз вакансиялардан жоғары дәлдікпен реттелген қуыстарға (мәселен, i-MAX фазаларынан өндірілген Mo1.33C) жету бұл вакансия инженериясындағы бір үлкен бетбұрыс деп айтуға болады. Бұндай идеалды тізілген вакансиялар тізбегі жоғары құрылымдық беріктікті қамтамасыз ете отырып қана қоймайды, ол интеркаляцияланатын иондардың диффузиялық жолдарын оңтайландырып берген сонымен қатар жоғары жылдамдықты энергия сақтау құрылғыларында басқа MXene материалдарға қарағанда мықты

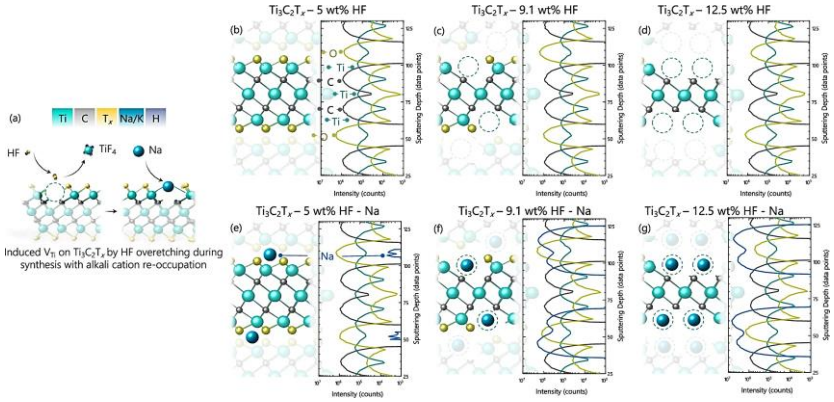
екенін дәлелдеген [42]. Сонымен қатар көміртек вакансия желісі (CVL) сияқты жоғары өлшемді ақаулар Ti2CO2 сияқты жартылай өткізгіш MXene-дердегі анизотропты оптикалық және магниттік қасиеттерін реттейтін маңызды құралға айналған[30].

3. Вакансиялық инженерия үшін синтездеу стратегиялары

3.1 Жоғарыдан-төмен: реттелген ойып өңдеу және прекурсор дизайны

MXene-дердегі бос орын инженериясының жүзеге асуы негізінен атом қабаттарының сәтті аршылу мен M−X қаңқасының беріктігіне тікелей тәуелді. Дәстүрлі Фторсутек қышқылымен (HF) еріту әдісі қышқыл концитрациясы мен уақытын теңшеу арқылы вакансия тығыздығын өзгертеді, бұл әлі де негізгі әдіс болып табылады. Жоғары концентрлі HF қышқылымен MXene-ді ұзақ уақыт өңдеу барысында тек A-қабатындағы атомдарды ерітіп қана қоймай олмен қоса бірге өтпелі металл (M) атомдарын да жұлып әкетеді.Осылайша оқшау бос орын кластерлер немесе толық бос орын кластер жасауға болады. Мысалыға, рентгендік жұтылу спектрлерінің төменгі энергетикалық белдеуінің қарқындылығы сатылап өсуінен байқауға болады, ал HF үлесін 5%-дан 30%-ға дейін көбейтсек бұндай өзгеріс айқындай түседі[45].

Құрамында HF үлесі басым қоспа нысаналы түрде құрылым ақауын тудыруға болатынын тәжірибе жүзінде дәлелденген. Сурет-4b–d нұсқаларында 5; 9,1 және 12,5 масс.% HF ерітіндісімен өңделген $Ti_3C_2T_x$ MXene үлгілерінің SIMS(Secondary-ion mass spectrometry) нәтижелері берілген, мұнда қышқыл мөлшері артқан сайын VTi қоса көбейеді. Ti атомдарын таңдап отырып алып тастау координациялы қанықпаған нүктелер пайда болады. Сурет-4e–g де Na модификацияланған MXene-дердің SIMS нәтижелері көрсетілгендей VTi-ның сілтілік метал катиондарды жақсы бекітеді. HF-дың концентрациясын қоса берсек бос орындардың концентрациясы артады, солай беттік зарядтарды қайта орналастырып адсорбция потенциалын арттыра аламыз.



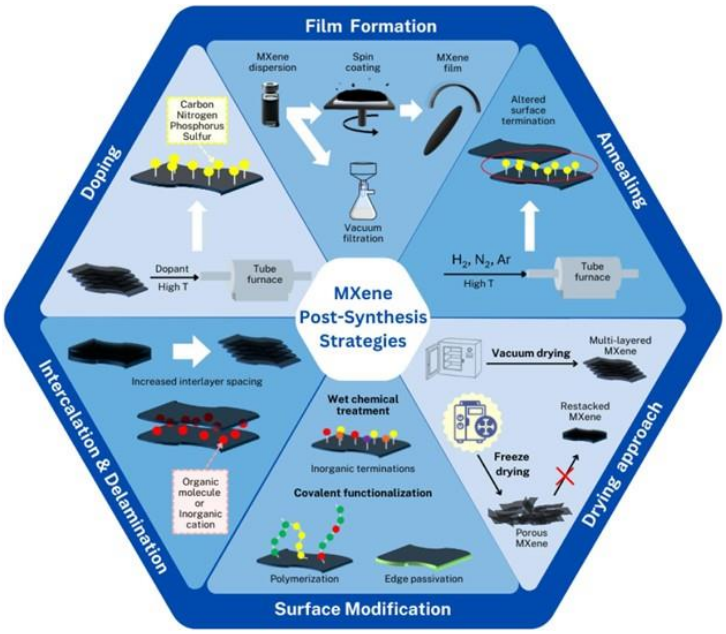
Сурет 4: a) HF-тің жоғары концентрациядағы ақаулардың түзілу механизмі b-d) Тиісінше 5; 9,1 және 12,5 масс.% HF көмегімен синтезделген Ti3C2Tx MXene-дерінің SIMS нәтижелері. E-g) Тиісінше 5; 9,1 және 12,5 масс.% HF көмегімен синтезделген, Na-мен модификацияланған Ti3C2Tx MXene-дерінің SIMS нәтижелері [5]

Тағыда бір озық синтездеу әдісі ол (V1−xCrx)2AlC төрттік қатты ерітінді типті MAX фазаларын дайындау.Бұндағы V мен Cr элементтерінің химиялық тұрақтылықтар әртүрлі болып келеді, Al қабатын еріте отырып, Cr атомдарын да қоса таңдап отырып ерітіп алуға болады, соңында идеалды дизайндалған бос орын концентрациялары мен нақты кеуек құрылымдарына ие ванадий негізді MXene алуға болады [47]. Осындай бастапқы прекурсор көмегімен арнайы вакансия қозыдыру әдісі, кеңістік біртектілік жағынан радомды беттік еріту әдісінен әлде қайда артық, өйткені бос орын тығыздығы MAX фаза қатты ерітіндінің стехиометриялық үлесі арқылы алдын ала шешіліп қойған.Оған қоса, in-situ HF қышқылын өндіретін LiF/HCl жүйесі құрылымның ыдырау қауіпін мейлінше азайтады. Бұл қадам ерекше беткі топтардың (Tx) пайда болуына түрткі бола келе жалғасты вакансия пайда болуына икемді және басқарулы жағдай жасап береді [48].

3.2 Синтезден кейінгі амалдар

Синтездеу процесінен тыс сурет-5тегі сызбада көрсетілгендей сыртқы энергия өрістерін пайданала отырып атомдық ығысу мен десорбциялауға кедергі жасайтын тосқауылдарды жеңе отырып MXene-нің беттік химиялық табиғатын өзертуге мүмкімдік береді

[49, 50]. Осы ретте плазмамен атқылау немесе иондық сәулемен тозаңдату сияқты жоғары энергиялы кинетикалық амалдар құрылымдық өзгерістер туғызу кезінде өте тиімді [51]. Әсіресе ауыр иондармен жұмыс істейтін төменгі қуатты қондырғылардың көмегімен MXene-нің бетіне наноқұрылымдар мен өздігінен құралатын пішіндерді қалыптастыру болады. Мұндағы катализ белсенді орталықтардың тығыздығын тікелей ион шоғырының энергиясына байланысты [52]. Бұдан тыс электронды сәулелендіру технологиясы беттік функционалды топтар мен ақаулар топологиясын бір уақытта өзерте алады.



Сурет 5 – MXene-ге арналған синтезден кейінгі ақау инженериясының стратегиялары. [6]-әдебиеттен рұқсатпен бейімделіп алынды

Атомдық деңгейдегі микроскопиялық зерттеулердің дәлелдеуінше электрондық сәулелендіру Ti3C2Tx кристалдық торындағы кейбір химиялық байланысты таңдап бұзып арқылы идеалды вакансиялар жасауға болады [43]. Радиациядан басталған кристаллографиялық ауытқулар фотокатализге керекті адсорбциялық зонаны кеңейтіп қана қоймай ең бастысы жұтылу шегін қызылға ығыстырып жақын инфрақызыл аймағына қарай апарады (e.g., ~800 нм -1100 нм) [53] омен қоса қабатаралық d-кеңістігін үлкейтеді (~0.98 нм-ден 12.5 Å-ге дейін) [54], сөйтіп тосқауылдарды азайту арқылы ион тасымалын жақсартады. Мүлдем басқа термодинамикалық заңдылықтарға сүйене оытырп термиялық өңдеу (700-1000°C) арқылы ретсіз бос орындарды реттіге айналдыра аламыз, Ti3C2Tx пленкалардың реттелген фазаға өтуі осыған айқын дәлел бола алады [37].

Ал төменгі температурада көбінесе 200°C төңірегінде өтетін өңдеу амалдары беткі терминалдық топтардың стехиометриялық үлесін өзгерте алады. Мұндай термиялық экстракция алдымен белгілі кейбір функционалдық топтарды ұшырып жіберіп псевдовакансия болатын оттекті терминалдарды (−O) көбейтеді. Нәтижесінде материалдың электрохимиялық белсенді беттік көлемін ұлғаяды, ал соның әсерімен меншікті сыйымдылығы 1.98 есе артады [55]. Тұтастай алғанда жалпы электрокатализдік қасиетті айтарлықтай өседі [37, 49]. Плазмалық/иондық бомбалау, электрондық шоқпен сәулелендіру (EBI) және термиялық өңдеуді қамтитын физикалық әрі термодинамикалық өңдеу әдістері ерекше ақаулар топологияларын (мысалы,VM,VX және VTx) қалыптастыра алады. Бұл локальді құрылымдық модуляциялар MXene-дердің физика-химиялық қасиеттерін реттей отырып артынша олардың электрокатализдік және энергия сақтау қасиеттерін арттырады.

3.3 Төменнен жоғары: газ фазасынан химиялық тұндыру және атомдық құрастыру

MXene-ді химиялық бу тұндыру (CVD) шаблондық өсіру (template-assisted growth) арқылы төменнен жоғары синтездеу атомдық деңгейдегі ақауларды дизайндеудің ең өзекті технологияларының бірі. Дағдылы жоғарыдан төмен (top-down) аршумен салыстырғанда CVD

амалы MAX-фазаның құрылымдық шектеулерін айналып өтіп сапалы MXene пленкаларын тікелей өсіруге болады [44]. CVD барысында прекурсорлардың химиялық потенциалымен мен өсу температурасын басқару арқасында қажетті вакансияларды мақсатты түрде қалыптастыруға боалды, мәселен бу фазасындағы көміртек пен металл үлесін өзгерту арқылы электрондық құрылымы мен магнетизмге өзгеріс әкеле алатын VC жасауға болады [56]. Керісінше тұзды қалыптар немесе балқытылған тұз синтезі сияқты шаблондық тәсілдер морфология мен вакансияларды басқаруға еркіндік береді [57]. CVD көмегімен MXene бетіне көміртекті нанотүтікшелері сияқыт екіншілік құрылымдар өсіріп беттік ақаулар мен координациядық бос орындар тудыруға болады [58]. Төменнен жоғары тәсілдерінің басты дәлдігі газ және қатты дене шекарасындағы өсу кинетикасын басқару қабілеті. Бұл әдіс ылғалды химиялық ерітуде жиі пайда болатын тотығу мен құрылымдық ыдырауды мейлінше азайтып вакансияға бай MXene-дерді өндіруге толық кепілдік жасайды.

3.4 Вакансиялық эволюциясының динамикасы

MXene құрылымындағы вакансиялар динамикасын нақты тануға және оны сандық бағалау үшін статикалық талдау шектеуінен шығып, in situ характеристикалық анализдер жасау керек болады [59]. Синхротронды рентгенд жұтылудың жұқа құрылымыды спектроскопиясы (XAFS) әдісі нақты уақытта координация ортасын зерттейтін бірде бір әдіс, мұнда химиялық еріту (etching) барысында өтпелі металл атомдарының (мәселен, Ti-C немесе Mo-C қабықшалары) координациялық санының (N) күрт төмендеуі тікелей металдық немесе көміртек вакансияларының пайда болуымен байланыстырады [59, 60].Осы пікірді толықтыру үшін аберрация түзетілген сканерлеуші трансляциялық электрондық микроскопия (AC-STEM) суб-ангстромдық (көбіне 0,1 нм-ден кем) ажыратымдылық бере алады, атомдық деңгейдегі нүктелі қуыстар мен олардың Ti3C2Tx жазықтығындағы кеңістіктік таралымын көрсетеді[43]. Деседе MXene торындағы электрондар шоғының жалған рәсімін азайту үшін позитрондық аннигиляциялық спектроскопиясы (PAS) көбірек қолданысқа еніп жатыр, бұл әдістің артықшылығы ол құрылымды бұзбай ақ 0,1-10 ppm жиіліктегі вакансиялар кластерін байқайды. Қосымша in-situ Раман спектроскопиясы фонондардың оқшаулану аса сезімтал боп келеді, A1g немесе Eg симметриясының қозуы терминалдық вакансиялар (VTx) себепкер болған тор деформациясына ақпарат бере алады [59]. Аталған тәсілдердің өзара салыстырмалы сипаты және вакансияларды сезу қабілеті мен шектеулері Кесте 1-де берілген.

Кесте 1 – MXene Вакансиялық орындарды талдауға арналған әдістер

Әдіс	Әдіс туралы Ақпарат	Вакансияға сезімталдығы	Шектеулері
Түзетілген STEM	Вакансиялардың атомдық деңгейдегі кескіні таралу картасы	Жеке вакансияны анықтау	Үлгі қалыңдығының шектеулері, электрондық сәуледен зақымдану артефактілері
Синхротрондық XAS	Тотығу дәрежесі, координациялық сан, локальды құрылым	~1 ат%	Эталондық стандарттарды қажет етеді, тек кристалды аймақтармен шектеледі
In-situ Раман спектроскопиясы	Фонондардың шектелуі, дефектілерден туындаған режимдер	~0.1%	Пиктердің қабаттасуы, тек беткі қабатқа сезімталдық
Позитрондық аннигиляция	Вакансиялар кластерінің өлшемі, концентрациясы	0.1-10 ppm	Көлемдік сезімталдық (bulk)
XPS валенттік зонасын талдау	Ферми деңгейіне жақын дефектілік күйлердің тығыздығы	Беткі вакансиялар	Ультражоғары вакуум талап етіледі, беттің ластану мәселелері

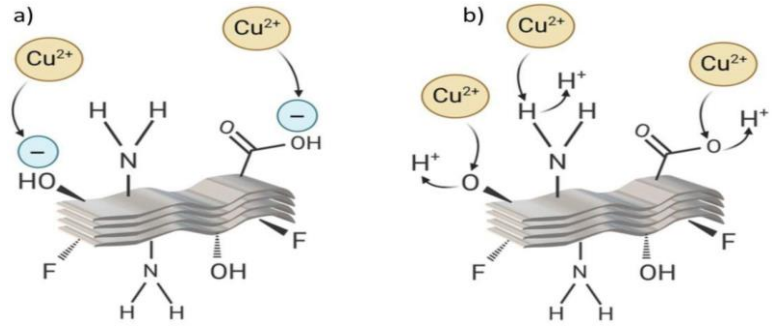
Тәжірибе мен тығыздық функционалы теориясын (DFT) тоғыстыра отырып ақаулар топологиясын мен материалдың электрохимиялық немесе катализдік қасиеттері неге күрт өскеніне түсінік алуымызға болады [49, 61].

4.Адсорбция механизмі және құрылым

4.1 Физикалық және химиялық адсорбциялар

MXene кристал торындағы бос қуыстары адсорбциялық табиғатын түбегейлі өзгертіп дәстүрлі физикалық сорбцияның кештеулерінің шегінен шығуға мүмкіндік туғызады [62].

Координациялық химияға сүйенсек кристалл торындағы атомдарды жұлып алу координациялық қанықпаған орталықтарды (CUS) түзеді, бұл нүктелер электрон тығыз аумақтарда немесе ішкі құрылымда куыс тудыра отырып, иондарды жақсы ұстайтын тұзақ құрады [63]. Бұндай центрлер ауыр металлдарды идеалды бетке қарағанда жақсы ұстайды. Бұл құбылыс Сурет-6a-да көрсетілген MXene бетіедегі теріс заряд пен ауыр металл катиондары арасындағы кулондық тартылысқа негізделген электростатикалық әрекетесу. Ал Сурет-6b-да өтпелі металл иондарының бос d-орбитальдары мен беткі функционалдық топтардың электрон жұптары өзара қабаттасып электрон тығыздығының қайта таралуы арқылы комплекс түзуі көрсетілген [64].Осындай жағдайда адсорбциялық изотермаларды беткі энергетиканы анализдеуге сенімді диагностикалық өлшем бола алады. Ленгмюр моделі белсенді нүктелердің біркелкі таралуын негізге алғанымен, кездейсоқ вакансиялардың енуі көбіне энергетикалық гетерогенділікке әкеп соғады. Есесіне Фрейндлих моделі осындай ақаулы беткейлердегі көпқабатты, гетерогенді адсорбцияны сипаттауға қолайлы болып келеді [65]. Жеке 2 валентті катиондарды ұстаудағы 400 мг/г шамасынан асатын сыйымдылық ол тікелей вакансиялық инженерия көмегімен меншікті ауданды көбейтудің және заряд таралымын көмегімен жүзеге асқаны айқын [62, 65].



Сурет 6 – MXene бетінде ауыр металдардың адсорбциялану механизмдері:
a) электростатикалық тартылыс, b) беттік комплекс түзу. [7]-әдебиеттен рұқсатпен бейімделіп алынды

4.2 Тотығу-тотықсыздану механизмдері және электронды тасымалдау динамикасы

MXene вакансиялары оның ішкі электрондық белдеулерін тотығу-тотықсыздану механизміне қарай ыңғайландырады. Материалдың атомдық торында металл немесе көміртек вакансияларының пайда болуы оның ішкі энергиясын өзгертіп, d-белдеуінің орталығын Ферми деңгейіне жақындатады. Бұл құбылыс материалдың катализдік әрі тотықсыздандыру күшін арттырады [67]. Аса қауіпті қосылыстарды түзетін Cr(VI) немесе Sb(V) иондарын бейтараптандыру барысында вакансиялық орындар, беткі электронның шығу жұмысын төмендетіп, электрондар үшін оксианиондарға қарай «төте жол» салып береді [68], [69]. Бұл процесті түсіну үшін жүргізілген тығыздық функционал теориясының есептеулері беткі жазықтықта вакансиялардың болғандығы, Cr(VI) ионын тотықсыздандырудың шешуші сатысында Гиббстің еркін энергиясын (ΔG) төмендейтінін көрсетті [70]. Нәтижесінде әдетте кинетикалық кедергісі болуынан баяу жүретін реакция өздігінен әрі жылдам жүретін термодинамикалық тиімді процеске айналады. Бұл электрондар тасымалының үдеуі тотықсыздануды тездетіп қана қоймай, ластағыш заттардың төмен валентті күйінде MXene бетінде иммобилизациялайды [68, 70].

4.3 Функционалды топтардың өзара әрекеттесуі

Құрылымдық қуыстар жеке белсенді нүкте ретінде хемосорбцияның беттік терминалдарға (−OH,−F,−O) синергетикалық ықпал ету арқылы басқара алады [59, 61]. Кристалдық торда вакансияның ашылуы MXene бетінде қалыптасқан потенциалды бұзып көршілес функционалдық топтардың поляризациялануына және олардың реактивтілігін артырады [59].Дәлірек айтсақ терминалдық вакансия (VTx) маңайдағы гидроксил топтарының депротондалуын тездетіп беттің нуклеофильдік қасиетін күшейтеді де, ауыр металдармен тұрақты ішкі сфералық комплекс түзеді [71]. Бұдай комбинация қос түйінді механизмді(dual-site mechanism) іске қосады, мұнда вакансия құрылымдық бекіту міндетін атқарып поляризацияланған функционалдық топтар координациясын күейтеді [61]. Мұндай

көпвалентті өзара әрекеттесу көпкомпонентті күрделі сулы ортадағы түрлі ластағыш қоспаларды селективті жоюға көмектеседі.Себебі дәстүрлі адсорбенттер көбінесе бәсекелес тежелуге шалдығады [71].

4.4 Қабат аралық ұстау және иондық диффузия кинетикасы

Вакансиялық инженерияның құрылымдық салдары MXene пластиналары арасындағы наноөлшемді саңылауларға дейін таралып, ион тасымалдау мен диффузия кинетикасында маңызды рөл атқарады [72]. Бос орындар наноқапарақшалардың өзара қайта жабысуына (re-stacking) жол бермейтін құрылымдық тірек немесе аралық бөлгіш (spacers) ретінде әрекет етеді; осылайша қабатаралық d-қашықтықтың сақталуын немесе тіпті артуын қамтамасыз етеді [72, 73].

Бұл кеңею гидратталған иондардың жолындағы кеңістіктік шектеулерді (spatial constraints) азайтады және олардың ішкі белсенді ориалықтарға еркін және тез диффузиялануына мүмкіндік береді[73]. Сонымен қатар, қабатаралық вакансиялардың болуы диэлектрлік ортаны және осы аймақтағы су молекулалары арасындағы сутектік байланыс түрін түбегейлі өзгертеді [72]. Бұл құбылыс келетін иондардың ішінара сусыздануына әкелуі мүмкін – бұл процесс айтарлықтай энергияны қажет етеді, бірақ вакансиялар тудыратын жергілікті өріс арқылы жеңілдетуге болады [73]. Сол үшін, вакансиялы MXene-дегі иондардың диффузиялық коэффициенті (D) қарапайым MXene-дерге қарағанда бірнеше есе асып түседі.Бұл параметр қоршаған ортаның су тазарту жұмыстарына кепілдік береді [72, 73].

4.5 Қоршаған орта факторлары

Вакансиялық MXene-нің қасиеті сулы ортаның физика-химиялық факторларына тікелей тәуелді сондықтан олардың жұмыс қабілетін шынайы жағдайларда нақты қадағалаумыз керек. Ақаумен жасалған субстраттардың басты артықшылыға тиімді pH деңгейін ұлғайтады [71]. Егер бастапқы Ti3C2Tx катиондарды негізінен pH 4.0-7.0 аралығында ғана жақсы фильтрлей алса, вакансияға бай MXene-дер pH 3.0-ден 9.0-ға дейінгі арлықта да жақсы өнімділік көрсетеді[33, 71]. Бұл заңдылық нөлдік заряд нүктесінің (PZC) ығысуымен және вакансиялық нүктелердегі электростатикалық тартылысқа негізделеді[33]. Оксианиондарды (мәселен, Cr(VI)) фильтрлеу барысында VM маңындағы оң зарядтың шоғырлануы pH 2.0-4.0 деңгейінде де жоғары аффиндік көрсеткен, мұндай қышқылды ортада протондану әсері адсорбция процесіне көмектеседі [62].

pH тұрақтылығымен қоса құрылымында вакансиялық MXene иондық күші басым орталарда селектив болып келедң, ал бұл тұз өндірістен шығатын лас сулар мен теңіз суын тазартуда маңызды [71]. Фондық электролиттер концентрлі жүйелерде (Na^+ 10 800 мг/л және Ca^{2+} 400 мг/л) вакансиялы $Ti_3C_2T_x$ өзінің Pb^{2+} иондарын 89% тазалай алады , ал қарапайым түрі 45%-дан төмен [71, 74]. Мұндай жоғары талғампаздық тор вакансияларында түзілетін кешендердің термодинамикалық беріктігіне байланысты. Зарядты экрандауға сезімтал келетін сфералық кешендерге қарағанда ауыр металдармен қанықпаған вакансиялар арасындағы коваленттік байланыстар бәсекелес сілтілік және сілтілік-жер металдары катиондарының ықпалына төзімді [74]. Нақты нәтижелерге сүйенсек бір валентті бәсекелестерге қарағанда қос валентті ауыр металдарға арналған селективтілік коэффициенті ақаулар енгізу арқылы шамамен 10 есе өседі [71].

Бұдан бөлек атомдық вакансияларды кіріктіру мембраналық және статикалық адсорбция табиғи органикалық қосындылармен (NOM) бітелуді азайтады[75]. Ақаулар арттырған беткі гидрофильділік гумин қышқылы (HA) фильтрге жабыспауына көмектесетін гидратация қабық қалыптастырады [75]. Тәжірибе бойынша вакансия инженерленген беттер 20 мг/л HA шоғырланған ортаның 75%-дан астам нүктелерді ашық ұстай алады, ұқсас жағдайда қарапайым MXene-дер жартысынан көп активті нүктелерді жоғалтады [38, 75]. Ластануға төзімділік (анти-фоулинг) қасиеті органикалық қоспаларға бай сулы ортадағы масса алмасу кинетикасымен бірге вакансиялық инженерияның MXeneннің ішкі сыйымдылығын еселеп қана қоймай күрделі экологиялық жағдайлардағы тұрақты жұмыс жасауына кепілдік бере і[38].

5. Қолданудың практикалық мысалдары

5.1 Екі валентті ауыр металдардың иондарынан тазарту: Pb^{2+}, Cd^{2+} және Cu^{2+}

$Ti_3C_2T_x$ MXene-дегі вакансиялық инженерияның адсорбциялық қасиетіне деген ықпалы 2-кестеде көрсетілген.

Кесте 2 – Таза және вакансиялық-инженерлік Ti3C2Tx MXene-нің ауыр металдарды жою тиімділігін салыстыру

Металл ионы	Құрылымдық ерекшелігі	Адсорбциялық сыйымдылығының өсуі	Өсім	Модификация түрі	Сілтеме
Cr(VI)	Қос тотығу-тотықсыздану орталығы	11.5→18.5 мг/г	1.6 есе	Гетероқұрылымды қалыптастыру	[8]
Cu(II)	Қуыс микросфера	42.7 → 338.2 мг/г	7.9 есе	Вакансияларды пассивациялау және қоспалау	[9]
Pb(II)	Стандартты қабатты құрылым	56.7→ 77.0 мг/г	1.4 есе	Деламинация (қабаттарды жазу)	[10]
Hg(II)	$Ti_3C_2T_x$ Карбоксил-денген (-COOH)	60 мин → <1 мин	60 есе	Дефектілерді функционалдандыру	[11]

Мұнда бастапқы таза және вакансиялық жетілдірілген ауыр металл иондарын ұстап қалу қабілеті өзара салыстырылды. Адсорбциялық сыйымдылықтың бірнеше есе артуы құрылымға бос орындарды енгізу немесе функционалды түрлендіру арқасында орын алады. Мысалы, Cu(II) және Hg(II) иондарының біріншісінде, адсорбциялануы 42.7 мг/г-нан 338.2 мг/г-ға дейін артса, екіншісінде тазарту уақыты 60 минуттан 1 минутқа жетпейтін уақытқа дейін қысқарған. Ал Cr(VI) қосылысында, гетероқұрылымдық архитектураны қалыптастыру нәтижесінде 1.6 есе жоғарылағаны байқалды.

Қос валентті ауыр металл иондарын адсорбциялауда металл вакансияларын (VM) мақсатты түрде енгізу әдісі құрылымдарында вакансиялары болмайтын, мінсіз MXene-ге тән белсенді нүктелер тапшылығы мәселесін тиімді шешті [15]. Титан вакансияларымен модификацияланған $Ti_3C_2T_x$ нанопарақшалары Pb^{2+} иондарын сіңіру қасиетінің (әсіресе 500 мг/г-нан асатын) аса жоғары екендігін көрсетті; бұл көрсеткіш мінсіз MXene-дерге қарағанда (150-200 мг/г) шамамен үш есе артық [15, 71]. Мұндағы вакансиялық нүктелердің өлшемі Pb^{2+} иондық радиусына (1,19 Å) сәйкес келіп, оқшауланған координациялық орта қалыптастырады [71]. Осы екіөлшемді материалда вакансиялар көп болса, адсорбциялық энергетикалық тосқауыл (Eads) төмендеп, оның судағы улы заттарды 95%-ға дейін тазартуы небәрі 30 минутта жүзеге асады [33]. Жүргізілген, тығыздық функционалды есептеулері, VTi вакансияларының кадмий Cd^{2+} және мыс Cu^{2+} металл иондарын жай ғана ұстап қоймай, олармен байланыс энергиясы (E_b > 4,5 эВ) болатын берік химиялық байланыс түзетінін көрсетті. Түзілген тұрақты ішкі сфералық кешендер, судың жағдайы өзгерсе де, улы заттарға бөліп шығармайды [33, 74].

3-кестеде зерттеу нәтижелері көрсеткендей, ауыспалы металл карбидтеріне (нитридтеріне) жүйелі түрде ақауларды енгізу оның улы металдарды ұстау қабілетін бірнеше есе арттырады.

Кесте 3 – Ауыр металдарды жоюға арналған вакансиялық инженерияланған MXene-дердің өнімділігін салыстыру

MXene материалы	Вакансия түрі	Нысаналы ластаушы	Сыйымдылығы (мг/г)	Жою тиімділігі (%)	Регенерация циклдері	Сілтеме
Cr_2CO_2	Реттелген C-вакансиялары	Hg^{2+}	420	98% (50 ppm)	10 цикл@95%	[12]
Ti_3C_2Tx-Mo	Mo-вакансиялары	Pb^{2+}	460	99% (100 ppm)	12 цикл@94%	[13]
Mo_2C	Жоқ	Cd^{2+}	210	82% (50 ppm)	5 цикл@75%	[14]
V_2C	V-вакансиялары	Cr6+	370	95% (initial conc.)	8 цикл@90%	[15]
Ti_2C	Ti-вакансиялары	Ni^{2+}	315	87% (50 ppm)	7 цикл@80%	[16]
Cr_2C	Cr-вакансиялары	As^{3-}	389	92% (10 ppm)	6 цикл@88%	[17]
Zr_2C	Zr-вакансиялары	Cu^{2+}	300	90% (100 ppm)	6 цикл@86%	[18]
Nb_2C	Nb-вакансиялары	Co^{2+}	340	89% (50 ppm)	4 цикл@84%	[19]

Металл иондарды байлайтын негізгі белсенді орталықтар болып табылады. Мысалы, сынап Hg^{2+} үшін: көміртек вакансиялары бар Cr_2CO_2 кешені 420 мг/г жоғары сыйымдылық пен 98%-дық тазарту деңгейін көрсетті. Бұл судағы сынаптың түгелге жуық жойылатынын дәлелдейді. Қорғасын Pb^{2+} үшін: Mo-вакансияларымен жабдықталған $Ti_3C_2T_x$ архитектурасында 460 мг/г сіңіру байқалды. Салыстырмалы түрде, мінсіз Mo_2C материалы небәрі 210 мг/г нәтиже көрсеткен. Вакансиялар максенді тек күшті етіп қана қоймай, оны көп рет қолдануға болатын және кез келген улы затқа икемделетін «ақылды» материалға айналдырады. Вакансиялары бар MXene-дер 6-12 айналымнан соң да өзінің бастапқы тиімділігін 85–95% деңгейінде сақтап қалады; бұл оларды қайт қолдануға болатындығының дәлелі. Қорытындылай келе, вакансияның түрін (Ti, V, Mo және т.б.) өзгерту арқылы, белгілі бір металды ұстайтындай етіп баптауға болады. Судың ластану түріне қарай, вакансиялық инженерия материалды икемдейді.

5.2 Көп валентті қосылыстар мен оксианиондардың трансформациясы: Cr, As және Sb

Вакансиялық технологияны енгізу көп валентті оксианиондарды ұстап қалуда маңызды рөл атқарады. Бұл иондар көп валентті болғандықтан, белсенді болып келеді және оларды ұстап қалу үшін тотығу-тотықсыздану мен хемосорбция механизмдерін қатар қолдану керек. Вакансиялық орындардың болуы механизмдердің жүруін жеңілдетеді [33]. Мысалы, улы алты валентті хромды Cr(VI) ерітіндіні тазарту кезінде беткі вакансияларда электрон тығыздығының жоғары болуы, оның белсенділігі азырақ Cr(III) күйіне тотықсыздандырады [87]. Жүргізілген зерттеулерде сәйкес [62, 87], MXene құрылымында ақаулардың болуы pH < 3,0 ортасында сулы ерітінділердегі (C_0 = 100 мг/л) Cr(VI) мөлшерін 99,9%-ға дейін тазартатыны дәлелденген. MXene құрылымындағы вакансиялар Ферми деңгейіндегі электрондық күйлердің тығыздығын арттырады. Бұл электронның шығу жұмысын жеңілдетіп, адсорбцияланған оксианиондарға электрондардың кедергісіз берілуін қамтамасыз етеді [33]. Мышьяк пен сүрмедегі вакансиялық орындар, сәйкесінше, M-O-As және M-O-Sb көпірлерін тұрғызуға атсалысады [71]. Дүниежүзілік денсаулық сақтау ұйымы (ДДҰ) 10 мкг/л As(V) деп бекіткен қалдық шегінен де төмен ppb деңгейінде жетуде беткі терминалдық топтар мен іргелес вакансиялардың болуы көмектеседі [71].

5.3 Радионуклидтерді оқшаулау: U (VI) және Th(IV)

Модификацияланған вакансиялары бар MXene-дерді ядролық қалдықтары бар суды тазартуда қолдану себептері: біріншіден, ерекше радиациялық төзімділігі екіншіден, актинидтерді селективті байланыстыру қабілеті [88]. Ерекше, геометриясымен ерекшеленетін уранил ионын (UO_2^{2+}) координациялау үшін кеуекті материалдарға арнайы талаптар қойылады[89]. Вакансиялық инженерияның арқасында MXene бетіне U-O байланысының координациялық талаптарына сай орналастыра алады. Соңғы зерттеулерге сүйенсек, [88, 90] U(VI) ионының аса жоғары адсорбциялық сыйымдылығы (650 мг/г-ға дейінгі) титан вакансияларына бай, pH 4,5 деңгейіндегі MXene-дерде көрсеткен. Ақаулы құрылым парақтар арасындағы кеңістіктің бұзылуына жол бермей, жоғары дозалы гамма-сәулеленуден (>200 кГр) кейін көрсеткіш өзгермейді [88]. Сонымен қатар, вакансиялық орталықтар мен Th(IV) иондарының жоғары туыстығы таралу коэффициентінің ($K_d > 10^5$ мл/г) мәнін жоғарылатады. Бұл құрамында сілтілік металдар шоғыры қалың күрделі радиоактивті ағындардан радионуклидтерді тиімді бөліп алуға толық мүмкіндік береді [89, 90].

5.4 Көп ионды бәсекелестік пен күрделі су матрицаларындағы таңдамалы жою

Нақты жағдайларда MXene негізіндегі адсорбенттердің тиімділігін бөгде иондар мен табиғи органикалық қосылыстардың (NOM) болуы айтарлықтай төмендетеді [71]. Вакансия инженериясы арқылы MXene бетінің селективтілігін (таңдмалылығын) арттыру арқылы бұл кедергіден құтылуға болады [15, 71]. Ортада Na^+, Ca^{2+} немесе Mg^{2+} иондары 100 есе молярлық артық мөлшерде болған кезде де, вакансияға бай MXene құрылымдарында нысаналы ауыр металдардың таралу коэффициенті (K_d) үнемі жоғары деңгейде қалады [15]. Бұл ерекше таңдамалылық гидратталған иондық радиустардың өзара айырмашылығы мен вакансиялық орталықтарының ішкі электртерістігіне негізделген; бұл механизм ауыр металл катиондарының сілтілі жер металдарына қарағанда басымды түрде ұсталуын қамтамасыз етеді [74]. Күрделі гальваникалық ағынды суларда вакансияға бай MXene «өлшемдік сүзу» (size-sieving) мен үйлесімді координацияны біріктіріп, Cu^{2+} сияқты түсті металдарды іріктеп бөліп алады да, қауіпсіз фондық иондарды өткізіп жібереді [33, 74]. Иондық беріктігі жоғары және pH диапазондары өзгеретін күрделі сулы матрицалардағы бұл тұрақтылық жағдайы

инженерлік MXene материалдарының қоршаған ортаны қалпына келтірудегі жоғары практикалық потециалын көрсетеді [33, 71].

Қорытынды

Атом деңгейіндегі бос орындарды стратегиялық түрде енгізу 2D MXene зерттеулерінің бағытын түбегейлі өзгертті, қазір идеалды кристалдық торларды іздеуге қарағанда ақаулы архитектураларды мақсатты түрде жобалауға назар ауды. Осы шолуда қарастырылған металдық (VM), көміртекті/азотты (VX) және терминалдық (VTx) вакансиялар жай ғана құрылымдық олқылық емес, олар электрондық ландшафтты қайта пішіндейтін, d-зонасының орталығын (d-band center) реттейтін және молекулалық деңгейдегі әрекеттесуді үдететін үйлесімділік орталықтары болып табылады. Бұл парадигмалық өзгеріс қоршаған ортаны қалпына келтіру, энергияны сақтау және электрокатализ салаларындағы дәстүрлі MXen-ге тән кинетикалық кедергілер мен сыйымдылық шектеулерін жеңудегі вакансиялық инженерияның трансформациялық рөлін атап өтті. Атап айтқанда, бос орындар мен беттік функционалдық топтардың өзара үйлесімді координациясы күрделі су орталарынан улы иондар мен радионуклидтерді жоғары селективтілікпен жоюға жол ашты.

Алдағы бес жылда эмпирикалық «сынау және қателесу» тәсілінен ақауларды ұтымды әрі детерминистік тұрғыдан жобалау кезеңіне өту орын алмақ. Жасанды интеллект пен жоғары өнімді есептеу скринингінің интеграциясы «ақау-қасиет» қатынастарын дәл картаға түсіріп, реакциялық қабілеті алдын ала айқындалған MXen синтезін жасауға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, жылдам сипаттау әдістеріндегі жетістіктер нақты әлемдегі процестердегі бос орындардың динамикалық өмірлік циклі туралы жаңа түсініктер береді. Жаппай өндіріске және ұзақ мерзімді тотығу тұрақтылығына байланысты мәселелер әлі де өзекті болғанымен, экологиялық таза және басқарылатын синтезға көшу - бұл материалдарды өнеркәсіптік бағытта қолдануды жеделдетеді. Нәтижесінде,ақаулық инженериясын меңгеру қоршаған ортаның тұрақтылығы және су тапшылығы сияқты жаһандық қиындықтарды шешуде MXen-нің толық потенциалын ашудың кілті болмақ.

References

1. Sikdar S.A Review on Detection and Abatement of Heavy Metals / S. Sikdar, M. Kundu // Chembioeng Rev. – 2017. – Vol. 4, № 6. https://doi.org/10.1002/cben.201700005.
2. Kayani K.F. Heavy Metal Pollution in Aquatic Environments and Removal Using Highly Efficient Bimetallic Metal–organic Framework Adsorbents / K.F. Kayani, S.J. Mohammed // RSC Adv. – 2025. – Vol. 15. – P. 35756-35769. https://doi.org/10.1039/d5ra06296a.
3. Heavy Metals Contamination and Associated Health Risks in Food Webs – a Review Focuses on Food Safety and Environmental Sustainability in Bangladesh / A. Sarker et al // Environ. Sci. Pollut. Res. – 2021. https://doi.org/10.1007/s11356-021-17153-7.
4. Adverse Effects of Mining Pollutants on Terrestrial and Aquatic Environment and Its Remediation / P. Talukder et al // Environ. Qual. Manag. – 2023. https://doi.org/10.1002/tqem.22121.
5. Nanomaterials for Remediation of Environmental Pollutants / A. Roy et al // Bioinorg. Chem. Appl. – 2021. – P. 1764647. https://doi.org/10.1155/2021/1764647.
6. A Review on Sediment Microbial Fuel Cells as a New Source of Sustainable Energy and Heavy Metal Remediation: Mechanisms and Future Prospective / S.Z. Abbas et al // Int. J. Energy Res. – 2017. https://doi.org/10.1002/er.3706.
7. Heavy Metal Pollution in the Aquatic Environment: Efficient and Low-Cost Removal Approaches to Eliminate Their Toxicity: A Review / K.H. Hama Aziz et al // RSC Adv. – 2023. https://doi.org/10.1039/d3ra00723e.
8. Mahajan P. Role of Phytoremediation in Reducing Cadmium Toxicity in Soil and Water / P. Mahajan, J. Kaushal // J. Toxicol. – 2018. – P. 4864365. https://doi.org/10.1155/2018/4864365.
9. Breaking the linear scaling relations in MXene catalysts for efficient CO2 reduction / Y. Li et al // Chemical Engineering Journal. – 2022. – Vol. 429. – P. 132171. https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.132171.
10. Defect passivation and transformation of Ti3C2Tx MXene hollow microsphere for superior electrochemical performance and sodium-ions storage / N. Liu et al // J. Adv. Res. – 2025. https://doi.org/10.1016/j.jare.2025.06.003.
11. A Critical Review on the Sustainable Approaches for the Removal of Toxic Heavy Metals From Water Systems / C.F. Carolin et al // Ind. Eng. Chem. Res. – 2023. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.3c00709.

12. Assessment of Microbial Products in the Biosorption Process of Cu(II) Onto Aerobic Granular Sludge: Extracellular Polymeric Substances Contribution and Soluble Microbial Products Release / L. Huang et al // J. Colloid Interface Sci. – 2018. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2018.05.032.
13. Audu K.E. Bioremediation of Toxic Metals in Mining Site of Zamfara Metropolis Using Resident Bacteria (Pantoea Agglomerans): A Optimization Approach / K.E. Audu, S.E. Adeniji, J.S. Obidah // Heliyon. – 2020. – P. e04704. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04704.
14. Deniz F. An Effectual Biosorbent Substance for Removal of Manganese Ions From Aquatic Environment: A Promising Environmental Remediation Study With Activated Coastal Waste of Zostera Marina Plant / F.Deniz, E.T. Ersanlı // Biomed Res. Int. – 2020. – P. 7806154. https://doi.org/10.1155/2020/7806154.
15. Two Dimensional MXenes as Emerging Paradigm for Adsorptive Removal of Toxic Metallic Pollutants From Wastewater / T. Rasheed et al // Chemosphere. – 2022. – P. 132319. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132319.
16. Recent Advancement in Rational Design Modulation of MXene: A Voyage From Environmental Remediation to Energy Conversion and Storage / A. Hayat et al // Chem. Rec. – 2022. https://doi.org/10.1002/tcr.202200097.
17. Bharali L. Several Fundamental Aspects of MXene: Synthesis and Their Applications / L. Bharali, J. Kalita, S.S. Dhar // Chemistryselect. – 2023. https://doi.org/10.1002/slct.202301486.
18. Recent Progress in Environmental Remediation, Colloidal Behavior and Biological Effects of MXene: A Review / L. Chen et al // Environ. Sci. Nano. – 2022. https://doi.org/10.1039/d2en00340f.
19. Novel Synthesis Methods and Applications of MXene-based Nanomaterials (MBNs) for Hazardous Pollutants Degradation: Future Perspectives / S.S. Siwal et al // Chemosphere. – 2022. – P. 133542. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133542.
20. Scope, Evaluation and Current Perspectives of MXene Synthesis Strategies for State of the Art Applications / M.Z. Abid et al // J. Mater. Chem. A. – 2024. https://doi.org/10.1039/d3ta06548k.
21. Titanium Carbide-Based Adsorbents for Removal of Heavy Metal Ions and Radionuclides: From Nanomaterials to 3D Architectures / X. Dong et al // Adv. Mater. Interfaces. – 2021. – P. 2100703. https://doi.org/10.1002/admi.202100703.
22. Titanium Carbide (Ti3C2Tx) MXene for Sequestration of Aquatic Pollutants / S. Madhu et al // Chemsuschem. – 2024. https://doi.org/10.1002/cssc.202400421.
23. Swain K.K. MXene-Based Nanomaterials for Pollution Remediation: A Review / K.K. Swain, S.K. Pradhan, D.J. Late // Chemistryselect. – 2025. https://doi.org/10.1002/slct.202404885.
24. Abraham A.M. A Review of MXene's Retroactive Development in Energy Storage Applications / A.M. Abraham, S.C. George // Chemistryselect. – 2025. https://doi.org/10.1002/slct.202502846.
25. Rational Design of Titanium Carbide MXene Electrode Architectures for Hybrid Capacitive Deionization / S. Buczek et al // Energy Environ. Mater. – 2020. – P. 12110. https://doi.org/10.1002/eem2.12110.
26. Review On MXene Synthesis, Properties, and Recent Research Exploring Electrode Architecture for Supercapacitor Applications / A. Sohan et al // Int. J. Energy Res. – 2021. – P. 7068. https://doi.org/10.1002/er.7068.
27. Synthesis of a Two-Dimensional MXene Modified by Chloroacetic Acid and Its Adsorption of Uranium / L. Xie et al // Chemistryselect. – 2022. https://doi.org/10.1002/slct.202103583.
28. MXene Materials for Designing Advanced Separation Membranes / H.E. Karahan et al // Adv. Mater. – 2020. – Vol. 32, № 29. – P. 1906697. https://doi.org/10.1002/adma.201906697.
29. Column-to-Beam Structure House Inspired MXene-Based Integrated Membrane with Stable Interlayer Spacing for Water Purification / Y. Zhang et al // Adv. Funct. Mater. – 2022. – Vol. 32, № 22. – P. 2111660. https://doi.org/10.1002/adfm.202111660.
30. Defect Engineering of Mo2-xCTz MXenes through Precursor Alloying and Effects on Electrochemical Properties / R.M. Ronchi et al // Chem. Mater. – 2025. – Vol. 37, № 11. – P. 4005-4015. https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.5c00143.
31. Cation Vacancy Clusters in Ti3C2Tx MXene Induce Ultra-Strong Interaction with Noble Metal Clusters for Efficient Electrocatalytic Hydrogen Evolution / X. Wang et al // Adv. Energy Mater. – 2023. – Vol. 13, № 23. – P. 2300148. https://doi.org/10.1002/aenm.202300148.
32. Targeted Sulfur Vacancies on Monolayer MXene Boost Fenton-Like Catalysis for Sustainable Water Purification / Z.-H. He et al // Adv. Funct. Mater. – 2025. – P. e30083. https://doi.org/10.1002/adfm.202530083.

33. Oxygen vacancy-engineered Ti3C2Tx MXenes for photocatalytic degradation of pharmaceutical residues in aqueous systems: Molecular mechanisms and future directions / R. Reshma et al // Mater. – 2025. – Vol. 9. – P. 101127. https://doi.org/10.1016/j.nxmate.2025.101127.
34. A novel electrochemical sensor for simultaneous detection of Cd2+ and Pb2+ by MXene aerogel-CuO/carbon cloth flexible electrode based on oxygen vacancy and bismuth film / L. Wen et al // Sci. Total Environ. – 2022. – Vol. 851. – P. 158325. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158325.
35. Iron oxide-MXene-based composite for the removal of copper ions from wastewater / R. Patel et al // Environ. Sci. Pollut. Res. – 2025. – Vol. 32, № 19. – P. 12108-12120. https://doi.org/10.1007/s11356-025-36413-4.
36. Breaking the linear scaling relations in MXene catalysts for efficient CO2 reduction / Y. Li et al // Chem. Eng. J. – 2022. – Vol. 429. – P. 132171. https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.132171.
37. VahidMohammadi A. The world of two-dimensional carbides and nitrides (MXenes) / A. VahidMohammadi, J. Rosen, Y. Gogotsi // Science. – 2021. – Vol. 372, № 6547. – P. eabf1581. https://doi.org/10.1126/science.abf1581.
38. Ihsanullah I. MXenes (two-dimensional metal carbides) as emerging nanomaterials for water purification: Progress, challenges and prospects / I. Ihsanullah // Chem. Eng. J. – 2020. – Vol. 388. – P. 124340. https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124340.
39. Effect of vacancies and edges in promoting water chemisorption on titanium-based MXenes / E. Marquis et al // Nano Converg. – 2023. – Vol. 10, № 1. – P. 16. https://doi.org/10.1186/s40580-023-00364-8.
40. Recent advances in applications of MXenes for desalination, water purification and as an antibacterial: a review / H. Meskher et al // Environ. Sci. Nano. – 2025. – Vol. 12, № 2. – P. 1012-1036. https://doi.org/10.1039/D4EN00427B.
41. Single platinum atoms immobilized on an MXene as an efficient catalyst for the hydrogen evolution reaction / J. Zhang et al // Nat. Catal. – 2018. – Vol. 1, № 12. – P. 985-992. https://doi.org/10.1038/s41929-018-0195-1.
42. Two-dimensional Mo1.33C MXene with divacancy ordering prepared from parent 3D laminate with in-plane chemical ordering / Q. Tao et al // Nat. Commun. – 2017. – Vol. 8, № 1. – P. 14949. https://doi.org/10.1038/ncomms14949.
43. Atomic Defects in Monolayer Titanium Carbide (Ti3C2Tx) MXene / X. Sang et al // ACS Nano. – 2016. – Vol. 10, № 10. – P. 9193-9200. https://doi.org/10.1021/acsnano.6b05240.
44. Overview of the synthesis of MXenes and other ultrathin 2D transition metal carbides and nitrides / L. Verger et al // Curr. Opin. Solid State Mater. Sci. – 2019. – Vol. 23, № 3. – P. 149-163. https://doi.org/10.1016/j.cossms.2019.02.001.
45. MXene (Ti3C2) Vacancy-Confined Single-Atom Catalyst for Efficient Functionalization of CO2 / D. Zhao et al // J. Am. Chem. Soc. – 2019. – Vol. 141, № 9. – P. 4086-4093. https://doi.org/10.1021/jacs.8b13579.
46. Alkali cation stabilization of defects in 2D MXenes at ambient and elevated temperatures / B.C. Wyatt et al // Nat. Commun. – 2024. – Vol. 15, № 1. – P. 50713. https://doi.org/10.1038/s41467-024-50713-2.
47. Defect Engineering and Effect of Vacancy Concentration on the Electrochemical Performance of V-Based MXenes / L. Qin et al // ENERGY Environ. Mater. – 2024. – P. e70253. https://doi.org/10.1002/eem2.70253.
48. One MAX phase, different MXenes: A guideline to understand the crucial role of etching conditions on Ti3C2Tx surface chemistry / M. Benchakar et al // Appl. Surf. Sci. – 2020. – Vol. 530. – P. 147209. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.147209.
49. Gan J. Vacancies-Engineered M2CO2MXene as an Efficient Hydrogen Evolution Reaction Electrocatalyst / J. Gan, F. Li, Q. Tang // J. Phys. Chem. Lett. – 2021. – Vol. 12, № 20. – P. 4805-4813. https://doi.org/10.1021/acs.jpclett.1c00917.
50. Optimizing MXene: Post-Synthesis Treatments Strategies & Their Characterization / J. Liew et al // J. Sci. Adv. Mater. Devices. – 2026. – P. 101137. https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2026.101137.
51. MXene-Based Oxygen Electrocatalysts: Mechanistic Insights, Property Tuning Strategies, and Prospects toward Practical Applications / J. Xu et al // Advanced Materials. – 2025. – P. 2512724. https://doi.org/10.1002/adma.202512724.

52. Fluence, flux, and implantation temperature dependence of ion-implantation-induced defect production in 4H–SiC / J. Slotte et al // J. Appl. Phys. – 2005. – Vol. 97, № 3. – P. 033513. https://doi.org/10.1063/1.1844618.
53. Organic Photocatalysts for Solar Water Splitting: Molecular- and Aggregate-Level Modifications / W. Zhou et al // Acta Phys. Chim. Sin. – 2022. – P. 2211010. https://doi.org/10.3866/PKU.WHXB202211010.
54. Interlayer-Spacing-Modification of MoS2 via Inserted PANI with Fast Kinetics for Highly Reversible Aqueous Zinc-Ion Batteries / S. Fan et al // Micromachines. – 2025. – Vol. 16, № 7. – P. 754. https://doi.org/10.3390/mi16070754.
55. Electrochemically active surface area controls HER activity for FexNi100−x films in alkaline electrolyte / S.I. Perez Bakovic et al // J. Catal. – 2021. – Vol. 394. – P. 104-112. https://doi.org/10.1016/j.jcat.2020.12.037.
56. Atomic defects, functional groups and properties in MXenes / W. Cui et al // Chin. Chem. Lett. – 2021. – Vol. 32, № 1. – P. 339-344. https://doi.org/10.1016/j.cclet.2020.04.024.
57. Molten salt method synthesis of multivalent cobalt and oxygen vacancy modified Nitrogen-doped MXene as highly efficient hydrogen and oxygen Evolution reaction electrocatalysts / X. Chen et al // J. Colloid Interface Sci. – 2022. – Vol. 615. – P. 831-839. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2022.02.010.
58. In situ growth of carbon nanotubes on MXenes for high-performance electromagnetic wave absorption / Z. Mu et al // RSC Adv. – 2025. – Vol. 15, № 32. – P. 26506-26514. https://doi.org/10.1039/D5RA03991F.
59. MXene-Based Oxygen Electrocatalysts: Mechanistic Insights, Property Tuning Strategies, and Prospects toward Practical Applications / J. Xu et al // Adv. Mater. – 2025. – Vol. 37, № 45. – P. e12724. https://doi.org/10.1002/adma.202512724.
60. Effect of vacancies on the electrochemical behavior of Mo-based MXenes in aqueous supercapacitors / W. Zheng et al // J. Power Sources. – 2022. – Vol. 525. – P. 231064. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.231064.
61. Regulation mechanisms of single-atom doped Ti2CO2 MXene for CO2 reduction: A DFT study / H. Xue et al // Electrochimica Acta. – 2025. – Vol. 540. – P. 147290. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2025.147290.
62. A critical review of MXene-based composites in the adsorptive and photocatalysis of hexavalent chromium removal from industrial wastewater / N.S. Hassan et al // Environ. Res. – 2024. – Vol. 259. – P. 119584. https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119584.
63. Surface engineering of nitride-based MXenes through oxygen vacancies and single-atom catalysts for enhanced nitrate reduction / Y. Sun et al // Appl. Surf. Sci. – 2025. – Vol. 711. – P. 164025. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2025.164025.
64. Charge transfer and orbital reconstruction of non-noble transition metal single-atoms anchored on Ti2CTx-MXenes for highly selective CO2 electrochemical reduction / N. Li et al // Chin. J. Catal. – 2022. – Vol. 43. No. 7. – P. 1906-1917. https://doi.org/10.1016/S1872-2067(21)64018-4.
65. Abouelanwar M.E. Magnetically modified amino MXene psyllium hydrogel nanobiosorbent for the simultaneous removal of hexavalent chromium and curcumin from wastewater / M.E. Abouelanwar, M.E. Mahmoud // Sci. Rep. – 2025. – Vol. 15, № 1. – P. 45663. https://doi.org/10.1038/s41598-025-32138-z.
66. Cleaning the environment with MXenes / D. Bury et al // MRS Bull. – 2023. – Vol. 48, № 3. – P. 271-282. https://doi.org/10.1557/s43577-023-00507-6.
67. DFT practice in MXene-based materials for electrocatalysis and energy storage: From basics to applications / H. Zhu et al // Ceram. Int. – 2022. – Vol. 48, № 19. – P. 27217-27239. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.06.070.
68. Efficient photocatalytic reduction of aqueous Cr (VI) by MXene-(Ti3C2, Mo4/3C) and Ca2Fe2O5-based nanocomposites / D.S. Vavilapalli et al // J. Environ. Chem. Eng. – 2025. – Vol. 13, № 3. – P. 116169. https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.116169.
69. Photocatalysis over MXene-based hybrids: Synthesis, surface chemistry, and interfacial charge kinetics / C. Peng et al // APL Mater. – 2021. – Vol. 9, № 7. – P. 070703. https://doi.org/10.1063/5.0055711.
70. Bi vacancy simultaneous manipulation of bulk adsorption and carrier utilization to replenish the mechanism of Cr(VI) photoreduction at universal pH / Y. Li et al // Chem. Eng. J. – 2022. – Vol. 450. – P. 138106. https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.138106.

71. Othman Z. A critical overview of MXenes adsorption behavior toward heavy metals / Z. Othman, H.R. Mackey, K.A. Mahmoud // Chemosphere. – 2022. – Vol. 295. – P. 133849. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133849.
72. Water content modulation enables selective ion transport in 2D MXene membranes / Y. Zhu et al // Proc. Natl. Acad. Sci. – 2025. – Vol. 122, № 29. – P. e2501017122. https://doi.org/10.1073/pnas.2501017122.
73. Effective ion sieving with Ti3C2Tx MXene membranes for production of drinking water from seawater / L. Ding et al // Nat. Sustain. – 2020. – Vol. 3, № 4. – P. 296-302. https://doi.org/10.1038/s41893-020-0474-0.
74. High adsorption capacity of heavy metals on two-dimensional MXenes: an ab initio study with molecular dynamics simulation / X. Guo et al // Phys. Chem. Chem. Phys. – 2015. – Vol. 18, № 1. – P. 228-233. https://doi.org/10.1039/C5CP06078H.
75. Water treatment and environmental remediation applications of two-dimensional metal carbides (MXenes) / K. Rasool et al // Mater. Today. – 2019. – Vol. 30. – P. 80-102. https://doi.org/10.1016/j.mattod.2019.05.017.
76. Selective chromium removal and detoxification via capacitive deionization using nickel oxide-loaded oxidized MXene electrode: The critical role of Ti/Ni dual-redox centers / H. Chand et al // Desalination. – 2026. – Vol. 617. – P. 119430. https://doi.org/10.1016/j.desal.2025.119430.
77. Delamination of multilayer Ti3C2Tx MXene alters its adsorpiton and reduction of heavy metals in water / Y. Zhang et al // Environ. Pollut. – 2023. – Vol. 330. – P. 121777. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121777.
78. Efficient mercury removal from aqueous solutions using carboxylated Ti3C2Tx MXene / A.P. Isfahani et al // J. Hazard. Mater. – 2022. – Vol. 434. – P. 128780. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128780.
79. Etching and Exfoliation Properties of Cr2AlC into Cr2CO2 and the Electrocatalytic Performances of 2D Cr2CO2 MXene / Y. Cheng et al // J. Phys. Chem. C. – 2019. – Vol. 123, № 25. – P. 15629-15636. https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.9b03120.
80. Novel magneto-electrocatalyst Cr2CO2-MXene for boosting nitrogen reduction to ammonia / N. Li et al // Mater Horiz. – 2024. – Vol. 11, № 7. – P. 1769-1778. https://doi.org/10.1039/D3MH01945D.
81. High-Throughput Screening of Atomic Defects in MXenes for CO2 Capture, Activation, and Dissociation / V. Parey et al // ACS Appl. Mater. Interfaces. – 2021. – Vol. 13, № 30. – P. 35585-35594. https://doi.org/10.1021/acsami.1c05742.
82. Machine Learning and Theoretical Prediction of Highly Spin-Polarized Cr2COx MXene with Enhanced Curie Temperature / J. Yang et al // Adv. Funct. Mater. – 2024. – Vol. 34, № 52. – P. 2411170. https://doi.org/10.1002/adfm.202411170.
83. MXenes à la Carte: Tailoring the Epitaxial Growth Alternating Nitrogen and Transition Metal Layers / J.D. Gouveia et al // ACS Nano. – 2022. – Vol. 16, № 8. – P. 12541-12552. https://doi.org/10.1021/acsnano.2c04029.
84. Molten Salt Electrosynthesis of Cr2AlC-Derived Porous Carbon for Supercapacitors / Z. Pang et al // ACS Sustain. Chem. Eng. – 2019. – Vol. 7, № 15. – P. 12938-12947. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b01944.
85. Lv X. Hydroxyl-Boosted Nitrogen Reduction Reaction: The Essential Role of Surface Hydrogen in Functionalized MXenes / X. Lv, L. Kou, T. Frauenheim // Acs Appl. Mater. Interfaces. – 2021. https://doi.org/10.1021/acsami.1c00871.
86. Li M. Single metal atoms supported on N-doped 2D M2C MXenes: an efficient electrocatalyst for overall water splitting / M. Li, Y. Cheng, Y. Li // New J Chem. – 2023. – Vol. 47, № 39. – P. 18285-18294. https://doi.org/10.1039/D3NJ02915H.
87. The performances and mechanisms for Cr(VI) and Cr(III) removal using TMAOH delaminated Ti3C2Tx suspension / L. Zhang et al // J. Environ. Chem. Eng. – 2023. – Vol. 11, № 3. – P. 109878. https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109878.
88. MXene-based hybrid nanomaterials for sequestration of radionuclides and toxic ions // Mxene-Based Hybrid Nano-Architectures for Environmental Remediation and Sensor Applications. – Elsevier, 2024. – P. 55-73. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95515-7.00003-0.
89. Advanced MXene-based materials for efficient extraction of uranium from seawater and wastewater / J. Zhu et al // Sci. Total Environ. – 2024. – Vol. 942. – P. 173755. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173755.

90. Highly adherent Ti3C2Tx nanosheet-loaded amidoxime polyacrylonitrile composite membrane for uranium extraction / L. Xu et al // Sep. Purif. Technol. – 2024. – Vol. 331. – P. 125613. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.125613.

Алғыс білдіру: *Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және Жоғары Білім Министрлігінің Ғылым Комитеті қаржыландырды (Грант № AP26101911).*

Т. Мукатаева[1], А. Нуршәріп[2], А. Сатаева[2], Ж. Жандосов[3], А. Байменов[2]*
[1]Казахский национальный университет имени аль-Фараби,
050040, Республика Казахстан, г. Алматы, пр. аль-Фараби, 71.
[2]Satbayev University, 050013, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22
[3]Институт проблем горения,
050012, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Богенбай батыра, 172.
*e-mail: alzhan.baimenov@satbayev.university

ВАКАНСИОННАЯ ИНЖЕНЕРИЯ MXENE ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОДЫ ОТ ИОНОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ: МЕХАНИЗМ, СИНТЕЗ И ПРИМЕНЕНИЕ

Загрязнение водных ресурсов тяжелыми металлами стало одной из самых актуальных проблем нашего времени, поэтому необходимо изобрести новые и эффективные материалы для удаления тяжелых металлов из воды. Хотя ученые считают двумерные карбиды и нитриды переходных металлов (MXenes) хорошими адсорбентами, в исходных образцах этих материалов часто обнаруживаются естественные структурные дефекты. Основными препятствиями на пути к раскрытию полного потенциала материала являются плотная упаковка нанолистов и отсутствие активных центров на поверхности. В этой статье мы рассмотрим роль и механизм инженерии вакансий в удалении тяжелых металлов с помощью металлических (VM), углеродно-азотных (VX) и поверхностных концевых вакансий (VTx). Путем целенаправленной модификации связей и электронной структуры атомов мы можем сделать так, чтобы вакансионные дефекты не только снижали адгезию слоев, но и действовали как активные термодинамические ловушки. Искусственные атомные дефекты приводят к перераспределению электронов в одном месте, и это явление значительно снижает энергию Гиббса связывания с тяжелыми металлами. Подобные искусственные дефекты активируют материал, увеличивая его адсорбционную способность в несколько раз (например, >400 мг/г для Pb^{2+}) и приводя к спонтанному восстановлению тяжелых металлов, таких как Cr^{6+}, в воде. В данной статье подробно рассматриваются новые технологии синтеза, позволяющие точно вводить структурные дефекты. В заключение предлагается стратегическое направление развития нового поколения материалов MXene для фильтров чистой воды, с учетом вопросов промышленного крупномасштабного производства и долговременного хранения.

Ключевые слова: *MXene, тяжелый металл, адсорбция, вакансионная инженерия, очистка воды.*

T. Mukatayeva[1], A. Nursharip[2], A. Satayeva[2], Zh. Zhandosov[3], A. Baimenov[2]*
[1]Al-Farabi Kazakh National University,
050040, Republic of Kazakhstan, Almaty city, al-Farabi ave., 71.
[2]Satbayev University, 050013, Republic of Kazakhstan, Almaty city, Satpayev st., 22
[3]Institute of Combustion Problems,
050012,Republic of Kazakhstan, Almaty city, Bogenbai Batyr st., 172.
*e-mail: alzhan.baimenov@satbayev.university

VACANCY ENGINEERING OF MXENES FOR THE REMEDIATION OF HEAVY METAL IONS IN WATER: MECHANISM, SYNTHESIS, AND APPLICATION

Heavy metal contamination of water resources has become one of the most pressing problems of our time, and therefore it is necessary to invent new and effective materials for the removal of heavy metals from water. Although scientists consider two-dimensional transition metal carbides and nitrides (MXenes) as good adsorbents, natural structural defects are often found in the initial samples of these materials. The main obstacles to unlocking the full potential of the material are the close stacking of nanosheets and the lack of active centers on the surface. In this article, we will explain the role and mechanism of vacancy engineering in the removal of heavy metals by metal (VM), carbon/nitrogen (VX), and surface terminal vacancies (VTx). By specifically modifying the bonding and electronic structure of atoms, we can make vacancy defects not only reduce the adhesion of layers, but also act as active thermodynamic traps. Artificial atomic defects lead to the

redistribution of electrons in a single location, and this phenomenon significantly reduces the Gibbs energy of binding to heavy metals. Such artificial defects activate the material, increasing its adsorption capacity several times (e.g., >400 mg/g for Pb^{2+}) and lead to the spontaneous reduction of heavy metals such as Cr^{6+} in water. In this article, we discuss in detail new synthesis technologies that precisely introduce structural defects. Finally, we propose a strategic direction for the development of a new generation of MXene materials for pure water filters, while addressing the issues of industrial large-scale production and long-term storage.

Key words: *MXene, heavy metal, adsorption, vacancy engineering, water treatment.*

Авторлар туралы мәліметтер

Альжан Жулдасович Байменов* – PhD, қауым. профессор, Сәтбаев Университеті, Инженерлік-бейінді зертханасының ғылыми қызметкері; e-mail: alzhan.baimenov@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6509-2087.

Талшын Ғалымжанқызы Мұқатаева – Аль-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті; e-mail: mukatayeva.talshyn@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-2004-8602.

Арманбек Нұршәріп – Сәтбаев Университеті, Инженерлік-бейінді зертханасының ғылыми қызметкері; e-mail:Nursharip.A@stud.satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-7941-7767.

Алия Рифкатовна Сатаева – Биология ғылымдарының докторы, қауым.профессор, Сәтбаев Университеті, Инженерлік-бейінді зертханасының ғылыми қызметкері; e-mail:aliyasatayeva@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2632-2481.

Жакпар Маратович Жандосов – Химия ғылымдарының кандидаты**,** Жану мәселелері институтының ғылыми қызметкері; e-mail:jandosovj@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/ 0000-0003-3842-4397.

Сведения об авторах

Альжан Жулдасович Байменов* – PhD, ассоц. профессор, научный сотрудник Лаборатории инженерного профиля, Satbayev University; e-mail: alzhan.baimenov@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6509-2087.

Талшын Галымжановна Мукатаева – Казахский национальный университет имени аль-Фараби; e-mail: mukatayeva.talshyn@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-2004-8602.

Арманбек Нуршарип – научный сотрудник Лаборатории инженерного профиля, Satbayev University; e-mail: Nursharip.A@stud.satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-7941-7767.

Алия Рифкатовна Сатаева – доктор биологических наук, ассоц. профессор, научный сотрудник Лаборатории инженерного профиля, Satbayev University; e-mail: aliyasatayeva@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2632-2481.

Жакпар Маратович Жандосов – кандидат химических наук, научный сотрудник Института проблем горения; e-mail: jandosovj@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3842-4397.

Information about the authors

Alzhan Zhuldasovich Baimenov* – PhD, Associate Professor, Researcher at the Laboratory of Engineering Profile, Satbayev University; e-mail: alzhan.baimenov@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6509-2087.

Talshyn Galymzhankyzy Mukatayeva – Al-Farabi Kazakh National University; e-mail: mukatayeva.talshyn@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-2004-8602.

Armanbek Nursharip – Researcher at the Laboratory of Engineering Profile, Satbayev University; e-mail: Nursharip.A@stud.satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-7941-7767.

Aliya Rifkatovna Satayeva – Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Researcher at the Laboratory of Engineering Profile, Satbayev University; e-mail: aliyasatayeva@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2632-2481.

Zhakpar Maratovich Zhandosov – Candidate of Chemical Sciences, Researcher at the Institute of Combustion Problems; e-mail: jandosovj@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3842-4397.

Редакцияға енуі 13.04.2026
Өңдеуден кейін түсуі 26.05.2026
Жариялауға қабылданды 28.05.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-76

BY 4.0
Check for updates

МРНТИ: 61.51.31

И.О. Сапаргали*, А.А. Каныкешова, М.С. Кунарбекова, Ж. Токтарбай, С. Азат
[1]Satbayev University,
050013, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22
*e-mail: sapargali.i@mail.ru

ОКИСЛИТЕЛЬНАЯ ДЕГРАДАЦИЯ ПОЛИСТИРОЛЬНОГО МИКРОПЛАСТИКА ПРОЦЕССОМ ФЕНТОНА

Аннотация: *Проблема накопления полимерных микрочастиц в водных объектах требует поиска новых, более интенсивных методов их разрушения. Одним из наиболее трудноразлагаемых загрязнителей является полистирол. Наличие массивных фенильных групп в его макромолекуле стерически препятствует микробному расщеплению и обеспечивает общую химическую инертность материала. В связи с этим в данной работе исследована окислительная деструкция дисперсных полистирольных частиц в водной среде с использованием гомогенной системы Фентона ($FeSO_4$* $7H_2O$ / H_2O_2).*

Экспериментальную часть проводили в термостатируемых условиях при температуре 35-40°C и кислотности среды pH 2-3. Выбранный узкий диапазон pH критически важен для поддержания ионов железа в каталитически активной форме и предотвращения их осаждения. В этих условиях инициируется активная генерация гидроксильных радикалов (•OH). Обладая высоким окислительным потенциалом, они отщепляют атомы водорода от полимерного каркаса, что неизбежно приводит к разрыву основных углерод-углеродных связей и падению молекулярной массы.

Поверхностные изменения образцов до и после реакции оценивали методами оптической и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). На полученных микрофотографиях четко фиксируется эрозия поверхности пластика: образование выраженных микротрещин, сколов и каверн. Изменение дисперсного состава суспензий дополнительно контролировали методом динамического светорассеяния (ДЛС). Результаты подтвердили значительное смещение размерного распределения частиц в сторону более мелких фракций.

Результаты экспериментов доказывают, что реакция Фентона эффективно запускает окислительное разложение прочных ароматических полимеров. Поэтому данный подход стоит рассматривать как перспективную стадию для систем очистки производственных вод.

Ключевые слова: *микропластик; полистирол; процесс Фентона; окислительная деградация; очистка воды.*

1. Введение

Увеличение антропогенной нагрузки на окружающую среду, обусловленное интенсификацией промышленного производства, развитием транспортной инфраструктуры и ростом объемов бытовых отходов, выступает ключевым фактором дестабилизации природных экосистем [1]. Регулярные выбросы загрязняющих веществ разрушают природное равновесие. Из-за этого деградируют главные оболочки Земли – вода, почва и воздух, что сегодня считается одной из самых серьезных мировых проблем [2].

Главная экологическая проблема заключается в многокомпонентной природе современного загрязнения. Аккумуляция в биосфере тяжелых металлов, пестицидов и радионуклидов (в частности, ^{137}Cs и ^{90}Sr) на фоне роста концентрации парниковых газов запускает масштабные деструктивные процессы. В результате такого комбинированного воздействия угнетаются целые биоценозы, критически падает уровень биоразнообразия и ускоряется трансформация климата.

Помимо прямого экологического ущерба, миграция токсикантов формирует риски для здоровья и санитарно-эпидемиологического благополучия населения. Подобная динамика накопления резистентных ксенобиотиков требует разработки и внедрения эффективных инженерно-химических технологий мониторинга и ремедиации загрязненных сред.

В условиях современных глобальных экологических вызовов состояние гидросферы требует особого внимания. Постоянная антропогенная нагрузка истощает водные экосистемы

©И.О. Сапаргали, А.А. Каныкешова, М.С. Кунарбекова, Ж.Токтарбай, С. Азат, 2026

и ухудшает качество природных вод. Ситуация заметно усложнилась во второй половине прошлого века: интенсивный рост химической индустрии привел к тому, что синтетические полимеры стали одним из основных источников загрязнения водоемов [3].

Главная проблема полимерного загрязнения заключается в высокой термодинамической стабильности и химической инертности макромолекул, что делает их крайне устойчивыми к биологическому разложению [4-6]. В результате формируется масштабный накопительный эффект: по имеющимся оценкам, около 90% всех произведенных пластиковых отходов не подвергаются вторичной переработке, аккумулируясь на полигонах и неизбежно мигрируя в акватории Мирового океана [9].

Находясь в окружающей среде, под воздействием инсоляции, окислительных процессов и механического истирания крупногабаритный пластик подвергается постепенной фрагментации. Этот процесс приводит к образованию микропластика -гетерогенной смеси дисперсных полимерных частиц размером от нескольких нанометров до 5 мм [13]. В отличие от макрообъектов, частицы микропластика обладают высокой удельной площадью поверхности, что позволяет им не только свободно перемещаться по водным бассейнам, но и выступать сорбентами для других загрязняющих веществ, многократно усугубляя экологический ущерб [4]. По происхождению микропластик классифицируют на первичный и вторичный. К первичному относятся промышленные микрогранулы, используемые в качестве абразивных присадок в парфюмерно-косметической продукции и бытовой химии. Вследствие высокой дисперсности данные частицы не задерживаются стандартными барьерами муниципальных очистных сооружений и эмитируются непосредственно в гидросферу. Вторичный микропластик образуется в результате распада более крупных пластиковых отходов. Под совместным действием ультрафиолета, перепадов температур и механического трения воды полимерные цепи разрушаются [7]. Поверхность материала постепенно подвергается эрозии, и пластик распадается на микрочастицы.

Мелкие фрагменты пластика легко распространяются в воде, поэтому сейчас они присутствуют практически во всех водоемах. Из-за сходства размеров с элементами зоо- и фитопланктона микропластик активно заглатывается гидробионтами. Попадая в организм, полимеры блокируют пищеварительную систему и нарушают питание, что резко снижает выживаемость видов. Ситуация усугубляется тем, что поверхность микропластика отлично сорбирует токсичные соединения из воды. Таким образом, эти частицы работают как транспорт, переносящий опасные вещества от одного звена трофической цепи к другому [5].

Для Республики Казахстан мониторинг контаминации гидросферы синтетическими полимерами приобретает особую актуальность. Несмотря на масштабы потенциального ущерба, воздействие микропластика на биоценозы водоемов страны длительное время оставалось малоизученным. В связи с этим принципиальное научно-практическое значение приобретают комплексные полевые исследования, в частности – оценка экологического статуса прибрежных акваторий Каспийского моря, направленная на количественную и качественную инвентаризацию полимерного загрязнения. Результаты анализа натурных проб подтверждают высокий уровень полимерной контаминации исследуемой акватории [10]. Анализ проб показал масштабное загрязнение акватории и прибрежной зоны. В водной толще преобладает микропластик размером 0,69-3,61 мм, основу которого составляют обрывки синтетических рыболовных сетей и лесок. При этом в донных осадках и скоплениях прибрежной растительности оседает более крупный мусор: нейлоновые нити, полиэтилен и различные волокна длиной от 1,4 до 19,7 см и массой до 0,19 г. Концентрация пластика на побережье достигает сотен килограммов на квадратный километр. Загрязнение носит смешанный характер: помимо полимеров, в воде присутствуют частицы металла и краски. Внешний вид и структура найденных фрагментов однозначно указывают на то, что это вторичный пластик – результат распада бытовых отходов и брошенного рыболовного инвентаря.

В структуре идентифицированного загрязнения значительную долю составляют ароматические полимеры, в частности полистирол. Стерические затруднения, создаваемые объемными фенильными группами, придают полистиролу высокую термодинамическую стабильность и делают его крайне резистентным к биодеградации. Этот вид микропластика способен длительное время сохраняться в окружающей среде, проявляя выраженную токсичность для местных биоценозов [4, 8].

Традиционные методы механической сепарации и биологической очистки сточных вод демонстрируют низкую эффективность извлечения микродисперсных пластиков, что требует разработки специализированных физико-химических технологий их деструкции [13]. В инженерии окружающей среды перспективным подходом признано применение передовых окислительных процессов (Advanced Oxidation Processes, AOP), в частности – гомогенной каталитической системы Фентона [6,14]. Метод основан на разложении пероксида водорода (H_2O_2) в присутствии ионов Fe^{2+}, что сопровождается интенсивной генерацией гидроксильных радикалов (•OH). Высокий окислительно-восстановительный потенциал данных интермедиатов обеспечивает эффективный неселективный разрыв углерод-углеродных связей полимерной матрицы, инициируя деполимеризацию полистирола вплоть до полной минерализации продуктов распада [7, 10].

В связи с этим целью настоящей работы является исследование закономерностей окислительной деструкции полистирольного микропластика в водной среде под действием каталитической системы Фентона. В рамках исследования установлены оптимальные физико-химические параметры протекания реакции, а также проведена комплексная оценка степени разрушения полимерной матрицы с привлечением методов оптической микроскопии [5], сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) [11] и динамического светорассеяния (ДЛС) [12]. Полученные результаты формируют научно-методическую базу для разработки масштабируемых технологий ремедиации водных объектов, загрязненных устойчивыми полимерными поллютантами [14].

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

2.1. Используемые реактивы и материалы

В качестве модельного микропластика в экспериментах применяли коммерческий гранулированный полистирол (ПС). Для процесса углубленного окисления (Advanced Oxidation Process, AOP) в системе Фентона использовали коммерческие химические реактивы аналитической чистоты без дополнительной очистки. В качестве окислителя применяли водный раствор пероксида водорода (30 мас. %), источником ионов Fe^{2+} и катализатором реакции служил гептагидрат сульфата железа(II) ($FeSO_4$* $7H_2O$). Корректировку pH реакционной среды осуществляли добавлением 0,1 М раствора серной кислоты (приготовленного из 98 % H_2SO_4) и гидроксида натрия (NaOH). Все рабочие растворы готовили на основе дистиллированной воды.

2.2. Подготовка образцов полистирольного микропластика

Чтобы сымитировать то, как микропластик образуется в природе, мы просто механически измельчили исходные гранулы ПС. Затем полученный порошок просеяли через набор лабораторных сит. Это нужно было для того, чтобы выровнять размер частиц и сделать результаты опытов точными. Для дальнейших экспериментов по разложению мы взяли частицы мельче 500 мкм – именно этот размер попадает под стандартное определение микропластика.

2.3. Методика проведения окислительной деградации

Эксперименты по окислительной деструкции полистирольного микропластика проводили в статическом режиме в стеклянных реакторах рабочим объемом 100 мл.

Навеску полимера массой 0,1 г диспергировали в 50 мл дистиллированной воды. Кислотность полученной суспензии доводили до значения pH 3,0 добавлением 0,1 М раствора H_2SO_4. Поддержание данного уровня кислотности строго необходимо для сохранения ионов железа в каталитически активной форме и предотвращения их осаждения в виде неактивных гидратированных оксидов Fe(III).

После стабилизации pH в реактор вводили 0,05 г катализатора ($FeSO_4$* $7H_2O$). Реакцию инициировали прибавлением 1,0 мл 30%-ного раствора H_2O_2. Процесс вели в изотермических условиях (25 °C) при непрерывном перемешивании на магнитной мешалке в течение 24 ч. Выбранная продолжительность экспозиции необходима для эффективной диффузии •OH-радикалов в объем полимерной матрицы и обеспечения глубокого разрыва углерод-углеродных связей.

По окончании реакции суспензию фильтровали. Для ингибирования дальнейшего окисления и десорбции остаточных реагентов выделенную твердую фазу многократно промывали дистиллированной водой. Отмытые образцы деградированного микропластика сушили в термошкафу при 60 °C до постоянной массы (данный температурный режим гарантированно исключает термическую деструкцию полистирола).

2.4. Исследование морфологии методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ)

Метод сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) позволяет получать очень четкие снимки поверхности образца. Микроскоп сканирует поверхность тонким электронным лучом и улавливает отраженные частицы. Если настроить прибор на регистрацию обратно рассеянных электронов, на снимке можно увидеть разницу в составе материала: разные элементы будут отличаться по яркости. В итоге получаются черно-белые снимки, на которых по игре света и тени можно понять, как устроена поверхность: какой размер у частиц, есть ли на них шероховатости, трещины или другие дефекты.

2.5. Исследование методом оптической микроскопии

Макроморфологический контроль исходных и деградированных образцов микропластика осуществляли с помощью оптической микроскопии. Полученные цифровые изображения служили базой для выявления визуально различимых последствий химического разрушения. Основное внимание уделялось трансформации макроморфологии частиц, наличию крупных поверхностных дефектов и деградации оптических свойств материала (помутнение, изменение цвета). Данный анализ выступал в качестве надежного экспресс-метода для подтверждения начальных структурных изменений полистирола перед его детальным исследованием на сканирующем электронном микроскопе.

2.6. Определение дисперсного состава методом динамического светорассеяния (ДЛС)

Количественную оценку изменения размерных характеристик микропластика в процессе окислительной деструкции проводили методом динамического светорассеяния (ДЛС). Анализ эволюции гидродинамического диаметра частиц и индекса полидисперсности (PDI) применяли для инструментального подтверждения фрагментации полистирола. Сравнение кривых распределения частиц по размерам (до и после обработки реактивом Фентона) позволило объективно зафиксировать сдвиг размерных фракций в микро- и нанодиапазон, а также оценить агрегативную устойчивость исследуемых полимерных суспензий.

3 РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Визуальная оценка и анализ морфологических изменений методом оптической микроскопии

Эффективность деструкции полимерного субстрата в рамках передового окислительного процесса (АОР) оценивалась путем верификации морфологических изменений микрочастиц. Сравнительный анализ состояния поверхности до и после воздействия системы Фентона ($FeSO_4$*$7H_2O$, экспозиция 24 ч) проводился методом оптической микроскопии.

На микрофотографиях нативного полистирола (рис. 1а) отчетливо визуализируются крупнодисперсные конгломераты, обладающие выраженной геометрической огранкой и прямолинейными границами раздела фаз. Структура исходных фрагментов гомогенна; отсутствие дефектов, микротрещин или развитого порового пространства подтверждает термодинамическую устойчивость и химическую инертность чистого ПС-пластика.

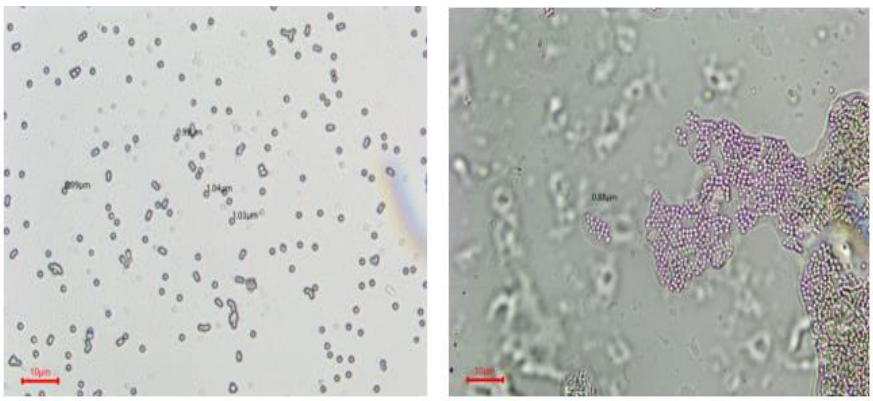


Рисунок 1 – Оптические микрофотографии полистирольного микропластика:
а) исходный образец до обработки; б) образец после окислительной деструкции в системе Фентона (24 часа).

Применение каталитической системы Фентона приводит к существенным изменениям микроструктуры поверхности материала (рис. 1б), вызывая его физико-химическую трансформацию. В результате обработки наблюдается разрушение исходных монолитных структур с образованием мелких фрагментированных частиц, распределённых по поверхности неравномерно. Чёткие границы частиц исчезают, уступая место более размытым и неровным контурам. Поверхность становится более шероховатой, что указывает на разрыхление верхнего слоя материала под действием окислительных процессов.

Наблюдаемые изменения морфологии связаны с воздействием высокоактивных гидроксильных радикалов (•OH), которые образуются в системе Фентона непосредственно в процессе реакции. Эти радикалы взаимодействуют с полимером, вызывая разрушение углеродной цепи макромолекул полистирола. Основные изменения происходят в приповерхностном слое материала, что приводит к снижению молекулярной массы и накоплению дефектов структуры. В результате ухудшаются механические свойства полимера. Совокупность этих процессов способствует постепенному разрушению частиц и их распаду на более мелкие фрагменты, вплоть до перехода в мелкодисперсное состояние в водной среде.

3.2. Морфологический анализ деструкции поверхности методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ)

Результат анализа микроструктурных трансформаций и верификация механизмов деградации полистирола (ПС) проводились с использованием сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Микрофотографии образца после 24-часовой экспозиции в среде реагента Фентона, полученные при различных увеличениях (рис. 2), позволяют комплексно охарактеризовать морфологию разрушения полимерной матрицы. Представленная серия снимков визуализирует специфику деструктивных процессов, протекающих на микроуровне под воздействием окислительной системы.

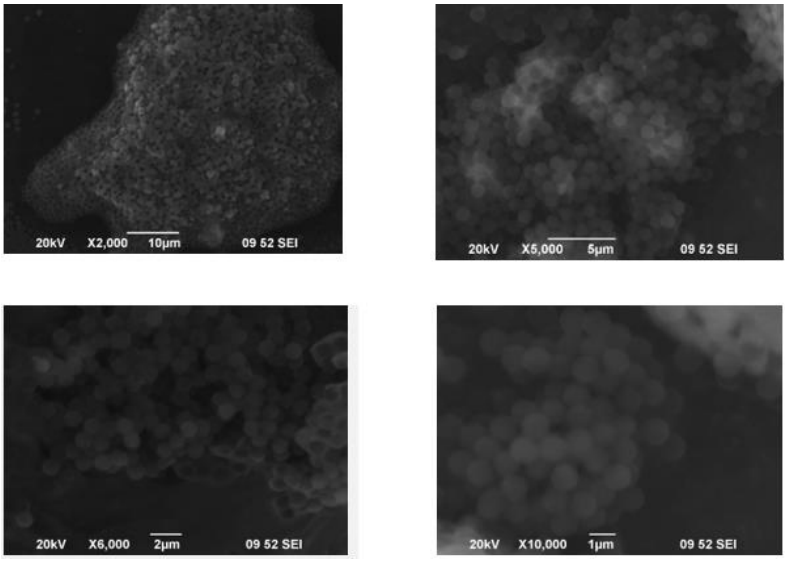


Рисунок 2 – СЭМ-микрофотографии ПС-микропластика после окислительной деградации:
а) панорамный вид деградированной частицы (×2000); б) формирование эрозионных зон и первичной пористости (×5000); в) ячеистая (сотовая) структура разрушенного полимера (×6000); г) детальная визуализация субмикронных пор и кратеров (×10000).

Снимки электронной микроскопии подтверждают,что поверхность частиц полистирола сильно изменилась. На общем плане (рис. 2а) хорошо видно, как деформировались сами частицы и появился сложный рельеф. Если рассмотреть образцы при большом увеличении (рис. 2б, 2в), становится заметна кавернозная структура (множество мелких углублений). Такой рельеф возникает из-за того, что гидроксильные радикалы (•OH) точечно разрушают участки полимерных цепей.

Микрофотографии с максимальным разрешением (рис. 2г, масштаб 1 мкм) позволяют локализовать многочисленные субмикронные поры и каверны. Появление такой пористости на межфазной границе «твердое тело – жидкость» служит прямым доказательством необратимой химической деградации макромолекул и ведет к существенному росту удельной

площади поверхности образца. Данный фактор интенсифицирует диффузию реагентов вглубь полимерного каркаса, ускоряя дезинтеграцию частиц и их последующую минерализацию.

Для количественной оценки масштабов деструкции был проведен анализ размерного распределения фрагментов на основе данных СЭМ (рис. 3). На полученных изображениях (увеличение ×5000) зафиксирована выраженная макроскопическая фрагментация, подтверждающая эффективность каталитической системы в процессах разрушения исходного микропластика.

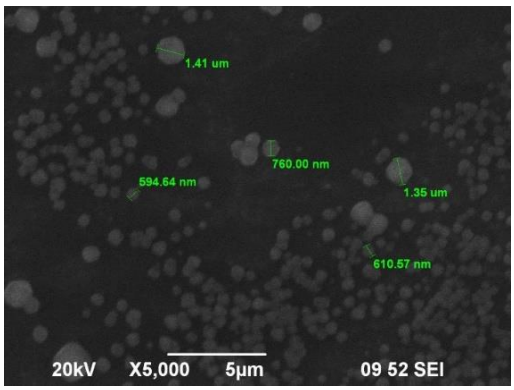


Рисунок 3 – СЭМ-изображение ПС-микропластика с количественным анализом размеров фрагментов после 24-часовой деградации

Экспериментальные данные подтверждают, что окислительная деструкция полимера в системе Fe^{2+} приводит к дезинтеграции монолитной матрицы с образованием дискретных фрагментов микронного и субмикронного масштабов. Размерный анализ указывает на выраженную полидисперсность продуктов распада: в пробах идентифицированы как относительно крупные агрегаты (1,35-1,41 мкм), так и высокодисперсные элементы с характерным размером 590-760 нм.

Наличие фракций нанометрового диапазона свидетельствует о том, что воздействие гидроксильных радикалов (•OH) не ограничивается поверхностной эрозией, а затрагивает макромолекулярные цепи во всем объеме приповерхностного слоя. Данный механизм разрушения критически важен для технологий водоочистки: измельчение микропластика до наноразмерного состояния резко увеличивает суммарную площадь реакционной поверхности. Это создает условия для интенсификации процессов глубокой минерализации загрязнителей до химических форм с пониженным экотоксикологическим потенциалом.

Прямая визуализация морфологии конечных продуктов деградации, выполненная методом СЭМ при увеличении ×10000 (рис. 4), подтверждает выход процесса разрушения за пределы микроразмерного диапазона. Высокое разрешение снимков позволяет верифицировать формирование структурных единиц, соответствующих наноуровню организации вещества.

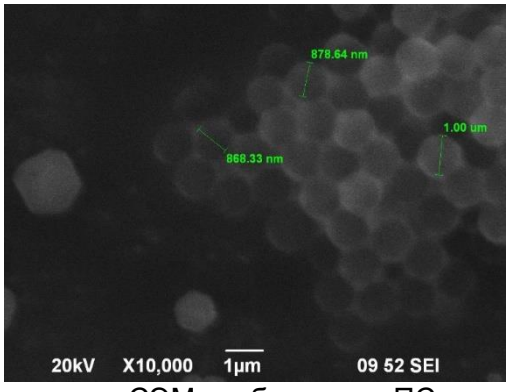


Рисунок 4 – Высокоразрешающее СЭМ-изображение ПС-микропластика: визуализация субмикронных фрагментов и глубокой деструкции сферических структур

На полученных микрофотографиях фиксируются дискретные образования преимущественно сферической и квазисферической морфологии, сформировавшиеся в результате исчерпывающей дезинтеграции полимерной матрицы. Согласно результатам измерений, конечные продукты реакции характеризуются высокой степенью дисперсности: поперечный размер большинства частиц варьируется в узком диапазоне 868-878 нм, что подтверждает их принадлежность к субмикронному уровню.

Изменение формы и поверхности частиц указывает на существенное разрушение полимерных цепей полистирола. Процесс, вероятно, начинается с образования отдельных участков окисления, которые со временем объединяются. В результате исходная структура распадается на более мелкие частицы нано- и субмикронного размера.

Специфика взаимодействия электронного пучка с поверхностью фрагментов – в частности, их частичная проницаемость и визуальное снижение электронной плотности – указывает на разрыхление структуры материала. Данные признаки могут служить косвенным подтверждением интенсивной окислительной модификации полимера, сопровождающейся падением его плотности под воздействием реакционной среды.

3.3. Анализ размерного распределения методом динамического светорассеяния (ДЛС)

Количественная оценка эффективности процесса Фентона и статистическая верификация фрагментации полистирольного микропластика проводились на основе сравнительного анализа распределения частиц по гидродинамическим размерам. Дифференциальные кривые, полученные методом динамического светорассеяния (ДЛС) для исходных и экспонированных образцов, представлены на рисунке 5.

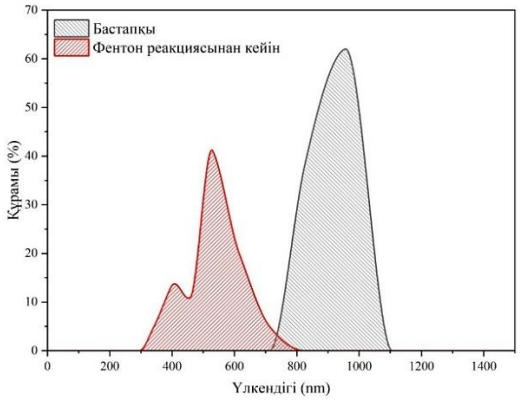


Рисунок 5 – Распределение частиц ПС-микропластика по размерам (DLS) в водной среде до и после процесса Фентона

Анализ исходного образца. Распределение исходного микропластика (серый цвет) имеет один четко выраженный пик в области 900-1100 нм. Основная часть частиц (около 62%) обладает диаметром 950 нм. Это подтверждает, что до начала обработки образцы были достаточно однородными по размеру.Трансформация системы под воздействием реагента Фентона. 24-часовая экспозиция в каталитической среде Fe^{2+}/H_2O_2 приводит к радикальной перестройке размерного профиля (красный цвет), смещающегося в область меньших значений. Ключевые изменения параметров распределения заключаются в следующем:

– Гипохромный сдвиг максимума: доминирующий пик смещается в интервал 500-550 нм, фиксируя двукратное уменьшение характерного размера частиц относительно исходного состояния.

– Дифференциация фракций: переход к полимодальному распределению с появлением дополнительного максимума в районе 400 нм свидетельствует о стохастической деструкции макромолекул и интенсивном дроблении первичных конгломератов.

– Частицы стали более разными по размеру: график заметно расширился по сравнению с исходным образцом. Это говорит о том, что процесс разрушения идет по всей массе пластика, а не только на поверхности.

Результаты динамического светорассеяния (ДЛС) коррелируют с данными сканирующей электронной микроскопии. Если снимки СЭМ (рис. 3, 4) показывают форму и размер лишь отдельных кусочков (около 870 нм), то метод ДЛС позволяет увидеть общую

картину для всех частиц в растворе. То, что средний размер уменьшился с 950 нм до 520 нм, прямо доказывает: система Фентона эффективно разрушает пластик.

Разрушение полимерного каркаса увеличивает площадь поверхности микрочастиц, а это необходимое условие для того, чтобы они в итоге полностью разложились (минерализовались). Таким образом, цифры подтверждают: наш метод эффективно дробит устойчивый пластик на очень мелкие фрагменты. Эти частицы гораздо активнее вступают в реакции и легче разрушаются дальше.

Заключение

Проведенное исследование подтверждает высокую деструктивную эффективность системы Фентона (Fe^{2+}/H_2O_2) в отношении полистирольного микропластика в водной среде. Комплексный морфологический анализ, выполненный методами оптической и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), верифицировал необратимый характер деградации полимерной матрицы. Установлено, что атака гидроксильных радикалов (•OH) инициирует глубокую структурную перестройку исходно инертной поверхности полистирола с формированием разветвленной сети микротрещин, эрозионных каверн и специфической ячеистой морфологии. Пластик заметно разъеден и расслаивается – это значит, что окисление проникло под его поверхность. Оно разрушает структуру полимера, из-за чего материал перестает быть цельным и начинает разрушаться изнутри.

Мы подтвердили разрушение пластика методами ДЛС и СЭМ. Результаты показывают, что средний размер частиц уменьшился почти вдвое – с 950 до 520 нм, а из-за появления мелких осколков разброс размеров стал больше. Снимки под микроскопом также подтверждают наличие фрагментов меньше 1 мкм. Из-за того, что частицы стали мелкими и пористыми, их площадь поверхности выросла. Это помогает реагентам легче проникать внутрь и полностью разрушать полимер. Таким образом, система Фентона при pH 3,0 эффективно расщепляет стойкий пластик.

Список литературы

1. Plastic waste inputs from land into the ocean / J.R. Jambeck et al // Science. – 2015. – Vol. 347, № 6223. – P. 768-771.
2. Lost at sea: where is all the plastic? / R.C. Thompson et al. // Science. – 2004. – Vol. 304, № 5672. – P. 838-838.
3. Geyer R. Production, use, and fate of all plastics ever made / R. Geyer, J.R. Jambeck, K.L. Law // Science Advances. – 2017. – Vol. 3, № 7. – e1700782.
4. Degradation of polystyrene microplastics by Fenton-like process: Mechanism and pathways / Y. Zhang et al // Journal of Hazardous Materials. – 2020. – Vol. 384. – P. 121151.
5. Fenton's reagent for the rapid and efficient isolation of microplastics from environmental samples / A.S. Tagg et al // Analytical Methods. – 2017. – Vol. 9, № 9. – P. 1432-1440.
6. Pignatello J.J. Advanced oxidation processes for organic contaminant destruction based on the Fenton reaction and related chemistry / J.J. Pignatello, E. Oliveros, A. MacKay // Critical Reviews in Environmental Science and Technology. – 2006. – Vol. 36, № 1. – P. 1-84.
7. Neyens E. A critical review of Fenton's reagent applications / E. Neyens, J. Baeyens // Journal of Hazardous Materials. – 2003. – Vol. 98, № 1-3. – P. 33-50.
8. Oxidative degradation of polystyrene microplastics by advanced oxidation processes / J.H. Kang et al // Chemosphere. – 2022. – Vol. 287. – P. 132320.
9. Microplastics in the marine environment: A review of their sources, distribution, effects and management / D. He et al // Engineering. – 2019. – Vol. 5, № 3. – P. 538-550.
10. Effect of Fenton-like oxidation on surface characteristics and adsorption properties of microplastics / P. Liu et al // Chemosphere. – 2019. – Vol. 234. – P. 151-159.
11. Using scanning electron microscopy for the identification of marine microplastic debris / J. Brandon et al // Marine Pollution Bulletin. – 2016. – Vol. 110, № 1. – P. 556-561.
12. Characterization of microplastics in water using dynamic light scattering / J. Li et al // Environmental Pollution. – 2018. – Vol. 237. – P. 557-563.
13. Degradation of microplastics in the environment: Processes, mechanisms, and influencing factors / J. Wang et al // Environmental Pollution. – 2021. – Vol. 270. – P. 116023.
14. Advanced oxidation processes for microplastics degradation: A recent update / S.S. Ali et al // Journal of Environmental Management. – 2023. – Vol. 326. – P. 116742.

Благодарность: *Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (ИРН проекта: BR27199301).*

И.О. Сапаргали*, А.А. Каныкешова, М.С. Кунарбекова, Ж. Токтарбай, С. Азат
Satbayev University,
050013, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Сәтпаев к-сі 22
*e-mail: sapargali.i@mail.ru

ФЕНТОН ПРОЦЕСІМЕН ПОЛИСТИРОЛ МИКРОПЛАСТИГІНІҢ ТОТЫҒУ ДЕГРАДАЦИЯСЫ

Су нысандарында полимерлі микробөлшектердің жиналуы оларды жоюдың жаңа, тиімдірек әдістерін іздеуді талап етеді. Ең қиын ыдырайтын ластағыштардың бірі – полистирол. Оның құрамындағы ірі фениль топтары микробтардың әсеріне кедергі жасап, материалдың химиялық тұрақтылығын қамтамасыз етеді. Осыған байланысты, бұл жұмыста Фентон жүйесін ($FeSO_4$ $7H_2O$ / H_2O_2) қолдана отырып, судағы полистирол бөлшектерінің тотығу арқылы ыдырауы зерттелді.Тәжірибелер 35-40°C температурада және pH 2-3 қышқылдық ортада жүргізілді. pH деңгейін осы тар ауқымда ұстап тұру өте маңызды: бұл темір иондарының белсенді болуына көмектеседі және олардың тұнбаға түсуіне жол бермейді. Мұндай жағдайда гидроксил радикалдары (•OH) белсенді бөліне бастайды. Олар өте күшті тотықтырғыш болғандықтан, полимер қаңқасынан сутегі атомдарын тартып алады. Бұл көміртегі байланыстарының үзілуіне және молекулалық массаның төмендеуіне әкеледі. Реакцияға дейінгі және одан кейінгі үлгілердің беткі өзгерістері оптикалық және сканирлеуші электронды микроскопия (СЭМ) әдістерімен бағаланды. Алынған суреттерден пластик бетінің бұзылғаны анық көрінеді: терең жарықтар, сызаттар мен ойықтар пайда болған. Сонымен қатар, бөлшектердің өлшемі динамикалық жарық шашырату (ДЛС) әдісімен тексерілді. Нәтижелер өңдеуден кейін бөлшектердің едәуір кішірейгенін растады.Тәжірибе нәтижелері Фентон реакциясы төзімді полимерлерді тиімді ыдырататынын дәлелдейді. Сондықтан бұл әдісті өндірістік ағын суларды тазарту жүйелері үшін болашағы зор кезең ретінде қарастыруға болады.*

Түйін сөздер: *микропластик; полистирол; Фентон процесі; тотығу деградациясы; суды тазарту.*

I. Sapargali*, A.A. Kanykeshova, M. Kunarbekova, Zh. Toktarbay, S. Azat
Satbayev University,
050013, Республика Казахстан, г. Алматы, ул.Сатпаева 22
*e-mail: sapargali.i@mail.ru

OXIDATIVE DEGRADATION OF POLYSTYRENE MICROPLASTIC BY THE FENTON PROCESS

*The buildup of plastic microparticles in water is a serious problem that requires new, faster ways to break them down. Polystyrene is one of the toughest pollutants to destroy. Because of its large phenyl groups, microbes can hardly break it down, making the material very stable. In this study, we looked at how to decompose polystyrene particles in water using the Fenton process ($FeSO_4$ * $7H_2O/H_2O_2$). We ran the experiments at a stable temperature of 35-40°C and a pH level of 2-3. Keeping the pH in this narrow range is vital; it keeps the iron active and stops it from settling out as a solid. Under these conditions, the system starts producing hydroxyl radicals (•OH). These radicals are powerful oxidizers that pull hydrogen atoms from the polymer frame, which breaks the carbon-carbon bonds and cuts the size of the molecules. To see how the surface changed before and after the reaction, we used optical and scanning electron microscopy (SEM). The images clearly show the plastic wearing away, with deep cracks, chips, and small pits (cavities) appearing. We also checked the particle sizes using dynamic light scattering (DLS). The data confirmed that the particles became significantly smaller after the treatment.Our results prove that the Fenton reaction effectively starts the breakdown of strong aromatic polymers. Therefore, this method is a promising step for industrial wastewater treatment systems.*

Key words: *microplastics; polystyrene; Fenton process; oxidative degradation; water treatment.*

Information about the authors

Inabat Sapargali* – master student, researcher at the Engineering Laboratory, Satbayev University; e-mail: sapargali.i@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-0258-8277.

Akerke Almaskyzy Kanykeshova – master student, researcher at the Engineering Laboratory, Satbayev University; e-mail: a.aslmasovna@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-6517-6933.

Makhabbat Kunarbekova – PhD, researcher at the Engineering Laboratory, Satbayev University; e-mail: m.kunarbekova@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8640-0667.

Zhexenbek Toktarbay – PhD, Associate Professor, Researcher at the Engineering Profile Laboratory, Satbayev University; e-mail: zhexenbek.toktarbay@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4131-0905.

Seitkhan Azat – PhD, professor, Head of the Laboratory of Engineering Profile, Satbayev University; e-mail: s.azat@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4131-0905.

Авторлар туралы мәліметтер

Инабат Омирузаккызы Сапаргали* – магистрант, Инженерлік-бейінді зертханасының ғылыми қызметкері, Сәтбаев Университеті; e-mail: sapargali.i@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-0258-8277.

Ақерке Алмасқызы Қанықешова – магистрант, Инженерлік-бейінді зертханасының ғылыми қызметкері, Сәтбаев Университеті; e-mail: a.aslmasovna@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-6517-6933.

Махаббат Сейт-Задаевна Кунарбекова – PhD, Инженерлік-бейінді зертханасының ғылыми қызметкері, Сәтбаев Университеті; e-mail: m.kunarbekova@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8640-0667.

Жексенбек Тоқтарбай – PhD, қауым.профессор, Инженерлік-бейінді зертханасының ғылыми қызметкері, Сәтбаев Университеті; e-mail: zhexenbek.toktarbay@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4131-0905.

Сейтхан Азат – PhD, профессор, Инженерлік-бейінді зертханасының жетекшісі, Сәтбаев Университеті; e-mail: s.azat@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4131-0905.

Сведения об авторах

Инабат Омирузаккызы Сапаргали* – магистрант, научный сотрудник лаборатории инженерного профиля, Сатбаев Университет; e-mail: sapargali.i@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-0258-8277.

Акерке Алмаскызы Каныкешова – магистрант, научный сотрудник лаборатории инженерного профиля, Сатбаев Университет; e-mail: a.aslmasovna@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-6517-6933.

Махаббат Сейт-Задаевна Кунарбекова – PhD, научный сотрудник лаборатории инженерного профиля, Сатбаев Университет; e-mail: m.kunarbekova@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8640-0667.

Жексенбек Токтарбай – PhD, ассоц.профессор, научный сотрудник лаборатории инженерного профиля, Сатбаев Университет; e-mail:zhexenbek.toktarbay@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4131-0905.

Сейтхан Азат – PhD, профессор, Руководитель лаборатории инженерного профиля, Сатбаев Университет; e-mail:s.azat@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/ 0000-0003-4131-0905.

Поступила в редакцию 30.03.2026
Поступила после доработки 25.05.2026
Принята к публикации 28.05.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-77

МРНТИ: 31.15.01

Д.Р. Мулдаш*, А.Р. Кажмуратов, К.Б. Шакенов, Д.О. Мурзалинов, С. Азат
Satbayev University,
050013, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева 22
*e-mail: muldashevdias@gmail.com

МАГНИЕТЕРМИЧЕСКОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ КРЕМНЕЗЁМА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОЧИСТОГО КРЕМНИЯ

Аннотация: *В данной научно-исследовательской работе подробно изучен процесс магниетермического восстановления (МТВ) аморфного диоксида кремния, извлеченного из рисовой шелухи Кызылординской области, с целью синтеза нанопористого кремния высокой чистоты. Диоксид кремния был экстрагирован методом щелочного выщелачивания с последующим осаждением, что позволило получить прекурсор с развитой удельной поверхностью. В ходе*

©Д.Р. Мулдаш, А.Р Кажмуратов, К.Б. Шакенов, Д.О. Мурзалинов, С. Азат, 2026

экспериментального исследования при температурах 650-700°C в инертной атмосфере аргона были проанализированы термодинамические закономерности процесса. Особое внимание уделено роли хлорида натрия (NaCl) в качестве теплопоглощающего агента, предотвращающего спекание структуры за счет контроля экзотермического эффекта реакции. Для эффективного удаления побочных фаз, таких как оксид магния (MgO) и остаточный SiO2, применялась многоступенчатая гидрометаллургическая очистка в системе HCl–H_2O–EtOH. Фазовый состав и морфологические особенности полученных образцов были детально охарактеризованы методами рентгенофазового анализа (РФА) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Результаты подтвердили формирование поликристаллического кремния с уникальной иерархической пористой морфологией, полностью унаследованной от структуры биогенного прекурсора. Предложенная методика демонстрирует высокую эффективность и экологическую значимость использования возобновляемого агропромышленного сырья для получения высокотехнологичных наноматериалов.

Ключевые слова: *магниетермическое восстановление, диоксид кремния, рисовая шелуха, нанопористый кремний, теплопоглотитель, NaCl, выщелачивание.*

1 ВВЕДЕНИЕ

Республика Казахстан активно интегрируется в глобальные цепочки создания стоимости высокотехнологичных материалов, что обусловливает повышенный интерес к методам получения кремния высокой чистоты для энергетики нового поколения [1, 2]. Традиционные методы производства кремния, основанные на карботермическом восстановлении кварцита, характеризуются экстремально высокими температурами (свыше 2000 °C) и значительным экологическим следом в виде выбросов CO_2 [3, 4].

В последние десятилетия интенсивно развиваются альтернативные подходы к синтезу кремния из возобновляемого сырья. Особый интерес представляет использование рисовой шелухи – аграрного отхода с высоким содержанием аморфного SiO_2 (до 20 мас.%), что делает её привлекательным и доступным прекурсором [8, 10]. В этом контексте магниетермическое восстановление (Magnesiothermic Reduction, MgTR) выступает как энергоэффективная и экологически менее затратная альтернатива, позволяющая осуществлять синтез при температурах 600-900 °C с сохранением морфологических особенностей исходного SiO_2 [5, 12].

Успешная реализация МТВ требует фундаментального понимания термодинамических закономерностей. Основная реакция восстановления описывается уравнением:

$$SiO_2(s) + 2Mg(g,l) \rightarrow Si(s) + 2MgO(s) \quad (1)$$

Данный процесс характеризуется отрицательным изменением энергии Гиббса (ΔG) во всём интервале температур от 298 K до 1300 K, что свидетельствует о его высокой термодинамической вероятности [7, 12]. Однако высокая экзотермичность реакции (ΔH ≈ −293.4 кДж/моль) создаёт серьёзные технологические вызовы [8, 12]: выделяемое тепло способно локально повышать температуру реакционной смеси выше заданной температуры печи, что приводит к спеканию наночастиц Si, потере пористости и даже к его плавлению (Тпл = 1414°C) [11].

Для минимизации неконтролируемого тепловыделения в систему вводят инертные теплопоглотители (heat scavengers), в частности хлорид натрия (NaCl). NaCl обладает температурой плавления 801 °C и высокой удельной теплотой плавления (28.8 кДж/моль), что позволяет эффективно стабилизировать температуру в зоне реакции на уровне около 800 °C [11, 12].

Таким образом, целью данной работы является разработка и оптимизация процесса магниетермического восстановления аморфного SiO_2, полученного из рисовой шелухи Казахстана, для синтеза нанопористого кремния высокой чистоты, пригодного для применения в энергетических устройствах нового поколения.

2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Материалы исследования: Для восстановления наноразмерных частиц кремния были использованы высокочистый магний (95%) и диоксид кремния, полученный из рисовой шелухи, а также NaCl. Рисовая шелуха была заготовлена в Кызылординской области Казахстана. Выбор SiO_2 из рисовой шелухи обоснован высоким содержанием SiO_2 (11.5 мас.%) и превосходящей аналоги пористостью – удельная поверхность в среднем составляет

627 $м^2/г$ [8]. Основные компоненты рисовой шелухи: сырое волокно, целлюлоза, лигнин, пентозаны, белки, SiO_2, а также макро- и микроэлементы (фосфор, магний, калий, кальций, сера, цинк, молибден, кобальт и бор).

Для гидрометаллургической очистки использовалась соляная кислота (HCl, 37%), этанол (EtOH, 96%) и дистиллированная вода. В случае наличия остаточного невосстановленного SiO_2 применяли 5% раствор плавиковой кислоты (HF).

2.2 Получение диоксида кремния из рисовой шелухи

Для экстракции SiO_2 из рисовой шелухи применяли метод щелочного выщелачивания. Было использовано 45 г предварительно промытой и высушенной рисовой шелухи. Готовили 0.25 М раствор NaOH объёмом 0.75 л (7.50 г NaOH). Смесь нагревали до 90 °C при постоянном перемешивании (250 об/мин) в течение 2 ч. В ходе процесса аморфный SiO2 растворяется с образованием силиката натрия по реакции:

$$SiO_2 + 2NaOH \rightarrow Na_2SiO_3 + H_2O \quad (2)$$

По завершении реакции смесь охлаждали до комнатной температуры и фильтровали через фильтровальную бумагу (0.45 мкм) для отделения нерастворимого остатка. Полученный раствор силиката натрия подкисляли до pH ~7.6, при котором анионы силикатов протонируются и образуют кремниевую кислоту, коагулирующую в виде коллоидного геля [9]. Гель промывали несколько раз и центрифугировали (3000 об/мин, 5 мин) для удаления ионов Na+/Cl– и органических примесей [10].

2.3 Термическое восстановление

Процесс проводится в герметичном стальном реакторе или в трубчатой печи в атмосфере аргона. Температурный интервал: 650-700 °C. Температура 650 °C является минимально необходимой, так как она соответствует температуре плавления магния, обеспечивающей достаточное давление паров для протекания реакции.[4] Исследования показывают, что при 700 °C реакция завершается в течение первых 2 часов, однако для обеспечения полноты превращения в крупных масштабах время может быть увеличено [17, 18].

Исходные порошки SiO_2 и Mg (с избытком магния ~10% для компенсации потерь на испарение) подвергали механическому смешению. NaCl вводился в виде водного раствора с последующим выпариванием, что обеспечивало заполнение пор SiO_2 солью и более эффективный отвод тепла [11].

Восстановление проводили в горизонтальной трубчатой печи в атмосфере аргона. Нагрев осуществляли со скоростью 5°C/мин до целевой температуры 680°C, выдержка – 2 ч, охлаждение в печи – ~3 ч до комнатной температуры. Применение медленного нагрева снижает вероятность внезапной экзотермии и обеспечивает равномерную передачу тепла через NaCl к частицам SiO_2/Mg [12]. Температура 650 °C является минимально необходимой, поскольку соответствует температуре плавления Mg и обеспечивает достаточное давление его паров для протекания реакции [4].

2.4 Гидрометаллургическая очистка

Продукт спекания («спёк») содержит Si, MgO, NaCl, а также возможные примеси Mg2Si и непрореагировавшего SiO_2 [5]. Для их удаления применяли многостадийную очистку:

Стадия 1. Промывка дистиллированной водой при 40 °C (~1 ч) для удаления NaCl и растворимых хлоридов ($MgCl_2$).

Стадия 2. Выщелачивание в системе HCl– H_2O –EtOH (объёмное соотношение: HCl – 5.6%, H_2O – 8.3%, EtOH – 50.5%) при 60-80°C в течение 2-4 ч. Добавление этанола выполняет несколько функций: (а) предотвращает полимеризацию H4SiO4 и гелеобразование; (б) улучшает смачиваемость гидрофобных нанопорошков Si; (в) демпфирует бурную реакцию Mg2Si с HCl, сопровождающуюся выделением SiH4

Стадия 3 (при необходимости). Если на рентгенограммах после HCl-очистки сохраняется аморфное гало в области $2\theta \approx 20\text{-}25°$, применяют 5% HF в течение 10-30 мин для селективного растворения остаточного SiO_2.

После выщелачивания материал уплотняли центрифугированием (3000 об/мин, 5 мин) и сушили при 80°C перед анализом (табл. 1).

Таблица 1 – Термодинамические параметры ключевых реакций системы SiO_2–Mg при различных температурах [12]

Реакция	ΔG°_{298} (ккал/моль)	ΔG°_{923} (ккал/моль)	ΔG°_{1368} (ккал/моль)	Вероятный продукт
$SiO_2 + 2Mg \rightarrow Si + 2MgO$	−67.36	−62.45	−56.67	Кремний
$SiO_2 + 4Mg \rightarrow 2MgO + Mg_2Si$	−85.72	−79.24	−70.30	Силицид магния
$SiO_2 + MgO \rightarrow MgSiO_3$	−8.35	−8.65	−11.48	Метасиликат
$SiO_2 + MgO \rightarrow Mg_2SiO_4$	−3.70	−13.69	−13.12	Ортосиликат

3 РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

3.1 Рентгенофазовый анализ восстановленного кремния

По результатам рентгенофазового анализа образцов, спечённых при 700 °C, получена дифрактограмма с хорошо выраженными пиками, указывающими на образование кристаллических фаз, характерных для продуктов магниетермического восстановления диоксида кремния (рис. 1). Основной интенсивный рефлекс зафиксирован при $2\theta \approx 28.55°$, что соответствует отражению от плоскости (111) элементарного кремния. Дополнительные пики в областях 47.39° и 56.33° подтверждают наличие кристаллического Si с рефлексами от плоскостей (220) и (311) соответственно. Эти данные свидетельствуют об успешном восстановлении SiO_2 с образованием Si в поликристаллической форме. На дифрактограмме также присутствуют интенсивные пики в областях 42.95° и 62.38°, соответствующие кристаллической фазе MgO – основному побочному продукту реакции (1). MgO не вступает в дальнейшие реакции при данных условиях и удаляется на стадии кислотного выщелачивания.

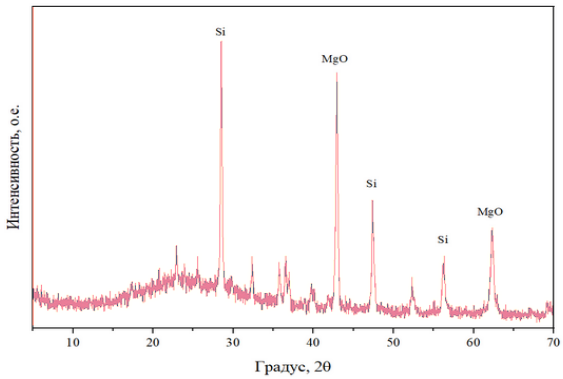


Рисунок 1 – Дифрактограмма Si после восстановления SiO_2 магнием

3.2 Морфологический анализ восстановленного кремния

Исследование полученного порошка методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) выявило сложную многоуровневую морфологию продуктов восстановления. На обзорных микрофотографиях (рис. 2, 3) отчетливо наблюдается значительная полидисперсность образца. Размер частиц варьируется в широком диапазоне: от крупных агрегатов, достигающих 5-100 мкм в поперечнике, до мелкодисперсной фракции микронного и субмикронного размеров.

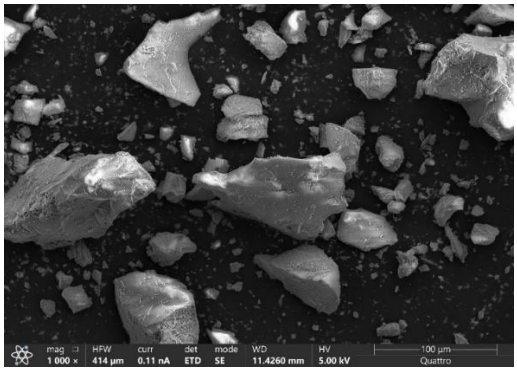


Рисунок 2 – СЭМ-микрофотография порошка восстановленного кремния при различном увеличении: обзорный снимок, демонстрирующий полидисперсность и агрегацию (масштабный отрезок 100 мкм)

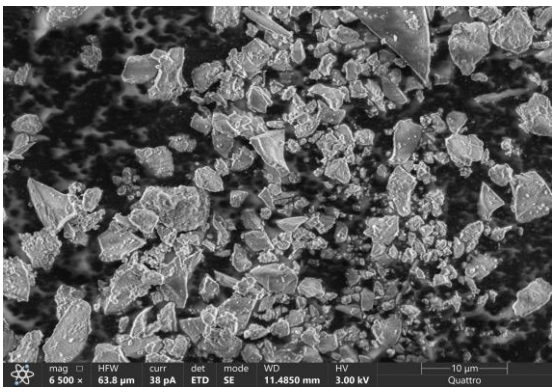


Рисунок 3 – Осколочная морфология частиц микронного размера
(масштабный отрезок 10 мкм)

Анализ формы частиц показывает преобладание осколочной (фрагментированной) морфологии с острыми краями и неровными поверхностями сколов. Отсутствие сферических или оплавленных частиц свидетельствует о том, что процесс восстановления протекал в твердой фазе без достижения температур плавления кремния, а полученный продукт наследует структурные особенности исходного прекурсора диоксида кремния (псевдоморфное превращение). Мелкие частицы склонны к гетероагрегации, налипая на поверхность более крупных конгломератов, что обусловлено высокой поверхностной энергией восстановленного материала. Более детальное изучение поверхности отдельных крупных частиц при высоком увеличении (рис. 2) позволяет охарактеризовать их текстуру как «рыхлую» или чешуйчатую. Такая развитая поверхность, вероятно, формируется в процессе удаления побочных продуктов реакции восстановлении (например, оксида магния в случае магниетермии) методами кислотного выщелачивания, оставляя после себя развитую систему пор и шероховатостей.

Стоит отметить, что на микрофотографиях, полученных при различных ускоряющих напряжениях (HV от 3 до 20 kV), наблюдается характерный эффект электрической зарядки поверхности (выражающийся в повышенной яркости краев и выступов, особенно заметный на рис. 4). Это может косвенно указывать на неоднородность электрофизических свойств образца, в частности, на наличие диэлектрических фаз – остаточного недовосстановленного оксида кремния (SiO_2 или SiOx) или силикатов, локализованных на поверхности частиц кремния. Это требует дальнейшего подтверждения методами энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДС).

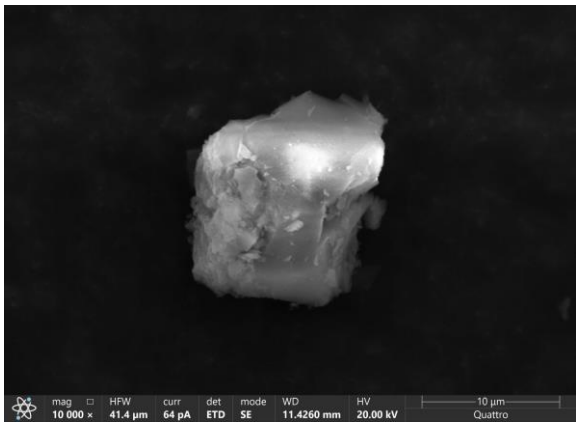


Рисунок 4 – Чешуйчатая текстура поверхности отдельной частицы
(масштабный отрезок 10 мкм)

3.3 Энергодисперсионный рентгеновский спектр

Для оценки химической чистоты и элементного состава синтезированного материала после проведения магниетермического восстановления и последующего кислотного травления был использован метод энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДС).

Измерения проводились при низком ускоряющем напряжении электронной пушки 5 кВ, что позволило минимизировать глубину генерации рентгеновского излучения и с высокой точностью зафиксировать состав приповерхностных слоев исследуемых частиц.

Анализ полученного ЭДС-спектра (рис. 5) свидетельствует о высокой степени конверсии исходного диоксида кремния. На спектрограмме четко идентифицируются пики характеристического излучения кремния и остаточного магния. Интенсивные низкоэнергетические пики в области до 0.5 кэВ соответствуют легким элементам (углеродной подложке и адсорбированному кислороду), качественная оценка которых в данном режиме обладает высокой погрешностью и традиционно исключается из прецизионного матричного расчета металлической фазы. Согласно результатам количественного ZAF-пересчета (табл. 2) массовая доля кремния в очищенном продукте составляет 81.3 мас. %, 79.0 ат. %, в то время как содержание остаточного магния не превышает s18.7 мас. % 21.0 ат. %. Низкие значения статистической погрешности определения элементов 0.6 % для магния и 1.5 % для кремния подтверждают достоверность полученного соотношения интенсивностей чистых импульсов.

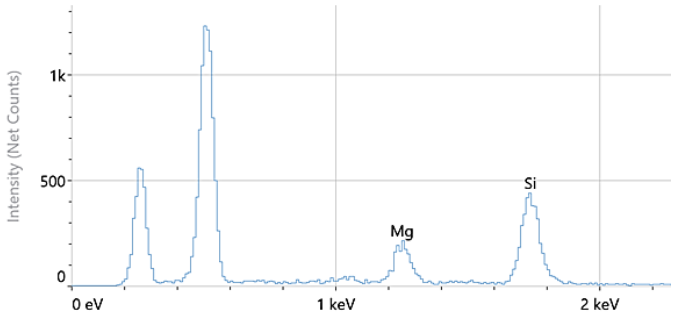


Рисунок 5 – Энергодисперсионный рентгеновский спектр (ЭДС) и количественные характеристики элементного состава образца полученного кремния после стадии химической очистки. Скорость счета: 106 имп/с, ускоряющее напряжение: 5 кВ. Общее время набора спектра: 187 секунд, Общее число импульсов: 19 791

Таблица 2 – Элементный состав и параметры набора спектра образца кремния по данным энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДС)

Элемент	Линия	Ат. %	Вес. %	Чистые импульсы	Погрешность ат. %	Погрешность вес. %
Mg	K	21.0	18.7	1 362	0.7	0.6
Si	K	79.0	81.3	3 748	1.4	1.5

Присутствие остаточного магния обусловлено инкапсуляцией наноразмерных доменов оксида магния (MgO) внутри плотной кремниевой оболочки, что предотвращает их прямой контакт с жидким травильным агентом.

Тем не менее, преобладание фазы кремния и полное отсутствие пиков сторонних примесей (в частности, ионов хлора) подтверждают эффективность разработанного протокола многостадийной промывки с использованием водно-этанольных смесей.

3.4 Обсуждение механизмов и оптимизация выхода продукта

Анализ экспериментальных данных позволяет выявить ряд закономерностей. Согласно источнику [13], при температурах выше 650 °C систему переводится в режим, где высокая экзотермичность реакции поддерживается непрерывным притоком паров магния, что снимает диффузионные ограничения, характерные для твердофазного взаимодействия. Базовое кинетическое уравнение процесса:

$$SiO_{2\,(тв)} + 2Mg_{(г)} \rightarrow 2MgO_{(тв)} + Si_{(тв)}\,[13] \qquad (3)$$

При температурах свыше 700 °C давление паров магния становится достаточным для обеспечения быстрого массопереноса к поверхности SiO_2.

Зависимость давления насыщенного пара жидкого магния (P_{Mg}, в мм рт. ст. или Па) от абсолютной температуры (T, в Кельвинах) в интервале температур 923-1380 K описывается эмпирическим уравнением Клапейрона-Клаузиуса:

$$\log_{(10)} P_{Mg}\ [\text{мм рт. ст.}] = 8.489 - 6740 / T \quad (4)$$

В системе СИ (давление в Паскалях) уравнение имеет вид:

$$\log_{(10)} P_{Mg}\ [\text{Па}] = 10.614 - 6740 / T \quad (5)$$

Расчетные значения давления пара магния в исследуемом диапазоне:

при 650 °C (923 K) – точка плавления: $P_{Mg} \approx 404$ Па ≈ 0.004 атм (3 мм рт. ст.)

при 700 °C (973 K): $P_{Mg} \approx 4820$ Па ≈ 0.048 атм (36 мм рт. ст.)

при 800 °C (1073 K): $P_{Mg} \approx 21970$ Па ≈ 0.217 атм (165 мм рт. ст.)

При переходе от 650 °C к 700°C парциальное давление паров магния возрастает более чем в 10 раз, а при 800°C достигает более 20% от атмосферного давления. Это термодинамически подтверждает экспоненциальный рост плотности газового потока восстановителя к поверхности диоксида кремния при температурах свыше 700°C.

Однако чрезмерное повышение температуры (выше 900°C) нежелательно из-за интенсификации побочных реакций образования силикатов магния, которые труднее поддаются выщелачиванию, чем оксид магния.[9]

Важным аспектом является контроль полноты удаления магния, который подтверждается отсутствием пиков металлического Mg на дифрактограмме конечного продукта, однако наблюдалось присутствие кубического MgO. Применение этанола (или водно-этанольных смесей) на финальной стадии промывки обусловлено его низким поверхностным натяжением и способностью эффективно проникать в микро- и нанопористую структуру материала для экстракции адсорбированных сольватированных хлорид-ионов, а также предотвращением гидролиза остаточных солей магния до труднорастворимых оксихлоридов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследован процесс магниетермического восстановления наноразмерного SiO_2, выделенного из рисовой шелухи Кызылординской области, в качестве метода получения высокочистого пористого кремния. Установлено, что введение NaCl в качестве теплопоглотителя позволяет эффективно контролировать экзотермию реакции при 680°C, предотвращая спекание частиц и сохраняя нанопористую морфологию продукта.

Рентгенофазовый анализ подтверждает образование поликристаллического кремния с характерными рефлексами плоскостей (111), (220) и (311) при сопутствующем выходе MgO в качестве основного побочного продукта. Данные СЭМ демонстрируют иерархическую пористую морфологию порошка Si с осколочной формой частиц, унаследованной от наноструктурного SiO_2-прекурсора.

Разработанный протокол гидрометаллургической очистки в системе $HCl–H_2O–EtOH$ обеспечивает эффективное удаление MgO и Mg_2Si при минимальном содержании остаточных хлоридов. Полученные результаты создают научно-методическую основу для масштабирования процесса и применения кремния из возобновляемого агропромышленного сырья в производстве анодов для литий-ионных аккумуляторов и полупроводниковых материалов нового поколения.

Список литературы

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

5. 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.

6. 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.
7. Nadiradze A.B. Thermodynamic probability of realization of the process of silicon production from geothermal silica by reduction using magnesium / A.B. Nadiradze // Bulletin of the Georgian National Academy of Sciences. – 2010. – Vol. 4, № 3. http://science.org.ge/old/moambe/3-2/Nadiradze.pdf.
8. Scalable fabrication of silicon nanostructures for anodes of high-performance lithium-ion batteries / J.-K. Yoo et al // Advanced Materials. – 2012. – Vol. 24, № 40. – P. 5452-5456. https://doi.org/10.1002/adma.201201601.
9. Banerjee H.D. Investigations on the production of silicon from rice husks by the magnesium method / H.D. Banerjee, S. Sen, H.N. Acharya // Materials Science and Engineering. – 1982. – Vol. 52, № 2. – P. 173-179. https://doi.org/10.1016/0025-5416(82)90046-X.
10. Bekseitova K. Sintez SiO2 iz risovoi shelukhi i ego primenenie / K. Bekseitova, A.Zh. Baimenov, S. Azat // Gorenie i plazmokhimiya. – 2023. – T. 21, № 2. – S. 110-120. (In Russian).
11. The effect of heat treatments on the Si anode generated by magnesiothermic reduction of silica from rice husks / S.K. Lim et al // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. – 2015. – Vol. 26. – P. 101-105. https://doi.org/10.1016/j.jiec.2014.11.023.
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.
13. Key developments in magnesiothermic reduction of silica: insights into reactivity and future prospects / Y. Maximilian et al // Chem. Sci. 10.1039/D4SC04065Ahttp://dx.doi.org/10.1039/D4SC04065A.

Д.Р. Мулдаш*, А.Р. Қажымұратов, К.Б. Шәкенов, Д.О. Мурзалинов, А. Азат
Satbayev University,
050013, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Сәтбаев к-сі, 22
*e-mail: muldashevdias@gmail.com

КҮРІШ ҚАУЫЗЫНАН АЛЫНҒАН КРЕМНЕЗЁМДЫ МАГНИЕТЕРМИЯЛЫҚ ТОТЫҚСЫЗДАНДЫРУ АРҚЫЛЫ ЖОҒАРЫ ТАЗА КРЕМНИЙ АЛУ

Бұл ғылыми-зерттеу жұмысында жоғары тазалықтағы нанокеуекті кремнийді синтездеу мақсатында Қызылорда облысының күріш қауызынан бөлініп алынған аморфты кремний диоксидін магнийтермиялық тотықсыздандыру (МТТ) процесі жан-жақты әрі егжей-тегжейлі зерттелді. Кремний диоксиді алдын ала химиялық өңдеу, яғни сілтілік шаймалау және одан кейінгі қышқылдық тұндыру әдістерімен алынды, бұл меншікті беті кеңінен дамыған жоғары сапалы прекурсорды алуға мүмкіндік берді. Тәжірибелік зерттеулер барысында аргонның инертті атмосферасында 650-700°C температуралық диапазонда процестің негізгі термодинамикалық заңдылықтары мен кинетикасы талданды. Реакцияның күшті экзотермиялық әсерін бақылау және құрылымның балқып, бірігуін болдырмау үшін жылу сіңіргіш агент ретіндегі натрий хлоридінің (NaCl) атқаратын маңызды рөліне ерекше назар аударылды. Магний оксиді (MgO) және қалдық SiO_2 *сияқты жанама өнімдерді тиімді жою мақсатында HCl–H_2O–EtOH жүйесінде көп сатылы гидрометаллургиялық тазарту жұмыстары жүргізілді. Алынған үлгілердің фазалық құрамы мен морфологиялық ерекшеліктері рентгенфазалық талдау (РФТ) және сканерлеуші электрондық микроскопия (СЭМ) әдістерімен нақты сипатталды. Нәтижелер биогендік прекурсордың бастапқы құрылымынан толық мұраланған бірегей иерархиялық кеуекті морфологиясы бар поликристалды кремнийдің түзілуін толықтай растады. Ұсынылған әдістеме еліміздегі жаңартылатын агроөнеркәсіптік шикізатты пайдалана отырып, отандық жоғары технологиялық наноматериалдар өндірісін дамытудың жоғары тиімділігі мен стратегиялық экологиялық маңыздылығын айқын көрсетеді.*

Түйін сөздер: *магниетермиялық тотықсыздандыру, кремний диоксиді, күріш қауызы, нанокеуекті кремний, жылуабсорбент, NaCl, сілтілі экстракция.*

D.R. Muldash*, A.R. Kazhmuratov, K.B. Shakenov, D.O. Murzalinov, S. Azat
Satbayev University,
050013, Republic of Kazakhstan, Almaty, Satpayev Street, 22
*e-mail: muldashevdias@gmail.com

MAGNESIOTHERMIC REDUCTION OF RICE HUSK-DERIVED SILICA FOR HIGH-PURITY SILICON SYNTHESIS

This research paper presents a comprehensive study of the magnesiothermic reduction (MTR) process of amorphous silica derived from rice husks of the Kyzylorda region, aimed at synthesizing high-purity nanoporous silicon. Silica was extracted via alkaline leaching followed by precipitation, yielding a precursor with a highly developed specific surface area. During the experimental study conducted at temperatures of 650–700 °C in an inert argon atmosphere, the thermodynamic patterns of the process were analyzed. Special attention was paid to the role of sodium chloride (NaCl) as a heat-absorbing agent, which prevents structural sintering by controlling the exothermic reaction effect. For the efficient removal of by-products such as magnesium oxide (MgO) and residual SiO_2*, a multi-stage hydrometallurgical purification in the HCl–*H_2O*–EtOH system was utilized. The phase composition and morphological features of the synthesized samples were characterized in detail using X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM). The results confirmed the formation of polycrystalline silicon with a unique hierarchical porous morphology, entirely inherited from the biogenic precursor structure. The proposed methodology demonstrates high efficiency and environmental significance in utilizing renewable agro-industrial waste for the production of advanced nanomaterials.*

Key words: *magnesiothermic reduction, silicon dioxide, rice husk, nanoporous silicon, heat scavenger, NaCl, leaching, XRD, SEM, high-purity silicon.*

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. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8091-2995.

Калижан Бахытжанулы Шакенов – PhD, Ассоциированный профессор, Сәтбаев Университеті, Инженерлік бейінді зертханасының аға ғылыми қызметкері; e-mail: k.shakenov@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9722-1605.

Данатбек Онгарбекович Мурзалинов – PhD, Инженерлік бейінді зертханасының ғылыми қызметкері; e-mail: danatbekmurzalinov@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6519-1969.

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. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8091-2995.

Калижан Бахытжанулы Шакенов – PhD, ассоциированный профессор, Сатбаев Университет, старший научный сотрудник лаборатории инженерного профиля; e-mail: k.shakenov@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9722-1605.

Данатбек Онгарбекович Мурзалинов – PhD, Сатбаев Университет, научный сотрудник лаборатории инженерного профиля; e-mail: danatbekmurzalinov@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6519-1969.

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. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8091-2995.

Kalizhan Bakhytzhanuly Shakenov – PhD, Associate Professor, Satbayev University, Senior Researcher at the Engineering Profile Laboratory; e-mail: k.shakenov@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9722-1605.

Danatbek Ongarbekovich Murzalinov – PhD, Satbayev University, Researcher at the Engineering Profile Laboratory; e-mail: danatbekmurzalinov@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6519-1969.

Seytkhan Azat – Satbayev University, Head of the Engineering Laboratory; e-mail: seytkhan.azat@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3858-9477.

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 тураланады. 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

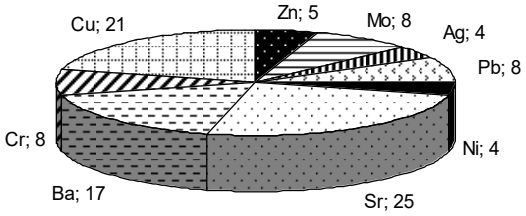
М.А. Смагулов[1*], С.А. Зайцев[2], М.М. Искакова[1], А.К. Каримов[3]
[1]Шәкәрім университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинка к-сі, 20 А
[2]Мәскеу мемлекеттік университеті,
119991, Ресей Федерациясы, Мәскеу, Ленин таулары, 1-үй
[3]әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,
050040, 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 zhəne gipolipidemiyalyқ belsendiligi / A.A. Kurmukov. – Almaty: Bastau, 2007. – 148 b.
2. Khrustaleva M.A. Tabiғi zhəne antropogendik landshaft komponentterindegi auyr metaldardyң biogeokhimiyalyқ kөshi-қony zhəne zhinaқtaluy / M.A. Khrustaleva // 3-shi Khalyқaralyқ ғylymi konferentsiyanyң ғylymi eңbekter zhinaғy. – Semei қ.: SMU baspasy Shəkərim, 2012. – 1 Tom. – B. 368-373.
3. .....

М.А. Смагулов[1*], С.А. Зайцев[2], М.М. Искакова[1], А.К. Каримов[3]
[1]Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А
[2]Московский государственный университет,
119991, Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, д. 1
[3]Казахский национальный университет имени аль-Фараби,
050040, Республика Казахстан, г. Алматы, пр. аль-Фараби, 71
[*]e-mail: smagulov@mail.ru

БИОГЕОХИМИЧЕСКАЯ МИГРАЦИЯ И АККУМУЛЯЦИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

Аннотация: *В статье приведены результаты исследования……*
Ключевые слова: *среда, биолог, природа,…....*

M. Smagulov[1*], S. Zaitsev[2], M. Iskakov[1], A. Karimov[3]
[1]Shakarim University,
071412, Republic of Kazakhstan, Semey, 20 A Glinka Street
[2]Moscow State University, Moscow, Russia
119991, Russian Federation, Moscow, 1 Leninskie gory Street
[3]Al-Farabi Kazakh National University, Republic of Kazakhstan, Almaty
050040, Republic of Kazakhstan, Almaty, 71 Al-Farabi Avenue
*e-mail: smagulov@mail.ru

BIOGEOCHEMICAL MIGRATION AND ACCUMULATION HEAVY METALS

This article discusses the characteristics of the development of eco-geochemical changes in the biosphere. Analyzed discretely, and in particular the relationship of environmental, geochemical and ecological changes. We present the laws of development of ecological-geochemical changes in the biosphere…...
Key words:*…..*

Авторлар туралы мәліметтер

Максат Ануарбекович Смагулов* – техника ғылымдарының докторы, «Технологиялық жабдықтар және машина жасау» кафедрасының профессоры; Шәкәрім университеті, Қазақстан; e-mail: smagulov@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6369-3690.

Сергей Александрович Зайцев – «Физика және математика» кафедрасының физика-математика ғылымдарының кандидаты; Мәскеу мемлекеттік университеті, Ресей Федерациясы; e-mail: zaisev@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7057-0461.

Маржан Муратовна Искакова – «Технологиялық жабдықтар және машина жасау» кафедрасының докторанты; Шәкәрім университеті, Қазақстан; e-mail: iskakova@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4787-4966.

Айтбек Калиевич Каримов – «Автоматтандыру» кафедрасының аға оқытушысы; әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан; e-mail: karimov@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5378-2266.

Сведения об авторах

Максат Ануарбекович Смагулов* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологическое оборудование и машиностроение»; Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: smagulov@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6369-3690.

Сергей Александрович Зайцев – кандидат физико-математически наук кафедры «Физика и математика»; Московский государственный университет, Российская Федерация; e-mail: zaisev@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7057-0461.

Маржан Муратовна – докторант кафедры «Технологическое оборудование и машиностроение»; Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: iskakova@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4787-4966.

Айтбек Калиевич Каримов – старший преподаватель кафедры «Автоматизация»; Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Республика Казахстан; e-mail: karimov@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5378-2266.

Information about the authors

Maksat Smagulov* – doctor of technical sciences, professor of the department «Technological equipment and mechanical engineering»; Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: smagulov@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6369-3690.

Sergei Zaitsev – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Department of Physics and Mathematics; Moscow State University, Russian Federation; e-mail: zaisev@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7057-0461.

Marjan Iskakova – doctoral student of the department «Technological equipment and mechanical engineering»; Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: iskakova@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4787-4966

Aitbek Karimov – senior teacher at the Department of Automation; Al-Farabi Kazakh National University, Republic of Kazakhstan; e-mail: karimov@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5378-2266

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Научная статья должна представлять собой текстовый материал начальных, промежуточных или окончательных результатов научного исследования, экспериментальной или аналитической деятельности, содержащий авторские разработки, выводы, рекомендации, ранее не опубликованные и обладающие новизной. К научной статье относится также работа, посвященная изучению и анализу ранее опубликованных научных результатов, связанных общей темой (обзорная статья), в которой приводятся обобщающие выводы и рекомендации.

В научный журнал «Вестник Университета Шакарима. Серия технические науки» принимаются рукописи на казахском, русском, английском языках.

Периодичность журнала – 1 раз в квартал (4 номера в год).

Статья подается в электронном формате (.doc, .docx, .rtf) посредством загрузки через функционал веб-сайта журнала tech.vestnik.shakarim.kz

Для работы с порталом необходимо зарегистрироваться на сайте tech.vestnik.shakarim.kz

Для публикации в журнал принимаются статьи по следующим направлениям:

- Автоматизация и информационные технологии
- Машиностроение и механика
- Пищевая инженерия и биотехнология
- Техническая физика и теплоэнергетика
- Химическая технология

Требования к оформлению материалов

Статья оформляется со следующими размерами полей: отступ от края листа – 2,0 см. Кегль шрифта – 11, межстрочный интервал – 1,0, гарнитура шрифта – Arial.

Структура научной статьи

Структура научной статьи должна включать следующие элементы:

- Индекс МРНТИ (международный рубрикатор научно-технической информации) – указывается с левого края страницы. Для присвоения статье индекса МРНТИ необходимо использовать сайт www.grnti.ru).
- Сведения об авторах – пишутся через строку по центру:
  - инициалы и фамилия автора(-ов) статьи (сначала инициалы, затем фамилия – А.К. Калиев), шрифт – полужирный;
  - место работы автора(-ов) – название вуза (организации), города, страны;
  - контактная информация (e-mail) автора-корреспондента.
- Название статьи (заголовок) – через строку, выделяется полужирным шрифтом, выравнивание по центру. Должно точно отражать содержание, быть кратким и лаконичным. Сокращение слов в заглавии не допускается.
- Аннотация – краткое изложение основной сути исследований, методов и объектов исследований, наиболее важных результатов, их значимость, научная и практическая ценность. Аннотация размещается через строку после названия статьи курсивом. Объем аннотации – 150-300 слов.
- Ключевые слова – предназначены для поиска статьи и определения ее предметной области. Количество ключевых слов – 5-8, оформляются курсивом.
- Основной текст статьи – через строку:
  - Введение – отражение актуальности;
  - Условия и методы исследования;
  - Результаты исследований;
  - Обсуждение научных результатов;
  - Заключение;
  - Список литературы – оформляется на языке написания статьи и на английском языке.
- Информация о финансировании (при наличии).

- В конце статьи приводятся инициалы и фамилия, ученая степень, звание, место работы автора(-ов); название вуза (организации), города, страны; контактная информация (e-mail) для каждого автора; заглавие (название) статьи; аннотация; ключевые слова на двух языках, отличимых от языка статьи (казахский/русский, английский).

Объем материалов, как правило, не должен быть менее 3 страниц и не более 8 страниц, включая текст, рисунки, таблицы.

Количество авторов не должно превышать **5 человек**.

Рисунки, карты, фотографии, таблицы, формулы рекомендуется выполнять с помощью компьютерной техники и размещать в статье по мере их упоминания. Порядковые номера рисунков обозначаются арабскими цифрами, название рисунка приводятся по центру под рисунком (Рисунок 1 – Название рисунка).

Таблицы отражаются в тексте статьи после первой ссылки или на следующей странице. Номер и название таблицы приводятся с левой стороны страницы (Таблица 1 – Название таблицы). В случае переноса таблицы на следующую страницу, столбцы нумеруются и на следующей странице с правой стороны указывается продолжение таблицы (Продолжение таблицы 1).

Порядок оформления литературы:

- литература располагается по мере упоминания в тексте;
- по тексту в квадратных скобках указывается порядковый номер работы, на которую дается ссылка;
- оформление литературы должно производиться в соответствии с требованиями ГОСТ 7.1-2003 «Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления»;
- при оформлении пристатейной литературы приводить полный перечень авторов издания (без др.).

Примеры оформления списка литературы

1. Аксартов Р.М. Метод количественного определения леукомизина / Аксартов Р.М., М.И. Айзиков, С.А. Расулова // Вестник КазНУ. Сер. хим. – 2003. – Т.1., № 8. – С. 40-41.
2. Курмуков А.А. Ангиопротекторная и гиполипидемическая активность леуомизина / А.А. Курмуков. – Алматы: Бастау, 2007. – 148 с.
3. Абимульдина С.Т. Функционирование и развитие инфраструктуры сахарного производства / С.Т. Абимульдина, Г.Е. Сыдыкова, Л.А. Оразбаева // Инновация в аграрном секторе Казахстана: Матер. Междунар. конф. / КазНУ им. аль-Фараби. – Алматы, 2010. – С. 10-13.
4. Соколовский Д.В. Теория синтеза самоустанавливающихся кулачковых механизмов приводов [Электрон. ресурс] / Д.В. Соколовский. – 2006. – URL: http://bookchamber.kz/stst_2006.htm (дата обращения: 12.03.2009).

После представления автором статьи редакция журнала рассматривает поступившую работу в течение двух недель с целью проверки ее соответствия предъявляемым требованиям (антиплагиат, оформление, рецензирование и т.д.).

В случае положительного решения редакции журнала о принятии статьи, авторам направляется соответствующее сообщение для произведения оплаты публикации.

В случае несоответствия статьи требованиям журнала авторы будут извещены сообщением на электронную почту.

Редакция журнала самостоятельно направляет поступившую работу на рецензирование. В журнале применяется двойное слепое рецензирование (*Double-blind review*), то есть конфиденциально.

Редакция журнала осуществляет проверку статьи на наличие заимствований (используется лицензионное программное обеспечение). Оригинальность текста должна составлять **не менее 75%**. Доля самоцитирования в статьях не должна превышать 15%. Статья, не набравшая необходимый процент оригинальности, направляется автору на доработку. Первая и вторая проверки осуществляются бесплатно, третья проверка – 2000 тенге. В случае получения отрицательного результата после третьей проверки, статья не допускается к публикации в журнале.

Образец оформления статьи

МРНТИ: 32.61.11

М.А. Смагулов[1*], С.А. Зайцев[2], М.М. Искакова[1], А.К. Каримов[3]
[1]Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А
[2]Московский государственный университет,
119991, Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, д. 1
[3]Казахский национальный университет имени аль-Фараби,
050040, Республика Казахстан, г. Алматы, пр. аль-Фараби, 71
[*]e-mail: smagulov@mail.ru

БИОГЕОХИМИЧЕСКАЯ МИГРАЦИЯ И АККУМУЛЯЦИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

Аннотация: *В статье приведены результаты исследования……*
Ключевые слова: *среда, биолог, природа,…....*

Введение

В формировании биогеохимических свойств компонентов ландшафта важную роль играет атмосферная, водная и биогенная миграция. Из всех природных вод наиболее заметные изменения наблюдаются в атмосферных осадках. Концентрация элементов в снеге зависит от температуры воздуха, направления розы ветров по отношению к источнику загрязнения, удаленности от него, рельефа местности [1]. Различия химического состава атмосферных осадков обусловлены сложными перемещениями воздушных масс. На рисунке 1 отображено содержание тяжелых металлов во льду водохранилищ.

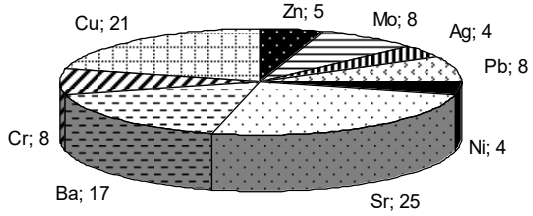


Рисунок 1 – Распределение содержания тяжелых металлов во льду водохранилищ Москворецкой системы

Методы исследования

Текст……

Результаты исследований

Дождевые воды по составу сульфатно-гидрокарбонатно- и сульфатно-хлоридно-кальциевые. Минерализация их выше за счет концентрации в атмосфере пыли. Выявлено преобладание тяжелых металлов, рассчитанных при выпадении на единицу площади ландшафта, в дожде (Sr, Pb, Cr, Zn, Ni) по сравнению со снегом (табл. 1).

Таблица 1 – Содержание тяжелых металлов в снеге и дожде, кг/га

№	Тяжелые металлы	Снег	Дождь
1	Pb	$0,5x10^{-6}$	$0,2x10^{-4}$
2	Cr	$0,4x10^{-6}$	$1,6x10^{-3}$
3	V	$8,5x10^{-5}$	–
*Примечание: **			

Обсуждение научных результатов

Текст……

Заключение

Текст……

Список литературы

1. Курмуков А.А. Ангиопротекторная и гиполипидемическая активность леуомизина / А.А. Курмуков. – Алматы: Бастау, 2007. – 148 с.
2. Хрусталева М.А. Биогеохимическая миграция и аккумуляция тяжелых металлов в компонентах природных и антропогенных ландшафтов / М.А. Хрусталева // Сборник трудов 3-й Международной научной конференции. – г. Семей: Изд-во СГУ им. Шакарима, 2012. – Том 1. – С. 368-373.

References

1. Kurmukov A.A. Angioprotektornaya i gipolipidemicheskaya aktivnost' leuomizina / A.A. Kurmukov. – Almaty: Bastau, 2007. – 148 s.
2. Khrustaleva M.A. Biogeokhimicheskaya migratsiya i akkumulyatsiya tyazhelykh metallov v komponentakh prirodnykh i antropogennykh landshaftov / M.A. Khrustaleva // Sbornik trudov 3-i Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii. – g. Semei: Izd-vo SGU im. Shakarima, 2012. – Tom 1. – S. 368-373.

М.А. Смагулов[1*], С.А. Зайцев[2], М.М. Искакова[1], А.К. Каримов[3]
[1]Шәкәрім университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинки к-сі, 20 А
[2]Мәскеу мемлекеттік университеті,
119991, Ресей Федерациясы, Мәскеу, Ленин таулары, 1-үй
[3]Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,
050040, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., әл-Фараби даңғылы, 71
*e-mail: smagulov@mail.ru

АУЫР МЕТАЛДАРДЫҢ БИОГЕОХИМИЯЛЫҚ МИГРАЦИЯСЫ ЖӘНЕ ЖИНАҚТАЛУЫ

Бұл мақалада биосферадағы экологиялық-геохимиялық өзгерістердің даму сипаттамасы қаралады. Қоршаған геохимиялық және экологиялық-геохимиялық өзгерістердің әсерлері бөлек және жекеше талданды. Біз биосферадағы экологиялық-геохимиялық өзгерістердің дамуының заңдылығын ұсынамыз. .....

Түйін сөздер:*.....*

M. Smagulov[1*], S. Zaitsev[2], M. Iskakov[1], A. Karimov[3]
[1]Shakarim University,
071412, Republic of Kazakhstan, Semey, 20 A Glinka Street
[2]Moscow State University, Moscow, Russia
119991, Russian Federation, Moscow, 1 Leninskie gory Street
[3]Al-Farabi Kazakh National University, Republic of Kazakhstan, Almaty
050040, Republic of Kazakhstan, Almaty, 71 Al-Farabi Avenue
*e-mail: smagulov@mail.ru

BIOGEOCHEMICAL MIGRATION AND ACCUMULATION HEAVY METALS

This article discusses the characteristics of the development of eco-geochemical changes in the biosphere. Analyzed discretely, and in particular the relationship of environmental, geochemical and ecological changes. We present the laws of development of ecological-geochemical changes in the biosphere…...

Key words:*…..*

Сведения об авторах

Максат Ануарбекович Смагулов* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологическое оборудование и машиностроение»; Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: smagulov@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6369-3690.

Сергей Александрович Зайцев – кандидат физико-математически наук кафедры «Физика и математика»; Московский государственный университет, Российская Федерация; e-mail: zaisev@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7057-0461.

Маржан Муратовна Искакова – докторант кафедры «Технологическое оборудование и машиностроение»; Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: iskakova@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4787-4966.

Айтбек Калиевич Каримов – старший преподаватель кафедры «Автоматизация»; Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Республика Казахстан; e-mail: karimov@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5378-2266.

Авторлар туралы мәліметтер

Максат Ануарбекович Смагулов* – техника ғылымдарының докторы, «Технологиялық жабдықтар және машина жасау» кафедрасының профессоры; Шәкәрім университеті, Қазақстан; e-mail: smagulov@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6369-3690.

Сергей Александрович Зайцев – «Физика және математика» кафедрасының физика-математика ғылымдарының кандидаты; Мәскеу мемлекеттік университеті, Ресей Федерациясы; e-mail: zaisev@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7057-0461.

Маржан Муратовна Искакова – «Технологиялық жабдықтар және машина жасау» кафедрасының докторанты; Шәкәрім университеті, Қазақстан; e-mail: iskakova@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4787-4966.

Айтбек Калиевич Каримов – «Автоматтандыру» кафедрасының аға оқытушысы; әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан; e-mail: karimov@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5378-2266.

Information about the authors

Maksat Smagulov* – doctor of technical sciences, professor of the department «Technological equipment and mechanical engineering»; Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: smagulov@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6369-3690.

Sergei Zaitsev – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Department of Physics and Mathematics; Moscow State University, Russian Federation; e-mail: zaisev@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7057-0461.

Marjan Iskakova – doctoral student of the department «Technological equipment and mechanical engineering»; Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: iskakova@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4787-4966

Aitbek Karimov – senior teacher at the Department of Automation; Al-Farabi Kazakh National University, Republic of Kazakhstan; e-mail: karimov@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5378-2266

RULES FOR AUTHORS

A scientific article should be a textual material of the initial, intermediate or final results of a scientific research, experimental or analytical activity, containing author's developments, conclusions, recommendations that have not been previously published and have novelty. A scientific article also includes a work devoted to the study and analysis of previously published scientific results related to a common theme (review article), which provides generalizing conclusions and recommendations.

In the scientific journal “Bulletin of Shakarim University”. Series of technical sciences” accepts manuscripts in Kazakh, Russian, English.

Periodicity of the journal – 1 time per quarter (4 issues per year).

The article is submitted in electronic format (.doc, .docx, .rtf) by downloading through the functionality of the journal website tech.vestnik.shakarim.kz

To work with the portal, you need to register on the site tech.vestnik.shakarim.kz

Articles in the following areas are accepted for publication in the journal:

- Automation and information technology
- Engineering and mechanics
- Food engineering and biotechnology
- Technical physics and Thermal power engineering
- Chemical Technology

Requirements for the formalization of materials

The article is drawn up with the following margins: indent from the edge of the sheet – 2.0 cm. Font size – 11, line spacing – 1.0, typeface – Arial.

Structure of a scientific article

• ISTIR index (international scientific and technical information rubric) – indicated from the left edge of the page. To assign an ISTIR index to an article, you need to use the site www.grnti.ru.

• Information about the authors – written on the next line in the center

– initials and surname of the author (s) of the article (first write the initials, then the surname – A. Kaliev), font selection – bold;

– place of work of the author(s) – the name of the university (organization), city, country;

– contact information (e-mail) of the corresponding author.

• Title of the article (title) – next line, highlighted in bold, center alignment. It should accurately reflect the content, be short and concise. Shortening of words in the title is not allowed.

• Annotation - a summary of the main essence of research, methods and objects of research, the most important results, their significance, scientific and practical value. The annotation is placed one line after the title of the article in italics. The volume of the abstract is 150-300 words.

• Keywords are designed to search for an article and determine its subject area. The number of keywords - 5-8, are written in italics.

• The main text of the article – through the line:

Introduction – a reflection of relevance;

– Conditions and methods of research;

– Research results;

– Discussion of scientific results;

– Conclusion;

– The list of references is drawn up in the language of writing the article and in English.

• Funding information (in the presence).

• At the end of the article, the initials and surname, academic degree, title, place of work of the author(s) are given; the name of the university (organization), city, country; contact information (e-mail) for each author; title (heading) of the article; annotation; keywords in two languages distinct from the language of the article (Kazakh/Russian, English).

The volume of materials, as a rule, should not be less than 3 pages and not more than 8 pages, including text, figures, tables.

The number of authors should not exceed **5 people**.

Drawings, maps, photographs, tables, formulas are recommended to be done using computer technology and placed in the article as they are mentioned. Sequential numbers of figures are indicated by Arabic numerals, the name of the figure is given in the center under the figure (Figure 1 – The title of the figure).

Tables are reflected in the text of the article after the first link or on the next page. The number and title of the table are given on the left side of the page (Table 1 – The title of the table). If the table is transferred to the next page, the columns are numbered and on the next page, on the right side, the continuation of the table is indicated (Continuation of table 1).

The order of registration of literature:

– literature is arranged as it is mentioned in the text;

– the text in square brackets indicates the serial number of the work to which the link is given;

– the design of the literature should be carried out in accordance with the requirements of GOST 7.1-2003 «Bibliographic record. Bibliographic description. General requirements and rules for drafting»;

– when preparing referenced literature, provide a complete list of the authors of the publication (without others).

Examples of designing a list of references

1. Aksartov R.M. Metod kolichestvennogo opredeleniya leukomizina / Aksartov R.M., M.I. Aizikov, S.A. Rasulova // Vestnik KaZNU. Ser. khim. – 2003. – T.1., № 8. – S. 40-41.
2. Kurmukov A.A. Angioprotektornaya i gipolipidemicheskaya aktivnost' leuomizina / A.A. Kurmukov. – Almaty: Bastau, 2007. – 148 s.
3. Abimul'dina S.T. Funktsionirovanie i razvitie infrastruktury sakharnogo proizvodstva / S.T. Abimul'dina, G.E. Sydykova, L.A. Orazbaeva // Innovatsiya v agrarnom sektore Kazakhstana: Mater. Mezhdunar. konf. / KaZNU im. al'-Farabi. – Almaty, 2010. – S. 10-13.
4. Sokolovskii D.V. Teoriya sinteza samoustanavlivayushchikhsya kulachkovykh mekhanizmov privodov [Ehlektron. resurs] / D.V. Sokolovskii. – 2006. – URL: http://bookchamber.kz/stst_ 2006.htm (data obrashcheniya: 12.03.2009).

After the submission of the article by the author, the editors of the journal review the submitted work within two weeks in order to check its compliance with the requirements (anti-plagiarism, design, review, etc.).

In case of a positive decision of the editorial board of the journal to accept the article, the authors are sent a corresponding message to pay for the publication.

In case of non-compliance of the article with the requirements of the journal, the authors will be notified by e-mail.

The editorial board of the journal independently sends the received work for review. The journal uses *double-blind review*, that is, it is confidential.

The editorial board of the journal checks the article for borrowings (licensed software is used). The originality of the text must be **at least 75%.** The share of self-citations in articles should not exceed 15%. An article that does not reach the required percentage of originality is sent to the author for revision. The first and second checks are free of charge, the third check is 2000 tenge. If a negative result is obtained after the third check, the article is not allowed for publication in the journal.

Sample design of the article

IRSTI: 32.61.11

M. Smagulov[1], S. Zaitsev[2], M. Iskakova[1], A. Karimov[3]
[1]Shakarim University
071412, Republic of Kazakhstan, Semey, 20 A, Glinki str.
[2]Moscow State University,
119991, Russian Federation, Moscow, Leninskiye Gory, 1, str.
[3]Kazakh al-Farabi National University
050040, Republic of Kazakhstan, Almaty, al-Farabi Ave., 71
*e-mail: smagulov@mail.ru

BIOGEOCHEMICAL MIGRATION AND ACCUMULATION HEAVY METALS

Annotation: *The article presents the results of the study……*
Key words: *environment, biologist, nature,…....*

Introduction

Atmospheric, water, and biogenic migration plays an important role in the formation of the biogeochemical properties of landscape components. Of all natural waters, the most noticeable changes are observed in precipitation. The concentration of elements in the snow depends on the air temperature, the direction of the wind rose in relation to the source of pollution, the distance from it, and the terrain [1]. Differences in the chemical composition of precipitation are due to complex movements of air masses. Figure 1 shows the content of heavy metals in the ice of reservoirs.

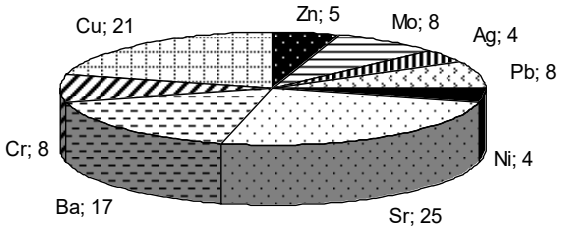


Figure 1 – Distribution of heavy metals in the ice of reservoirs of the Moskvoretskaya system

Research methods

Text……

Research results

Rain waters are sulfate-bicarbonate- and sulfate-chloride-calcium in composition. Their mineralization is higher due to the concentration of dust in the atmosphere. The predominance of heavy metals calculated for precipitation per unit area of the landscape was revealed in rain (Sr, Pb, Cr, Zn, Ni) compared to snow (Table 1).

Table 1 – Content of heavy metals in snow and rain, kg/ha

№	Heavy Metals	Snow	Rain
1	Pb	$0,5x10^{-6}$	$0,2x10^{-4}$
2	Cr	$0,4x10^{-6}$	$1,6x10^{-3}$
3	V	$8,5x10^{-5}$	–
*Note: **			

Discussion of scientific results

Text……

Conclusion

Text……

References

1. Kurmukov A.A. Angioprotektornaya i gipolipidemicheskaya aktivnost' leuomizina / A.A. Kurmukov. – Almaty: Bastau, 2007. – 148 s.
2. Khrustaleva M.A. Biogeokhimicheskaya migratsiya i akkumulyatsiya tyazhelykh metallov v komponentakh prirodnykh i antropogennykh landshaftov / M.A. Khrustaleva // Sbornik trudov 3-i Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii. – g. Semei: Izd-vo SGU im. Shakarima, 2012. – Tom 1. – S. 368-373.
3. …

М.А. Смагулов[1*], С.А. Зайцев[2], М.М. Искакова[1], А.К. Каримов[3]
[1]Шәкәрім университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинки к-сі, 20 А
[2]Мәскеу мемлекеттік университеті,
119991, Ресей Федерациясы, Мәскеу, Ленин таулары, 1-үй
[3]Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,
050040, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., әл-Фараби даңғылы, 71
*e-mail: smagulov@mail.ru

АУЫР МЕТАЛДАРДЫҢ БИОГЕОХИМИЯЛЫҚ МИГРАЦИЯСЫ ЖӘНЕ ЖИНАҚТАЛУЫ

Бұл мақалада биосферадағы экологиялық-геохимиялық өзгерістердің даму сипаттамасы қаралады. Қоршаған геохимиялық және экологиялық-геохимиялық өзгерістердің әсерлері бөлек және жекеше талданды. Біз биосферадағы экологиялық-геохимиялық өзгерістердің дамуының заңдылығын ұсынамыз. .....

Түйін сөздер:*.....*

М.А. Смагулов[1*], С.А. Зайцев[2], М.М. Искакова[1], А.К. Каримов[3]
[1] Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А
[2]Московский государственный университет,
119991, Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, д. 1
[3]Казахский национальный университет имени аль-Фараби,
050040, Республика Казахстан, г. Алматы, пр. аль-Фараби, 71
[*]e-mail: smagulov@mail.ru

БИОГЕОХИМИЧЕСКАЯ МИГРАЦИЯ И АККУМУЛЯЦИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

Аннотация: *В статье приведены результаты исследования……*
Ключевые слова: *среда, биолог, природа,…....*

Information about the authors

Maksat Smagulov* – doctor of technical sciences, professor of the department «Technological equipment and mechanical engineering»; Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: smagulov@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6369-3690.

Sergei Zaitsev – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Department of Physics and Mathematics; Moscow State University, Russian Federation; e-mail: zaisev@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7057-0461.

Marjan Iskakova – doctoral student of the department «Technological equipment and mechanical engineering»; Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: iskakova@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4787-4966

Aitbek Karimov – senior teacher at the Department of Automation; Al-Farabi Kazakh National University, Republic of Kazakhstan; e-mail: karimov@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5378-2266

Сведения об авторах

Максат Ануарбекович Смагулов* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологическое оборудование и машиностроение»; Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: smagulov@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6369-3690.

Сергей Александрович Зайцев – кандидат физико-математически наук кафедры «Физика и математика»; Московский государственный университет, Российская Федерация; e-mail: zaisev@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7057-0461.

Маржан Муратовна Искакова – докторант кафедры «Технологическое оборудование и машиностроение»; Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: iskakova@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4787-4966.

Айтбек Калиевич Каримов – старший преподаватель кафедры «Автоматизация»; Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Республика Казахстан; e-mail: karimov@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5378-2266.

Авторлар туралы мәліметтер

Максат Ануарбекович Смагулов* – техника ғылымдарының докторы, «Технологиялық жабдықтар және машина жасау» кафедрасының профессоры; Шәкәрім университеті, Қазақстан; e-mail: smagulov@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6369-3690.

Сергей Александрович Зайцев – «Физика және математика» кафедрасының физика-математика ғылымдарының кандидаты; Мәскеу мемлекеттік университеті, Ресей Федерациясы; e-mail: zaisev@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7057-0461.

Маржан Муратовна Искакова – «Технологиялық жабдықтар және машина жасау» кафедрасының докторанты; Шәкәрім университеті, Қазақстан; e-mail: iskakova@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4787-4966.

Айтбек Калиевич Каримов – «Автоматтандыру» кафедрасының аға оқытушысы; әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан; e-mail: karimov@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5378-2266.

МАЗМҰНЫ – СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТТАНДЫРУ ЖӘНЕ АҚПАРАТТЫҚ ТЕХНОЛОГИЯЛАР

АВТОМАТИЗАЦИЯ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

А.К. Кереев, К.П. Аман, З.К. Калкабаева, С.М. Мұхтар, Е.А. Оспанов
КОМПЬЮТЕРЛІК КӨРУ НЕГІЗІНДЕ ЖАТТЫҒУЛАРДЫ ТАНУ ЖӘНЕ ОРЫНДАУ ТЕХНИКАСЫН БАҒАЛАУ ӘДІСТЕРІ..... 6

И.А. Сенюшин, Н.С. Глазырина, Р.Б. Ибраев, Е.К. Джилкибаев, А. Әділғазыұлы
ФОРМАЛИЗОВАННЫЙ МАРШРУТ РАЗРАБОТКИ КРИПТОГРАФИЧЕСКОГО КОНТРОЛЛЕРА ЭЛЕКТРОННОЙ ЦИФРОВОЙ ПОДПИСИ С ПЛИС-ВЕРИФИКАЦИЕЙ…….. 19

А. Хабай, Е.А. Тулешов, А.Е. Назырова, Ж.Н. Исабеков, С.Е. Ибекеев
ҰШҚЫШСЫЗ ҰШУ АППАРАТТАРЫНА АҒЫНДЫҚ ДЕРЕКТЕРДІ БЕРУ ҮШІН МІМО ӘДІСІН ҚОЛДАНУДЫ ТАЛДАУ..... 29

Д.К. Сатыбалдина, Н.Б. Шмитов, Н.М. Тешебаев, А.Ж. Закарина, К.С. Кульниязова
МАГИСТРАЛЬДЫҚ ҚҰБЫРЛАРДАҒЫ АҒЫП КЕТУ КООРДИНАТТАРЫН АНЫҚТАУ ҮШІН НЕЙРОНДЫҚ ЖЕЛІНІ ҚОЛДАНУ..... 40

Р.С. Бекбаева, М.Д. Сарбаева, К.С. Бекбаев, Г.Б. Абдилова, Н.А. Айманбетов
РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ИЗВЛЕЧЕНИЯ САХАРОВ ИЗ ПШЕНИЧНОЙ СОЛОМЫ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КИСЛОТНОГО И ФЕРМЕНТАТИВНОГО ГИДРОЛИЗА…….. 50

N.G. Dzhumamukhambetov, E.T. Yerbayev, D.A. Dzhaparova, Zh.G. Dzhumamukhambetov, V.A. Yashkov
MATHEMATICAL MODELING OF OPTICAL PROPERTIES OF ANTI-REFLECTION COATINGS FOR SILICON SOLAR CELLS…… 59

M. Kabdullin, L. Naizabayeva, S.A.R. Al-Haddad, A. Kabdullin, A. Issayeva
DEVELOPMENT AND VALIDATION OF A PROTOTYPE PIPELINE FOR BIOMEDICAL IMAGE ANALYSIS IN CARDIOVASCULAR MONITORING……..…… 71

М.Т.Сейлханова, Қ.Әлімхан
АНЫҚТАЛМАҒАН ПАРАМЕТРЛІ ЕКІНШІ РЕТТІ СЫЗЫҚТЫҚ ЕМЕС ЖҮЙЕЛЕРДІ КЕРІ ҚАДАМ ӘДІСІНЕ НЕГІЗДЕЛГЕН АДАПТИВТІ РОБАСТТЫ БАСҚАРУ..... 80

Д.Ж. Шырынханова, И.Б. Карымсакова, Г. Жомартқызы, Д.О. Кожахметова, Т.А. Устинова
МАШИНАЛЫҚ ОҚЫТУ (ML) МОДЕЛЬДЕРІН ҚОЛДАНА ОТЫРЫП БАУЫР ҚАТЕРЛІ ІСІГІН БОЛЖАУ 89

Ә.Ж. Жамбулатова, Қ. Әлімхан
КОММУТАЦИЯЛАНАТЫН КЕШІГУІ БАР СЫЗЫҚТЫ ЕМЕС ЖҮЙЕЛЕРДІҢ ТҰРАҚТЫЛЫҒЫ..... 96

Д.Ж. Шырынханова, Т.С. Жылқыбаев, Т.А. Устинова, Е.Р. Советбаев, Қ.Б. Байбосинова
ВНЕДРЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ПАСПОРТОВ ЛАБОРАТОРИЙ ДЛЯ УЧЁТА ОБОРУДОВАНИЯ И ПРИБОРОВ…….. 104

A.S. Shayakhmetova, N. Tasbolatuly, N.E. Dosanov, M. Othman, N. Kurishbay
RESEARCH OF PERSONALIZED MEDICINE METHODS USING BAYESIAN ANALYSIS…… 114

К.Е. Икласова, А.К. Шайханова, А.М. Айтымова, М.Ж. Базарова, Б.К. Абдураимова
АГЕНТНАЯ МОДЕЛЬ МОНИТОРИНГА ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ В УЧЕБНЫХ СРЕДАХ …… 124

A.K. Aitim
FORMAL AND NEURAL APPROACHES TO MORPHOLOGICAL ANALYSIS IN AGGLUTINATIVE LANGUAGES: EVIDENCE FROM KAZAKH…… 132

Ж.Н. Ерғазы, Қ. Әлімхан, Н.С. Мукатаев
СЫЗЫҚТЫ ЕМЕС СЫРТҚЫ ӘСЕРЛЕРІ БАР ЖҮЙЕЛЕРДІ ШЫҒЫС КЕРІ БАЙЛАНЫС АРҚЫЛЫ БЕКІТІЛГЕН УАҚЫТ ІШІНДЕ КЕҢАУҚЫМДЫ ОРНЫҚТАНДЫРУ..... 141

Zh.Zh. Bagisov, T.K. Dushaeva, **A.Kh. Vakhitova, A.B. Akhmetova, A.Kh. Kassymova**
METHODOLOGICAL FOUNDATIONS FOR THE APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES IN TEACHING SPECIALIZED DISCIPLINES: OPPORTUNITIES AND RISKS…… 152

Y.E. Kozhanzharov, S.V. Grigoryeva, A.Zh. Alimkhanova
MODELING AND ANALYSIS OF INTERFERENCE IN WIRELESS DATA TRANSMISSION SYSTEMS…….. 159

А. Кулмагамбетов, Е. Ербаев, Г. Камалова, А. Тыныкулова, С. Кашкинбаев
МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТРАЕКТОРИЙ ВЫПУСКНИКОВ ШКОЛ НА ОСНОВЕ ДЕМОГРАФИЧЕСКИХ ДАННЫХ И МЕТОДОВ АНАЛИЗА БОЛЬШИХ ДАННЫХ…….. 168

А.Р. Оразаева, Н.С. Смакова, К.М. Максутова, А.А. Абильдина, А.Е. Туребаева
СҮТ БЕЗІ АУРУЛАРЫН ЕРТЕ АНЫҚТАУДА ЗАМАНАУИ НЕЙРОНДЫҚ ЖЕЛІЛЕРДІ ҚОЛДАНУ (YOLOV8, FASTER R-CNN)..... 181

Г.А. Шангытбаева, А.К. Шайханова, Ж. Жұмағалиева, К.Е. Икласова, А.А. Абдукаримова
ИММЕРСИВТІ ТЕХНОЛОГИЯЛАР (VR/AR) НЕГІЗІНДЕ ҚАЗАҚСТАННЫҢ БІЛІМ БЕРУ ЖҮЙЕСІН ЦИФРЛЫҚ ТРАНСФОРМАЦИЯЛАУДЫҢ ТҰЖЫРЫМДАМАЛЫҚ ТӘСІЛДЕРІ..... 189

Т.С. Жылқыбаев, А.Д. Золотов, Е.А. Оспанов, Д.В. Мясоедов, Р.Н. Назаров
ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК АЭРОТЕНКА В ЗАДАЧАХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ОЧИСТНЫМИ СООРУЖЕНИЯМИ…….. 201

МАШИНА ЖАСАУ ЖӘНЕ МЕХАНИКА

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МЕХАНИКА

К.С. Иванов, Ж.А. Каренеева, Э.М. Мажиева
ЭФФЕКТИВНЫЙ АДАПТИВНЫЙ МЕХАНИЧЕСКИЙ ПРИВОД МАНИПУЛЯТОРА……. 213

А.Б. Абдыхамидова, Е.Ж. Сарсикеев, П.Ш. Мәди, Ә.Ж. Қалиқан, О.В. Гальцева
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ IOT-МОНИТОРИНГА В ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ОТРАСЛИ..... 223

R.K. Kusainov, A.N. Aitkazin, D.B. Nurakhmetov, A.A. Aniyarov, A.K. Kenzhe
DEVELOPMENT AND APPLICATION OF THE KEiT TRAINING STAND FOR PROGRAMMING ESP32 MICROCONTROLLERS IN PYTHON IN ENGINEERING EDUCATION…… 229

ТАМАҚ ИНЖЕНЕРИЯСЫ ЖӘНЕ БИОТЕХНОЛОГИЯ

ПИЩЕВАЯ ИНЖЕНЕРИЯ И БИОТЕХНОЛОГИЯ

С.Г. Каманова, Г.Д. Акшораева, Б. Калемшарив, Г.Х. Оспанкулова
ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГОЛОЗЕРНОГО ОВСА, ЯЧМЕНЯ, ТРИТИКАЛЕ И ЗЕЛЁНОЙ ГРЕЧИХИ В ПРОИЗВОДСТВЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПРОДУКТОВ ПИТАНИЯ…….. 237

И.Ж. Темирова, Г.Х. Оспанкулова, А.К. Игенбаев
ПОДБОР СТРУКТУРООБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПИЩЕВЫХ ОЛЕОГЕЛЕЙ……. 243

M. Sharapatova, K. Issayeva
RECENT ADVANCES IN THE TECHNOLOGICAL INTENSIFICATION OF ENZYMATIC PROCESSES IN MEAT SYSTEMS…… 250

А.К. Мустафаева, Р. Асқар, Ш. Сәкен, Е.Б. Муталиев, Г.Б. Абдилова
ҰЛТТЫҚ СҮТҚЫШҚЫЛДЫ ӨНІМ ӨНДІРУ ТЕХНОЛОГИЯСЫ…….. 264

Sh.Zh. Zhaskairat, Mohammad Rashedi Ismail Fitry, A.K. Igenbayev, A.K. Mustafaeva, A.K. Zhumagalieva
DEVELOPMENT OF A POLYCOMPONENT FAT EMULSION AND STUDY OF ITS PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES…….. 273

G.N. Zhakupova, T.Ch. Tultabayeva, A.T. Sagandyk, A.H. Muldasheva, A.K. Ospanova
INVESTIGATION THE TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF THE FERMENTATION PROCESS OF A COMBINED DAIRY MIXTURE USING BUTTERMILK CONCENTRATE…… 281

А.С. Камбарова, А.О. Утегенова, А. Асылбекова, Ж.М. Атамбаева, Ш.А. Абжанова
ЖЫЛҚЫ ЕТІН ТҰЗДАУ ӘДІСІН ЖЕТІЛДІРУ..... 291

А.О. Майжанова, К.Ж. Амирханов, Ш.К. Жакупбекова, А.М. Байкадамова, Н.Р. Муслимова
ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЦЕПТУРЫ И ОПТИМАЛЬНОГО СОСТАВА МЯСОРАСТИТЕЛЬНЫХ ПАШТЕТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛЬНЯНОЙ И КОНОПЛЯНОЙ МУКИ…….. 300

А.Н. Нургазезова, А.К. Игенбаев, Ж. Қалибекқызы, Г.Н. Нұрымхан, Х.М. Нугманова
ЖЫЛҚЫ МАЙЫНЫҢ ФИЗИКА-ХИМИЯЛЫҚ КӨРСЕТКІШТЕРІ ЖӘНЕ МАЙ ҚЫШҚЫЛДЫҚ ҚАСИЕТТЕРІНІҢ ТАҒАМДЫҚ ҚҰНДЫЛЫҚ ТҰРҒЫСЫНАН БАҒАЛАНУЫ..... 308

A.T. Tautayeva, M.Zh. Kizatova, S.T. Azimova, F.A. Makhmudov, A.O. Utegenova
ANALYSIS OF BIOACTIVE COMPOUNDS IN PLANT EXTRACTS BASED ON GC-MS DATA…… 316

Г.Т. Юсупова, Ж.К. Шадьярова, А.Б. Итбалақова, С.С. Толеубекова, М.К. Изтилеуов
ФУНКЦИОНАЛДЫ ЙОГУРТТАҒЫ СҮТҚЫШҚЫЛДЫ БАКТЕРИЯЛАРДЫҢ ӨМІРШЕҢДІГІНЕ ЕРІГІШ ӨСІМДІК ТЕКТЕС ТАҒАМДЫҚ ТАЛШЫҚТЫҢ ӘСЕРІ..... 324

А.С. Абдреева, Г.К. Искакова, Н.Б. Батырбаева, М.П. Байысбаева, М. Байғайыпқызы
ЖАБАЙЫ ӨСІМДІКТЕРДЕН АЛЫНҒАН КОНЦЕНТРАТТЫ ҚОЛДАНА ОТЫРЫП, АШЫМАЛДЫҢ РЕЦЕПТУРАЛЫҚ ҚҰРАМЫН ӘЗІРЛЕУ ЖӘНЕ САПАСЫН ЗЕРТТЕУ..... 331

E.A. Gabrilyants, R.S. Alibekov, A.A. Utebayeva
A COMPARATIVE ANALYSIS OF MILK-CLOTTING COAGULANTS IN CAMEL MILK CHEESEMAKING 340

К.А. Абышева, Ә.Н. Махамбетов, Б. Дулат, З.К. Даирбекова, Ш.А. Абжанова
ИНТЕГРИРОВАННАЯ СИСТЕМА ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА, ЦИФРОВОЙ ПАСПОРТИЗАЦИИ И ПОДГОТОВКИ ОБРАЗЦОВ *HALYOMORPHA HALYS STÅL* В ЮЖНОМ КАЗАХСТАНЕ…….. 348

К.О. Богданова, Г.Т. Доланбаева, В.Н. Николаева, С.К.Кабдрахманова, А.К. Кабдрахманова
РАЗРАБОТКА И ОЦЕНКА МНОГОСЛОЙНОЙ ПОЛИМЕРНОЙ ОБОЛОЧКИ НА ОСНОВЕ МЕТИЛЦЕЛЛЮЛОЗЫ ДЛЯ КОНТРОЛИРУЕМОЙ ДОСТАВКИ ФУЗИКОКЦИНА НА СЕМЕНАХ СОИ… 356

Д.К. Задабек, Ш.Н. Ахметсадыкова, Ш.С. Аманова, С.Е. Ибраимова, Н.А. Серикбаева
МЕЛИССОПАЛИНОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КАК ИНСТРУМЕНТ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПИЩЕВОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И ВЫЯВЛЕНИЯ ФАЛЬСИФИКАЦИИ МЁДА В РЕСПУБЛИКЕ КАЗАХСТАН…….. 366

Г.С. Рысбаева, Д.Е. Кудасова, Г.Б. Алпамысова, Қ.Ш. Нұрғазы
РОЛЬ ДРОЖЖЕЙ И МОЛОЧНОКИСЛЫХ БАКТЕРИЙ В ХЛЕБОПЕКАРНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ И ФОРМИРОВАНИИ КАЧЕСТВА ХЛЕБА…….. 372

С.С. Каримова, А.У. Исаева, А.Е. Тлеукеева
МИКРОБИОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАСТИТЕЛЬНЫХ ОСТАТКОВ ТУРКЕСТАНСКОЙ ОБЛАСТИ И ИХ БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ В ПРОЦЕССАХ ПЕРЕРАБОТКИ ЛИГНОЦЕЛЛЮЛОЗНОГО СЫРЬЯ…… 380

А.М. Муратбаев*, А.К. Какимов, М.М. Джумажанова
ТАУЫҚТЫҢ ЫСТАЛЫП – КЕПТІРІЛГЕН ТӨС ЕТІН QFD ӘДІСІ НЕГІЗІНДЕ ТАЛДАУ: САПА ҮЙІН ҚҰРУ ЖӘНЕ ӨНІМДІ ЖЕТІЛДІРУДІҢ БАСЫМ БАҒЫТТАРЫН АЙҚЫНДАУ..... 389

М.М. Какимов, А.Л. Касенов, М.Т. Мурсалыкова, А.Д. Жолжаксина, Ж.Ж. Мустафин
МАҚСАРЫ ДАҚЫЛДАРЫН ҚАУЫЗДАУ МАЙДЫҢ САПАЛЫҚ КӨРСЕТКІШТЕРІНЕ ӘСЕРІ..... 399

Э.У. Майлыбаева, А.У. Шингисов, А.К. Садибаев, У.У. Тастемирова
ОЦЕНКА КАЧЕСТВА И РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МУКИ ПШЕНИЧНОЙ ХЛЕБОПЕКАРНОЙ ПЕРВОГО СОРТА РАЗНЫХ ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ ЮЖНОГО РЕГИОНА КАЗАХСТАНА..... 409

G. Yussupova, Zh. Shadyarova, Zh. Nurlankyzy, S. Toleubekova, A. Khaimuldinova
TECHNOLOGY AND QUALITY OF A FERMENTED MILK PRODUCT WITH NATURAL SWEETENER ADDITION..... 417

A.T. Berdembetova, A.U. Shingisov, D.A. Tlevlessova, A.R. Taspoltayeva, A.Zh. Shinaliyeva
PLANT MODIFIERS OF COAGULATION AND PROTEIN RETENTION IN MIXTURES OF COW AND CAMEL MILK..... 424

I.N. Kurmanbayeva, Zh.S. Nabiyeva, S.E. Ibraimova, R. A. Izteliyeva, A.N. Serikbaeva
THE EFFECT OF ROSE HIP LEAF EXTRACT ON THE QUALITATIVE AND MICROBIOLOGICAL INDICATORS OF WHOLE GRAIN BREAD..... 435

U. Sarsenbayeva, A. Almasbekova, K. Sharipov, S. Taipakova, M. Saparbayev
THE ROLE OF DNA GLYCOSYLASES IN MAINTAINING GENOME STABILITY..... 445

М.К. Kurmanahynova, Sh.A. Abzhanova, G.N. Zhaksylykova, A.U. Baibekova, N.К. Akhmetova
EVALUATION OF MICROBIOLOGICAL SAFETY, QUALITY, AND ORGANOLEPTIC PROPERTIES OF BROILER CHICKEN MEAT WITH INCLUSION OF GRAPE SEED MEAL IN THE DIET..... 457

G.N. Zhakupova, K.K. Makangali, A.E. Shoman, Keizo Arihara, K.S. Dairova
DEVELOPMENT OF SOFT CHEESE TECHNOLOGY FROM BLENDED MILK WITH OPTIMIZATION OF COAGULATION PARAMETERS..... 465

А.У. Шингисов, О.Т. Азизов, Э.У. Майлыбаева, У.У. Тастемирова, Ж.С. Набиева
ИССЛЕДОВАНИЕ АНТИОКСИДАНТНОГО СЫРЬЯ И РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЛОДОВО-ЯГОДНО-ОВОЩНОГО КИЁМА..... 477

Д.Н. Туйгунов, Ю.А. Синявский, Ж. Қалибекқызы, Е.Н. Омаров, А.Б. Бердыгалиев
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ СУБЛИМИРОВАННОГО КОБЫЛЬЕГО МОЛОКА И КИСЛОМОЛОЧНЫХ НАПИТКОВ НА ЕГО ОСНОВЕ..... 485

ТЕХНИКАЛЫҚ ФИЗИКА ЖӘНЕ ЖЫЛУЭНЕРГЕТИКАСЫ

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА И ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

Zh.B. Sagdoldina, A.B. Leonidova, A.Zh. Zhassulan, A.B. Shynarbek, Zh. Turar
MODERN APPROACHES TO THE MODIFICATION OF COATINGS PRODUCED BY ELECTRIC ARC SPRAYING (REVIEW)..... 497

А.Ж. Сағындықова, Н.А. Заец, Р.А. Жамашева, Н.Н. Нұрғалиев
ИНДУКЦИЯЛЫҚ ҚЫЗДЫРУ ЖҮЙЕЛЕРІНЕ АРНАЛҒАН ЖИІЛІК ТҮРЛЕНДІРГІШІН МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛЬДЕУ ЖӘНЕ ЭКСПЕРИМЕНТТІК ЗЕРТТЕУЛЕР..... 512

Л.С. Баймолданова, Б.К. Рахадилов, Али Чорух, Е.М. Қабдыкенева, М.В. Ермоленко
ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ, КОРРОЗИОННЫЕ И ТЕРМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ TISICN, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ РЕАКТИВНОГО ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ..... 524

Z.B. Sagdoldina, D.R. Baizhan T. Alimbekuly, A.E. Alibekov
STUDY OF TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF BIOCOATINGS BY DETONATION SPRAYING METHOD 534

Д.М. Тойбазар, И.М. Дауренова, А.Б. Мустафаева, Б.А. Урмашев, М.Ж.Хазимов
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЧАТКОВ КУКУРУЗЫ…….. 542

И.М. Дауренова, Д.М.Тойбазар, А.Б. Мустафаева, Б.А. Урмашев, М.Ж. Хазимов
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОВОЙ МОЩНОСТИ ГЕЛИОКОЛЛЕКТОРА ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОЙ СУШКИ КУКУРУЗЫ …….. 552

А.И. Почекина, Е.С. Юшков
ЦИФРОВОЙ КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ НА ОСНОВЕ KPI, CAPA И ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА НА ПРЕДПРИЯТИИ АТОМНОГО ПРОФИЛЯ..... 562

И.М. Увалиева, Ж.Т. Рахметуллина, Ш.Т. Тезекпаева, Д.Р. Борозенец, Ж.Ж. Нурумов
МОДЕЛЬ ПОДДЕРЖКИ КЛИНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ НАРУШЕНИЙ КИСЛОТНО-ОСНОВНОГО РАВНОВЕСИЯ ПО ДАННЫМ ГАЗОМЕТРИИ КРОВИ НА ОСНОВЕ УРАВНЕНИЯ ГЕНДЕРСОНА-ХАССЕЛЬБАХА..... 573

L.G. Sulyubayeva, S.D Bolatov, B.A. Alibekova
STUDY OF THE INFLUENCE OF ELECTROLYTIC-PLASMA TREATMENT PARAMETERS ON THE SURFACE STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF THE STRAIGHT TOOTH OF AN EARTHMOVING BUCKET…….. 583

М.К. Даутбеков, А.Б. Кеңесбеков, Т.Т. Төлеубаев, А. Мұрал
ВЛИЯНИЕ ТОНКОГО HVOF-ПОКРЫТИЯ CR_3C_2–NICR НА ТЕРМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ И ТЕМПЕРАТУРНОЕ СОСТОЯНИЕ ТРУБ ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЯ КОТЛА БКЗ-320-140……. 593

D.R. Baizhan, N.E. Berdimuratov, N.S. Raisov, G.T. Tleubergenova, N.T. Bimakhan
IMPROVEMENT OF WEAR RESISTANCE OF BEARING STEEL SHKH15 BY PLASMA HARDENING UNDER DIFFERENT PROCESSING CONDITIONS……. 606

ХИМИЯЛЫҚ ТЕХНОЛОГИЯ

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

A.N. Dyuryagina, T.V. Shirina, Yu.S. Byzova, A.A. Lutsenko
MODIFICATION OF FILM-FORMING MATERIALS FOR WATER-BASED PAINT AND VARNISH COMPOSITES…….. 614

Г.А. Жумаханова, С.А. Росс, Дж.А. Алдана-Мехия
ВЫДЕЛЕНИЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ FRIEDELAN-3-ONE ИЗ ДИКОРАСТУЩЕГО РАСТЕНИЯ RUMEX RECHINGERIANUS LOSINSK…….. 629

Г.М. Сейтмагзимова, Ж.С. Серікбаева, Е.А. Полтанова, Л.А. Сейтмагзимова, Р.Р. Якубова
ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ КРИСТАЛЛОВ И ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОСФОГИПСА В ДИГИДРАТНОМ И ПОЛУГИДРАТНОМ СПОСОБАХ ПОЛУЧЕНИЯ ЭКСТРАКЦИОННОЙ ФОСФОРНОЙ КИСЛОТЫ……. 636

Д.Н. Аширалиева, Ж. Тоқтарбай, М.С. Кунарбекова, Б.У. Рахимова, К.К. Құдайбергенов
ФУНКЦИОНАЛДАНҒАН НАНОЦЕЛЛЮЛОЗА НЕГІЗІНДЕГІ АДСОРБЕНТТЕР: СУДЫ ОРГАНИКАЛЫҚ ЖӘНЕ БЕЙОРГАНИКАЛЫҚ ЛАСТАУШЫЛАРДАН ТАЗАРТУ..... 648

N. Baatarbek, K. Kamunur[1], Onuralp Yücel
A MINI REVIEW ON LEACHING METHODS OF ASH AND SLAG WASTE USING AMORPHOUS GRAPHITE IN A MICROWAVE FURNACE…… 674

G.K. Burkeyeva, A.K. Kovaleva, N.M. Zhumabek, Z.M. Ibrayeva
RESEARCH OF THE EFFECT OF UV-IRRADIATION ON UNSATURATED POLYESTER RESINS OBTAINED IN THE PROCESS OF «COLD» CURING WITH ACRYLIC ACID…… 689

D.B. Karimova, A.A. Vosmerikov, S.R. Konuspaev, L.N. Vosmerikova, A.V. Vosmerikov
INVESTIGATION OF CONVERSION OF N-BUTANE TO LIGHT OLEFINS ON CATALYSTS Pd/γ-Al_2O_3 AND Pd/SiO_2…… 696

Р.Н. Ажигулова, Б.Х. Мусабаева, А.К. Жусупова, А.Темирова, А. Абылайхан
ТАУ-КЕН ЖӘНЕ МЕТАЛЛУРГИЯ КЕШЕНІНІҢ ТЕХНОГЕНДІК ҚАЛДЫҚТАРЫН БИОЛОГИЯЛЫҚ ШАЙМАЛАУ ӘДІСІМЕН ӨҢДЕУ..... 704

А.Н. Сабитова, Ж.Ш. Шарипхан, Б.Б. Баяхметова, Ә.Қ. Қабылқақов, Н.Н. Нургалиев
РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЧИСТКИ И УТИЛИЗАЦИИ ОТРАБОТАННЫХ МОТОРНЫХ МАСЕЛ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕНТОНИТОВЫХ СОРБЕНТОВ..... 715

M. Kunarbekova, A.A. Kanykeshova, K. Laszlo, Zh.M. Zhandosov, S. Azat
COFFEE-GROUND–DERIVED HYDROTHERMALLY ACTIVATED CARBON: SYNTHESIS, CHARACTERIZATION, AND ADSORPTION PERFORMANCE TOWARD METHYLENE BLUE…….. 726

Т. Мұқатаева, А. Нұршәріп, А. Сатаева, Ж. Жандосов, А. Байменов
СУДАҒЫ АУЫР МЕТАЛЛ ИОНДАРЫН ТАЗАЛАУҒА АРНАЙЫ MXENE ВАКАНСИЯЛЫҚ ИНЖЕНЕРИЯСЫ: МЕХАНИЗМ, СИНТЕЗ ЖӘНЕ ҚОЛДАНЫСЫ..... 736

И.О. Сапаргали, А.А. Каныкешова, М.С. Кунарбекова, Ж.Токтарбай, С. Азат
ОКИСЛИТЕЛЬНАЯ ДЕГРАДАЦИЯ ПОЛИСТИРОЛЬНОГО МИКРОПЛАСТИКА ПРОЦЕССОМ ФЕНТОНА…… 754

Д.Р. Мулдаш, А.Р Кажмуратов, К.Б. Шакенов, Д.О. Мурзалинов, С. Азат
МАГНИЕТЕРМИЧЕСКОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ КРЕМНЕЗЁМА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОЧИСТОГО КРЕМНИЯ…….. 763

АВТОРЛАРҒА АРНАЛҒАН ЕРЕЖЕ..... 772

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ..... 777

RULES FOR AUTHORS..... 782

Басуға жіберілген күні 30.06.2026 ж. Пішімі 60х84 1/8
Шартты баспа табағы 49,5
Таралымы 100 дана. Бағасы келісімді.

Техникалық редакторы: Е.П. Евлампиева, З.Т. Семейская
Безендіруші: С.Т. Мырзабеков

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

Жылына 4 рет шығады

Құрылтайшысы: «Шәкәрім университеті»
коммерциялық емес акционерлік қоғам

Шәкәрім университетінің
баспаханасында басылды

Редакцияның мекен-жайы: 071412, Абай облысы,
Семей қаласы, ул. Глинки, 20 А
Тел.: +7 (7222) 31-32-49, эл.почта: rio@shakarim.kz